

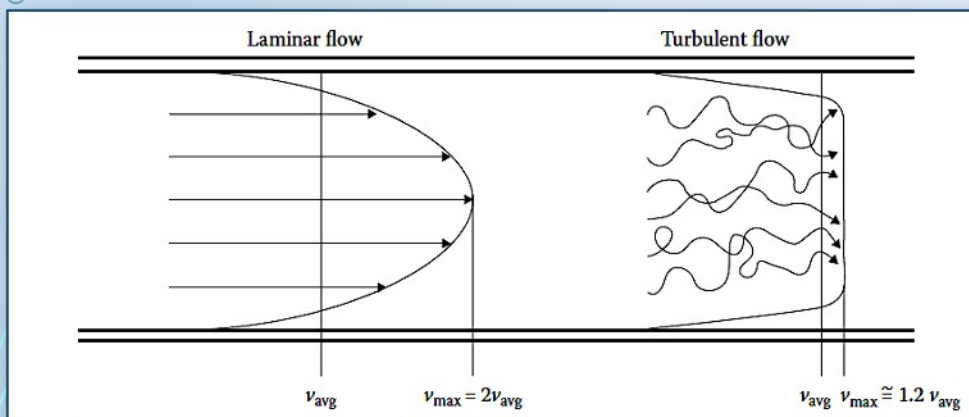


Potreba za mjerenjem brzine i protoka fluida postoji u mnogim granama tehnike, kao što su hemijska industrija, klasična i nuklearna energetika, snabdijevanje vodom ili odvođenje otpadnih voda... Fluidi čija se brzina ili protok mjeri mogu biti gasovi, tečnosti ili tečnosti sa pomiješanim čvrstim sastojcima. U industriji, pretvarači i instrumenti za mjerenje protoka predstavljaju najčešće sastavne djelove regulatora procesa ili pripadaju sistemima za automatsko upravljanje. U oblasti snabdijevanja vodom, tečnim ili gasovitim gorivima, pretvarači za mjerenje protoka predstavljaju osnovne elemente brojila kojima se mjeri protekla količina fluida.

Veliki značaj ima mjerenje brzine vazduha u slobodnom prostoru, kao i određivanje pravca strujanja vazduha, prilikom određivanja relativne brzine kretanja letjelica u odnosu na vazduh. Osim toga, mjerenje brzine i pravca protoka vazduha je od interesa u oblastima kao što su meteorologija, klimatizacija prostorija, biologija itd. Mjerenje brzine i protoka fluida srijeće se i u mnogim laboratorijskim istraživanjima, kako u tehničari, tako i u medicini, farmaciji itd.

Apsolutno mjerenje protoka tečnosti zasniva se na određivanju količnika zapremine ili mase tečnosti i vremena za koje se pri ustaljenom protoku puni neki rezervoar ili menzura. Druga grupa metoda bazira se na mjerenjima brzine raznih vrsta čestica koje fluid nosi sa sobom.

OSNOVNI PRINCIPI TOKA FLUIDA U CIJEVIMA



Postoje tri osnovna tipa kretanja fluida: laminarno, prelazno i turbulentno. Kada je u pitanju laminarno kretanje, fluid se kreće u paralelnim slojevima koji se međusobno ne miješaju u pravcu toka fluida. Sa druge strane, kod turbulentnog kretanja fluid se ne kreće u paralelnim slojevima, već na potpuno slučajan način pri čemu je prosječno kretanje fluida paralelno sa osom cijevi. Prelazni tip kretanja fluida podrazumijeva kombinaciju prethodna dva tipa.

Reynolds je krajem XIX vijeka pokazao da se karakteristike toka mogu predvidjeti upotrebom bezdimenzionog broja, koji se sada označava kao *Reynolds*-ov broj.

Reynolds-ov broj Re se definiše kao:

$$Re = \frac{d\rho\bar{v}}{\eta}$$

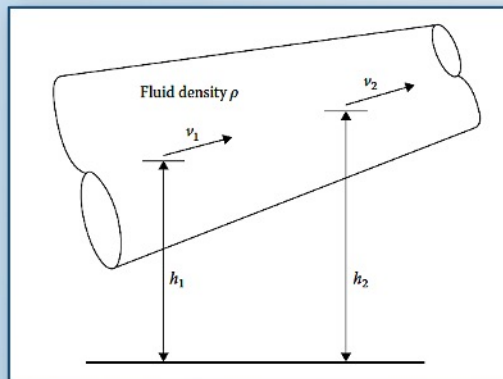
pri čemu je d prečnik cijevi, ρ gustina fluida, \bar{v} srednja brzina kretanja fluida i η dinamička viskoznost fluida.

Ukoliko je *Reynolds*-ov broj Re manji od 2000, dominiraju viskozne sile u toku i tok je laminaran. Ukoliko je Re veće od 4000, dominira inercija i tok će biti turbulentan. U

slučaju da je Re između 2000 i 4000, u pitanju je prelazni tip toka. *Reynolds*-ov broj se računa na osnovu svojstava fluida i ne uzima u obzir faktore kao što su nesavršenosti cijevi, ventili, spojevi, što takođe utiče na sam tok fluida. I pored toga, *Reynolds*-ov broj je veoma dobar pokazatelj tipa kretanja fluida u najvećem broju slučajeva.

Brzina kretanja fluida kroz cijev zavisi od tipa kretanja fluida. Ukoliko je u pitanju laminarno kretanje, profil brzine ima paraboličan oblik jer je zbog intenzivne viskozne sile brzina kretanja fluida manja pri zidovima cijevi. Brzina fluida po osi cijevi je dva puta veća od srednje brzine fluida kroz cijev. Kod turbulentnog toka, uticaj zidova cijevi je manje izražen, i brzina po osi cijevi je oko 1.2 puta veća od srednje brzine fluida. Tačan profil brzine kretanja fluida kada je u pitanju turbulentan tok, zavisi od hrapavosti zidova cijevi, kao i od *Reynolds*-ovog broja. Na slici su prikazani profili brzine u slučaju laminarnog i turbulentnog toka za slučaj veoma duge cijevi gdje se uticaj nesavršenosti cijevi može zanemariti.

BERNOULLI-JEVA JEDNAČINA



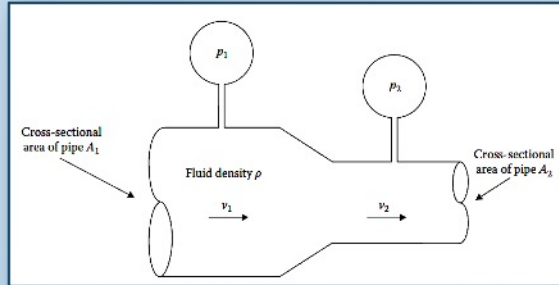
$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

Bernoulli-jeva jednačina predstavlja polaznu tačku za razumijevanje principa određivanja protoka (i brzine) fluida mjerenjem diferencijalnog pritiska. Za nagnutu, suženu cijev, slika, *Bernoulli*-jeva jednačina je:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

Jednačina važi ukoliko je u pitanju fluid konstantne gustine (nekompresibilan fluid) i ukoliko se bez trenja kreće u cijevi.

BERNOULLI-JEVA JEDNAČINA



$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$Q = A_1 v_1$$

$$Q = \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

Za cijev prikazanu na slici, kako je $h_1 = h_2$, na osnovu *Bernoulli*-jeve jednačine važi:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

Kako važi:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Slijedi da je:

$$Q = A_1 v_1 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

Prethodni izraz pokazuje da se zapreminski protok fluida može odrediti na osnovu razlike pritiska ($p_1 - p_2$) duž cijevi sa suženjem.

Pretpostavke da je fluid nekompresibilan i da nema trenja između fluida i zidova cijevi se kompenzuju potpunijim modelom.

BERNOULLI-JEVA JEDNAČINA

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \Rightarrow v_2^2 - v_1^2 = \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}$$

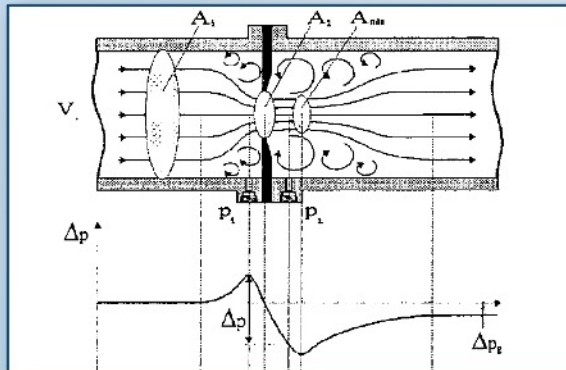
$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$\left(\frac{A_1 v_1}{A_2}\right)^2 - v_1^2 = \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho} \Rightarrow v_1 = \sqrt{\frac{1}{(A_1/A_2)^2 - 1} \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

$$Q = A_1 v_1$$

$$Q = A_1 \sqrt{\frac{1}{(A_1/A_2)^2 - 1} \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{(1/A_2)^2 - (1/A_1)^2} \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} = \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

MJERENJE PROTOKA I BRZINE FLUIDA POMOĆU CIJEVI SA SUŽENJEM. ORIFICE PLATE



$$Q = CA_1v_1 = \frac{CA_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

$$C = f(\beta, Re)$$

$$\Delta p_g = \Delta p(1 - \beta^2)$$

$$\beta = \frac{d}{D}$$

Mjerenje protoka fluida na osnovu promjene pritiska na suženom dijelu horizontalne cijevi, spada u klasične, ali i danas često korišćene mjerne metode. Osnovni tipovi suženja cijevi su tipa ploče sa otvorom (*orifice plate*), mlaznice ili *Venturi*-jeve cijevi.

Najjednostavniji i najjeftiniji način mjerenja protoka fluida je pomoću ploče sa otvorom (*orifice plate*). Svodi se na ubacivanje tanke, ravne metalne ploče sa koncentrično postavljenim kružnim otvorom. Ispred i iza suženja, na određenim udaljenostima, nalaze se otvori na koje se priključuje manometar kojim se mjeri razlika pritisaka $\Delta p = p_1 - p_2$. Ako se za fluid pretpostavi da je nekompresibilan i da se bez trenja kreće u horizontalnoj cijevi, primjenom *Bernoulli*-jeve jednačine dobija se izraz za zapreminski protok tečnosti:

$$Q = \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

gdje su A_1 i A_2 poprečni presjeci mlaza na mjestima na kojima se mjeri razlika pritisaka, dok je ρ gustina tečnosti.

Pri proticanju realnih tečnosti kroz otvor blende, usljed velikog gradijenta pritiska nastaju vrtložna strujanja ispred i iza ploče sa otvorom. Neposredno ispred ploče sa otvorom, usljed zaustavljanja tečnosti dolazi do manjeg porasta pritiska, koji zatim brzo opada i na određenom manjem rastojanju iza blende dostiže svoju minimalnu vrijednost. Na tom mjestu se postavlja otvor za priključak manometra kojim se mjeri pritisak p_2 . S obzirom da je presjek mlaza na mjestu mjerenja pritiska p_2 različit od otvora, to je u izraz za zapreminski protok fluida potrebno uvrstiti odgovarajući korekcionni faktor C , tzv. koeficijent kontrakcije mlaza:

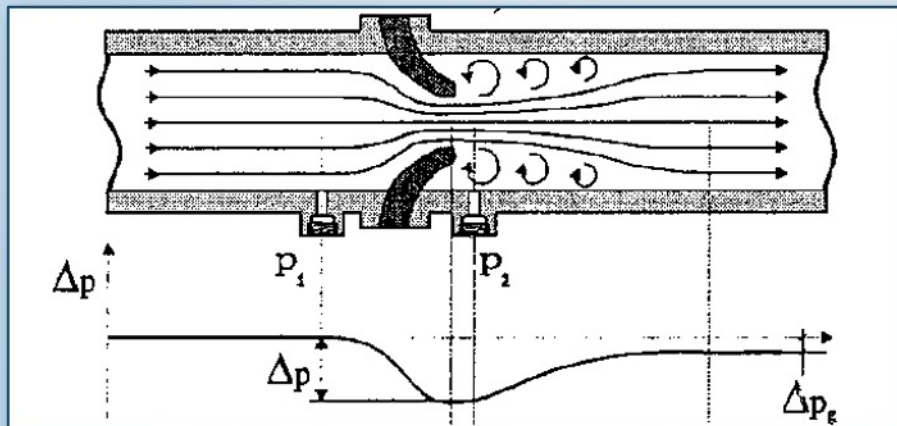
$$Q = CA_1 v_1 = \frac{CA_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}$$

Koeficijent kontrakcije C zavisi od odnosa suženja tj. odnosa prečnika otvora i cijevi $\beta = d/D$, kao i od *Reynolds*-ovog broja Re .

Koeficijent kontrakcije C za različite vrijednosti odnosa suženja β i *Reynolds*-ovog broja Re , određuje se eksperimentalno za razne prečnike cijevi i geometrije ivice ploče sa otvorom. U praksi se koriste standardizovani oblici suženih cijevi sa utvrđenim mjestima za mjerne otvore za koje postoje snimljeni dijagrami koeficijenta kontrakcije C u funkciji parametara Re i β . Za jednu istu cijev se koeficijent C može smatrati približno konstantnim za najveći broj primjena.

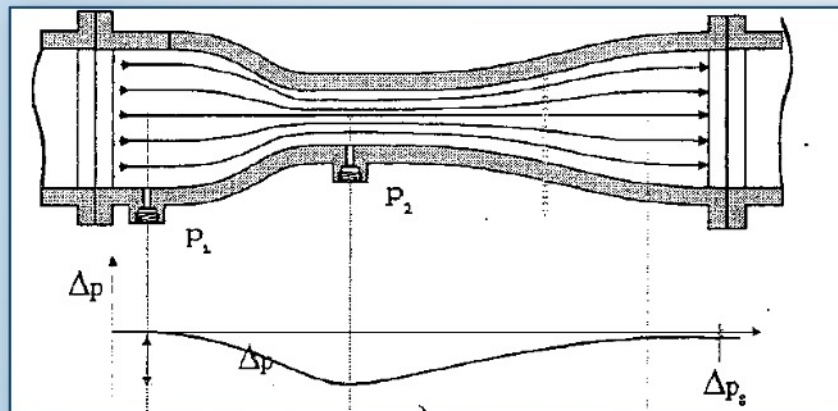
Za ovaj tip cijevi sa suženjem je karakterističan relativno veliki pad pritiska Δp i s tim u vezi velika osjetljivost mjerenja. S druge strane, zbog pojave vrtložnih kretanja ispred i iza otvora nastaju povećani gubici energije što rezultira stalnim gubitkom pritiska, $\Delta p_g = \Delta p(1 - \beta^2)$. Ovaj gubitak pritiska se često mora nadoknađivati pomoću pumpi u slučaju velikih protoka što predstavlja ekonomski gubitak. Među nedostatke spada i osjetljivost ploče sa otvorom na abraziju usljed dejstva čvrstih čestica u tečnosti. Abrazijom se mijenjaju ivice otvora A_2 a time i koeficijent kontrakcije što dovodi do greške mjerenja. Sa druge strane, ploča sa otvorom se lako postavlja na već postojećim spojevima cijevi. Zbog toga se ovaj tip suženja cijevi ipak najčešće koristi u mjerenjima protoka.

MJERENJE PROTOKA I BRZINE FLUIDA POMOĆU CIJEVI SA SUŽENJEM. MLAZNICE



Suženje cijevi oblika mlaznice, slika, zbog zaobljenih ivica daje tok fluida sa vrtložnim strujanjem samo iza otvora. Mjereni pad pritiska Δp , kao i stalni gubitak pritiska Δp_g su manji nego kod dijafragme. U poređenju sa pločom sa otvorom, kod mlaznice, koeficijent kontrakcije mlaza ima veću vrijednost koja se sporije mijenja u oblasti manjih vrijednosti *Reynolds*-ovog broja. Sa druge strane, instalacija mlaznice je skuplja i zahtijeva više prostora. Kako nema „oštrih“ prelaza, ovakva konstrukcija je manje osjetljiva na eroziju, pa se može koristiti i za manje čiste i abrazivne fluide. Koristi se za mjerenja visokih brzina protoka fluida pri visokim temperaturama, npr. pare.

MJERENJE PROTOKA I BRZINE FLUIDA POMOĆU CIJEVI SA SUŽENJEM. VENTURI-JEVA CIJEV



Pri datom suženju d/D Venturi-jeva cijev daje najmanju razliku pritisaka Δp tj. najmanju osjetljivost, ali, s druge strane, unosi najmanje stalne gubitke pritiska Δp_g . Koeffcijent kontrakcije mlaza ima vrijednost koja je bliska jedinici i koja se ne mijenja mnogo sa promjenom odnosa suženja cijevi β . Venturi-jeva cijev ima malu osjetljivost na abraziju površina, ali, s druge strane, zahtijeva više prostora za instalaciju i ima veću cijenu od ostalih tipova sužene cijevi. Ona se prvenstveno koristi za mjerenje velikih protoka kada je naročito važno da se radi uštede energije ne unesu veći stalni gubici pritiska.

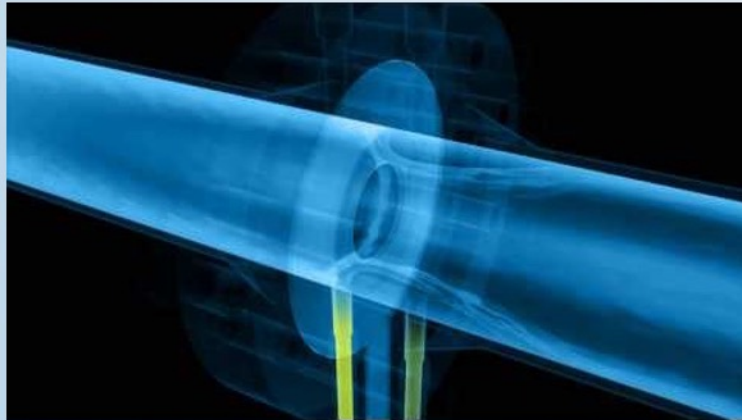
Pri mjerenju kompresibilnih fluida – gasova, uglavnom se mjeri maseni protok $Q_{ms}=Q\rho$.

Pretvarači diferencijalnog pritiska za mjerenje protoka sa suženjem moraju biti osjetljivi jer su padovi pritiska relativno mali, tipično ispod 0.1 bar. Pored kapacitivnih pretvarača koriste se i manometri sa uronjenim zvonom.

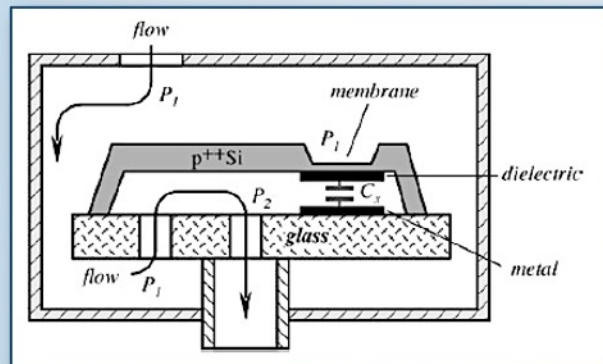
Jedna od osnovnih prednosti mjerenja protoka i brzine fluida pomoću cijevi sa suženjem jeste jednostavnost i činjenica da nema pokretnih elemenata. Osnovni nedostatak je ograničen mjerni opseg (tipično 1:3). Važan nedostatak protokometara

sa suženom cijevi sastoji se u nelinearnoj zavisnosti razlike pritiska od protoka. Taj nedostatak se kompenzuje pomoću kola koja daju električni signal proporcionalan kvadratnom korijenu pritiska. Pad pritiska na prigušnici zavisi i od temperature i apsolutnog pritiska što može izazvati greške mjerenja protoka fluida. Otuda se kod sistema kod kojih se zahtijeva veća tačnost koriste termometar i manometar apsolutnog pritiska koji daju signale proporcionalne temperaturi, odnosno pritisku. Ovi signali se mogu iskoristiti za korekciju greške usljed promjena temperature i apsolutnog pritiska.

MJERENJE PROTOKA I BRZINE FLUIDA POMOĆU CIJEVI SA SUŽENJEM

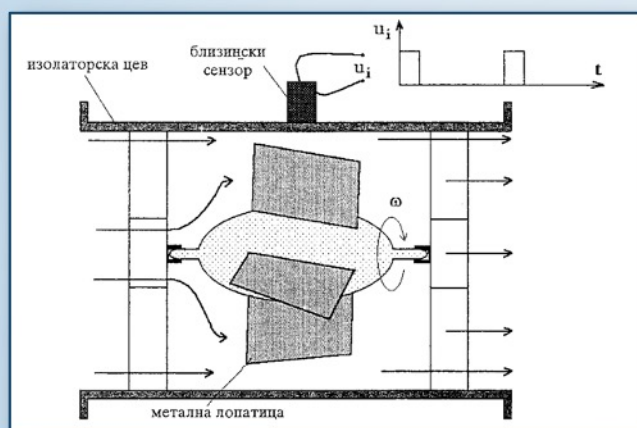


MJERENJE MIKROPROTOKA POMOĆU DIFERENCIJALNOG KAPACITIVNOG SENZORA PRITISKA



Na slici je prikazan senzor za mikroprotok koji se bazira na kapacitivnom senzoru pritiska. Gas ulazi u kućište senzora sa pritiskom p_1 . Isti pritisak je uspostavljen u čitavom prostoru. Gas dalje protiče u unutrašnji šuplji prostor senzora kroz uski kanal koji pruža značajan otpor. Slijedi da je pritisak p_2 unutar šupljine manji od pritiska p_1 . Na taj način se formira razlika pritisaka sa dvije strane membrane. Razlika pritisaka dovodi do izvijanja membrane, što se mjeri kapacitivnim diferencijalnim senzorom pritiska.

TURBINSKI PROTOKOMETRI

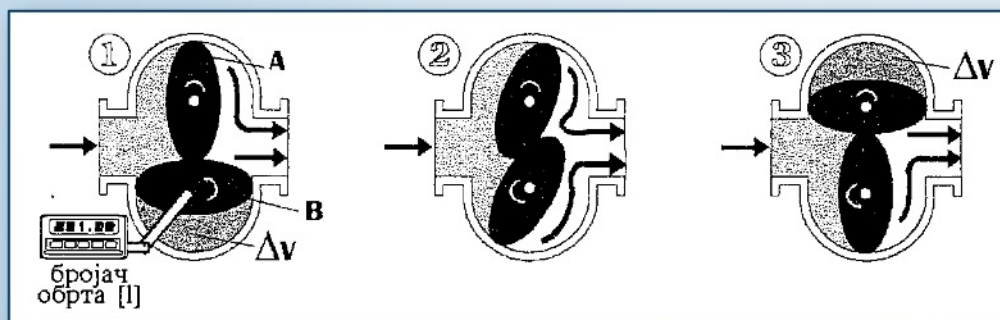


Turbinski pretvarači za mjerenje protoka sastoje se od rotora sa dva ili više krila koji se pod dejstvom toka fluida obrće ugaonom brzinom linearno srazmjernom brzini proticanja fluida.

Turbinski protokometri imaju široku primjenu u praksi za mjerenje brzine i protoka kako tečnosti tako i gasova. Na slici je prikazan jedan turbinski pretvarač. Turbinski pretvarači za električno mjerenje protoka mogu da sadrže indukcionog pomjeraja ugrađen u spoljašnji zid cijevi protokometra. Pri prolasku svakog krila, u namotaju se indukuje naponski impuls. Time se dobija izlazni napon u vidu povorke impulsa čija je učestanost proporcionalna ugaonoj brzini rotora. I amplituda izlaznog napona raste sa povećanjem brzine.

Široka primjena turbinskih protokometara zasniva se na veoma dobroj linearnost i dobrim dinamičkim karakteristikama.

VOLUMETRIJSKI PROTOKOMETRI



Volumetrijski pretvarači (označavaju se i kao PD – *Positive Displacement* metri) za mjerenje protoka gasova i tečnosti zasnivaju svoj rad na mjerenju zapremine proteklog fluida. Fluid koji ulazi na ulaz pretvarača dijeli se na elementarne zapremine koje u toj formi prolaze kroz pretvarač. Broj elementarnih zapremina koji prođe kroz pretvarač je jednoznačno povezan sa brojem obrtaja nekog rotirajućeg elementa. Trenutni protok je srazmjernan sa ugaonom učestanošću rotora, dok je ukupna protekla količina tečnosti u nekom vremenskom intervalu srazmjerna broju obrtaja rotora.

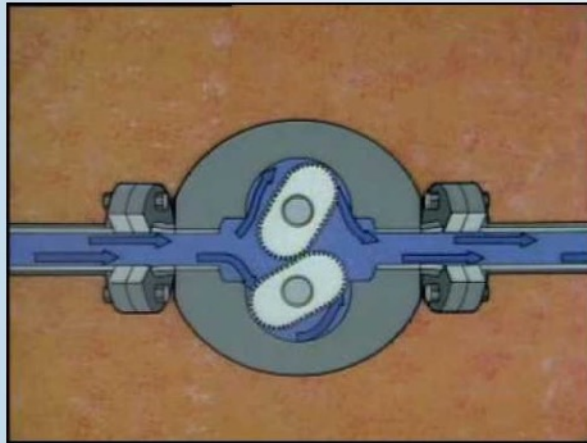
Mogu se posmatrati kao hidraulični motor sa visokom zapreminskom efikasnošću koji apsorbuju malu količinu energije iz fluida koji teče kako bi se pokrenuli. Gubitak energije se odražava kroz pad pritiska. Upravo diferencijalni pritisak predstavlja pokretačku silu PD metra.

Na slici je prikazan jedan od najčešće korišćenih pretvarača za mjerenje protoka tečnosti sa dva ovalna nazubljena rotora. U svakom od prikazanih položaja rotori se međusobno dodiruju onemogućavajući prolazak fluida između međusobno dodirnih površina. Prilikom jednog obrtaja svaki rotor zahvata dva puta po elementarnu zapreminu fluida Δv , šrafirana površina, i potiskuje je ka izlazu pretvarača.

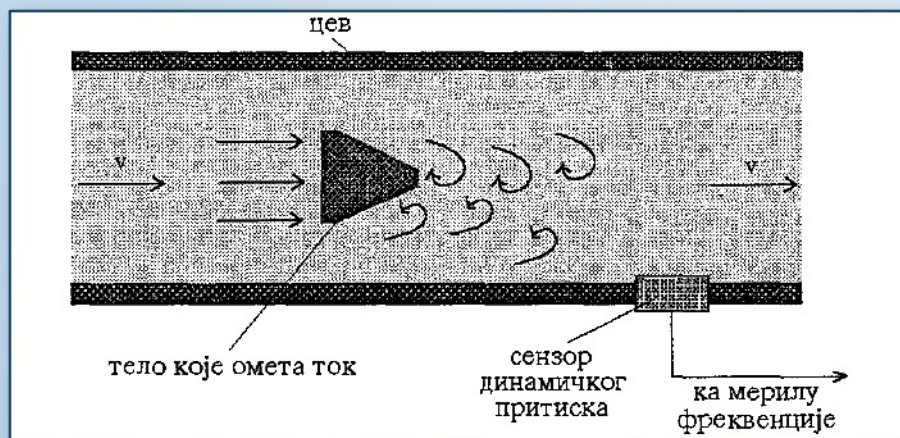
Do greške mjerenja dolazi zbog nesavršene konstrukcije u smislu nekontrolisanog prolaska fluida kroz zatore između rotora i komore, kao i kroz zatore između rotora.

Prilikom prolaska fluida kroz protokometar, dolazi do pada pritiska što se po potrebi nadoknađuje pomoću pumpi. Primjena im je ograničena kada su u pitanju veće čestice u fluidu. Prilikom nagle promjene brzine fluida, može doći do oštećenja masivne konstrukcije.

VOLUMETRIJSKI PROTOKOMETRI



VRTLOŽNI PROTOKOMETRI

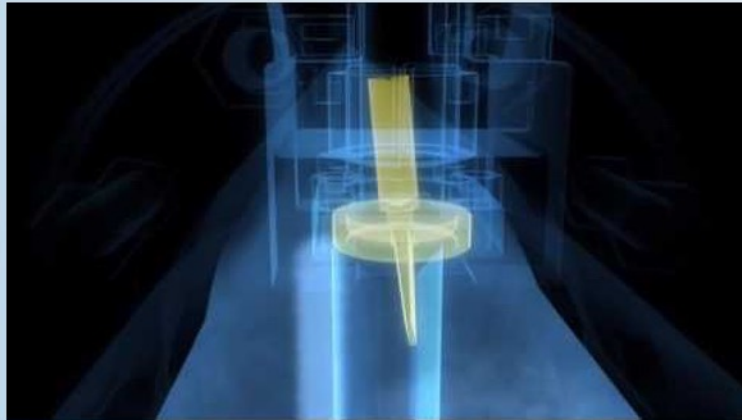


Kada se u struji fluida nalazi nepokretni objekat, nizvodno od njega obrazuju se vrtložna kretanja čija je frekvencija srazmjerna brzini fluida. U prirodi se ova pojava manifestuje kao fijukanje vjetra. Iako se ovaj fizički fenomen proučava preko 100 godina, vrtložni protokometri su novijeg datuma.

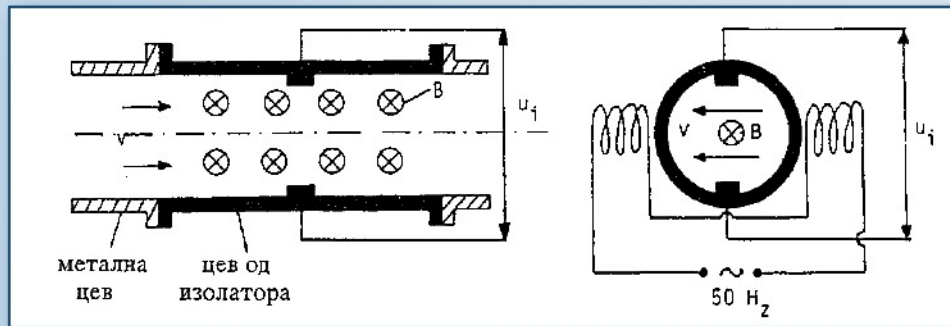
Osnovni djelovi vrtložnih protokometara su cijev sa tijelom koje izaziva vrtloge i detektor frekvencije vrtložnih strujanja. Senzori frekvencije su po konstrukciji najčešće detektori pritiska. Među njima su najpogodniji oni sa piezootpornim ili kapacitivnim sensorima. Postoje i realizacije kod kojih se koriste minijaturni otpornici koji se samozagrijavaju i (po principu anemometara sa konstantnom strujom) mijenjaju svoju otpornost sa učestanošću vrtložnog kretanja fluida, kao i na bazi piezoelektrika koji registruju promjenljivi diferencijalni pritisak ispred i iza prepreke koja izaziva vrtloge.

Vrtložni protokometri nisu pogodni za tečnosti sa velikom viskoznošću. Prednost im je linearna karakteristika.

VRTLOŽNI PROTOKOMETRI



MJRENJE PROTOKA TEČNOSTI POMOĆU INDUKCIONIH PRETVARAČA



$$u_i = dBv; Q = \frac{\pi d^2}{4} v = \frac{\pi d u_i}{4B}$$

Indukcioni pretvarači za mjerenje protoka tečnosti zasnivaju svoj rad na Faradejevom zakonu elektro-magnetne indukcije. Iako je ovaj zakon poznat još od 1834. godine, primjena indukcionih protokometara datira tek od 1950. godine kada je ušao u praksu prvi tip ovog uređaja za mjerenje u industriji. Indukcioni pretvarač, čija je šema prikazana na slici, sastoji se od cijevi oko koje je postavljen namotaj koji stvara homogeno magnetsko polje upravno na osu cijevi, odnosno na pravac kretanja fluida. Na unutrašnjoj strani zida cijevi, u pravcu prečnika upravnog na magnetno polje, postavljene su, naspramno, dvije elektrode za odvođenje izlaznog napona u_i . Ako se tečnost u cijevi ponaša kao provodnik, tada se pri srednjoj brzini v na elektrodama dobija izlazni napon u_i :

$$u_i = dBv$$

pri čemu je d prečnik cijevi, a B je indukcija magnetnog polja. Zapreminski protok tečnosti iznosi:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} v = \frac{\pi d u_i}{4B}$$

Na osnovu izraza za zapreminski protok tečnosti, zaključuje se da indukciono pretvarači protoka imaju linearnu zavisnost izlaznog signala u_i od zapreminskog protoka fluida Q .

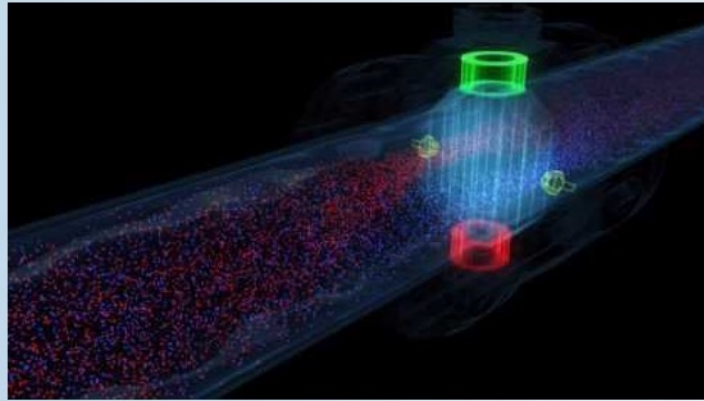
Cijev pretvarača je od izolacionog materijala kako ne bi vršila kratko spajanje izlaznog napona.

Indukciono mjerenje protoka može se primijeniti za sve tečnosti koje se ponašaju kao provodnici kao što su na primjer, voda, razni vodeni rastvori, kiseline, živa itd. Sa druge strane, indukciono mjerenje protoka se ne može primijeniti u slučaju nafte, benzina, ulja i drugih tečnosti koje predstavljaju dobre dielektrike.

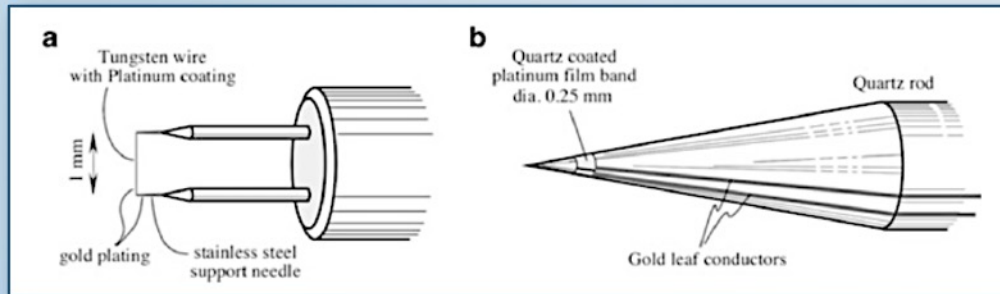
Za mjerenje se može u principu primijeniti i jednosmjerno i naizmjenično magnetno polje. Međutim, kod tečnosti koje sadrže vodu, pri jednosmjernom polju u izlaznom kolu protiče jednosmjerna struja koja izaziva polarizaciju tečnosti. Na elektrodama se sakupljaju mjehurići kiseonika i vodonika koji obrazuju izolacioni sloj i povećavaju unutrašnju otpornost pretvarača. Zbog toga praktični uređaji većinom koriste naizmjenično magnetno polje pri kome ne dolazi do polarizacije.

Indukcioni protokometri predstavljaju skupe i složene uređaje koji se koriste samo kada za to postoji ekonomsko opravdanje. Njihova prednost je prije svega u tome što ne ometaju tok tečnosti (neinvazivni su) nasuprot pretvaračima sa suženjem cijevi. Na rad praktično ne utiču viskoznost, temperatura, gustina i pritisak tečnosti kao ni čvrsti sastojci, pa se može mjeriti i protok otpadnih voda. Odlikuje ih brz odziv, a pokazuju i dobru linearnost u širokom opsegu.

MJRENJE PROTOKA TEČNOSTI POMOĆU INDUKCIONIH PRETVARAČA



ANEMOMETRI SA UGRIJANOM ŽICOM I FILMOM



Anemometri sa ugrijanom žicom ili metalnim filmom služe za mjerenje brzine vazduha u slobodnom prostoru ili u cijevima. Koriste se uglavnom za dinamička mjerenja, kada se zahtijeva velika brzina odziva. Anemometre je prvi opisao engleski istraživač L. King 1915. godine. Žica je uglavnom od platine, tungstena, ili platina-iridijum legure. Uobičajene otpornosti u hladnom stanju su od 2Ω do 3Ω . Žica je pričvršćena za dva držača malih dimenzija da ne bi znatnije uticali na brzinu strujanja na mjestu u kome je postavljen pretvarač, slika a. Najčešće se koriste senzori od tungstena sa tankim slojem platine. Igle su najčešće od nerđajućeg čelika.

Rad anemometra se zasniva na promjeni odvođenja toplote sa ugrijane žice u zavisnosti od brzine okolnog fluida. Žica se zagrijava do $200 \text{ }^\circ\text{C}$ – $300 \text{ }^\circ\text{C}$, značajno iznad temperature fluida. Kako je temperatura žice značajno iznad temperature fluida, na hlađenje žice utiče samo tok fluida. Mjerenjem temperature žice može se zaključiti o brzini protoka fluida.

Po načinu rada anemometri se svrstavaju u dvije glavne kategorije: anemometri sa konstantnom strujom i anemometri sa konstantnom temperaturom. Metod konstantne temperature široko se primjenjuje u praksi za razliku od metode konstantne struje koja se koristi samo u specijalnim mjerenjima kada se zahtijeva

velika brzina odziva, kao na primjer kod mjerenja visokofrekventnih turbulentnih strujanja.

Anemometri sa ugrijanom niti su zbog male debljine podložni kidanju pri mehaničkim udarima a takođe postoji opasnost pregorijevanja pri suviše velikoj struji zagrijavanja. Pri radu u sredini sa dosta nečistoća, usljed lijepljenja stranih čestica, dolazi do osjetnih promjena karakteristika pretvarača.

Površina niti anemometarskog senzora se presvlači zaštitnim slojem od kvarcnog stakla. Senzori zaštićeni kvarcom imaju poboljšanu stabilnost i karakteristike pri radu u sredini sa nečistoćama i povećanom vlažnošću.

Koriste se i senzori sa tankim filmom, slika b, koji se dobija neparavanjem metalnog sloja na kvarcnu ili keramičku podlogu. Anemometri sa film senzorom imaju znatno bolje mehaničke osobine od niti a takođe i povećanu sigurnost u pogledu pregorijevanja. Prednost filmova je i u manjem uticaju nečistoća odnosno njihovom lakšem uklanjanju.

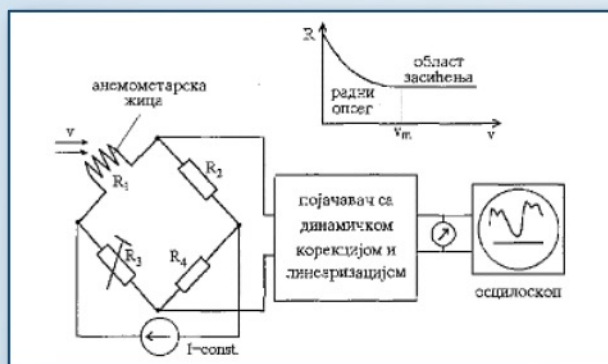
ANEMOMETAR SA KONSTANTNOM STRUJOM

$$R(v)I^2 = hA(T - T_f)$$

$$h = C_0 + C_1\sqrt{v}$$

$$R(v) = R_f[1 + \alpha'(T - T_f)]$$

$$R(v) = \frac{AR_f}{\alpha'} \frac{C_0 + C_1\sqrt{v}}{(C_0 + C_1\sqrt{v})\frac{A}{\alpha'} - R_f I^2}$$



Kod ovog tipa anemometra kroz žicu (film) se propušta konstantna struja koja senzor u mirnom vazduhu dovodi na temperaturu 120 °C do 200 °C. Usled strujanja fluida dolazi do bržeg odvođenja toplote sa žice, pa se temperatura i otpornost žice smanjuju. Tipična zavisnost otpornosti od brzine vazduha pri konstantnoj struji, i pri stalnoj temperaturi okoline, prikazana je na slici. Može se uočiti da je osjetljivost pri malim brzinama velika, kao i da osjetljivost opada sa porastom brzine. Iznad određene granične vrijednosti brzine fluida v_m kriva prelazi u oblast zasićenja u kojoj se otpornost neznatno mijenja sa porastom brzine fluida. Povećanjem struje grijanja povećava se granična brzina v_m pri kojoj dolazi do zasićenja. Prečnik žice je reda nekoliko mikrona, dok je dužina žice reda nekoliko milimetara.

Pri ustaljenoj brzini fluida v dolazi do ravnotežnog stanja pri kome se električna snaga $R(v)I^2$ izjednačava sa brzinom odvođenja toplote od strane fluida. Pošto je odvođenje toplote direktno srazmjerno razlici temperature žice i fluida, uslov ravnoteže je dat izrazom:

$$R(v)I^2 = hA(T - T_f)$$

gdje je A površina senzora, T temperatura na površini senzora, h koeficijent prenosa

toplote sa površine senzora na fluid i T_f temperatura fluida. Koeficijent h je funkcija brzine fluida:

$$h = C_0 + C_1\sqrt{v}$$

gdje su C_0 i C_1 pozitivne konstante koje zavise od oblika senzora i vrste fluida. Otpornost je približno linearna funkcija temperature:

$$R(v) = R_f [1 + \alpha'(T - T_f)]$$

gdje je R_f otpornost senzora na temperaturi fluida tj. kada kroz njega ne protiče struja. Koeficijent α' se nešto razlikuje od linearnog koeficijenta otpornosti α koji važi za početnu temperaturu žice od 0 °C. Osjetljivost sistema je veća pri manjim brzinama i pri većim strujama grijanja.

Šema jednog anemometra sa konstantnom strujom prikazana je na slici. Anemometarski senzor predstavlja jednu granu mosta koji radi u neuravnoteženom režimu. Most se napaja iz izvora konstantne struje. Ako su otpornost senzora R_1 , kao i otpornost R_2 znatno manje od R_3 i R_4 , struja grijanja je skoro konstantna i približno jednaka struji izvora. Pri određenoj brzini fluida, most se dovodi u ravnotežu promjenom otpornosti jedne grane mosta. Izlazni napon je funkcija promjene brzine u odnosu na brzinu pri kojoj je postignuta ravnoteža.

Osnovna namjena anemometara sa ugrijanom žicom (filmom) je mjerenje brzih promjena strujanja kao što su na primjer turbulencije koje nastaju u vazдушnim tunelima.

ANEMOMETAR SA KONSTANTNOM STRUJOM

$$R(v)I^2 = hA(T - T_f) \Rightarrow T - T_f = \frac{R(v)I^2}{hA}$$

$$h = C_0 + C_1\sqrt{v}$$

$$R(v) = R_f [1 + \alpha'(T - T_f)]$$

$$R(v) = R_f \left[1 + \alpha' \frac{R(v)I^2}{(C_0 + C_1\sqrt{v})A} \right]$$

$$R(v) = \frac{AR_f}{\alpha'} \frac{C_0 + C_1\sqrt{v}}{(C_0 + C_1\sqrt{v})\frac{A}{\alpha'} - R_f I^2}$$

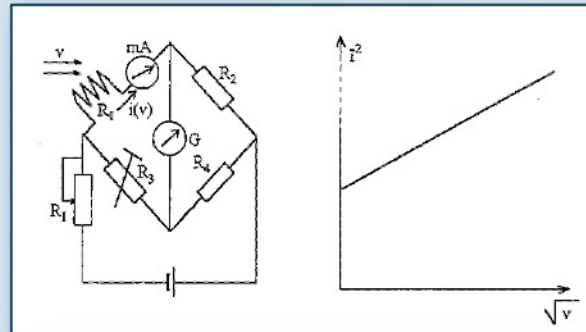
ANEMOMETAR SA KONSTANTNOM TEMPERATUROM

$$R_0 I^2(v) = hA(T_0 - T_f)$$

$$h = C_0 + C_1 \sqrt{v}$$

$$R_0 = R_f [1 + \alpha'(T_0 - T_f)]$$

$$I^2(v) = \frac{A}{\alpha'} \frac{R_0 - R_f}{R_0 R_f} (C_0 + C_1 \sqrt{v})$$



Kod ove metode temperatura pretvarača se održava konstantnom pri različitim brzinama fluida. Principijelna šema mosta na osnovu metode konstantne temperature prikazana je na slici. Na početku mjerenja, pri nultoj brzini, struji grijanja I_0 odgovara otpornost pretvarača R_0 . Promjenljivim otpornikom R_3 most se dovodi u ravnotežu. Usljed kretanja fluida smanjuje se temperatura senzora, međutim, tada se struja grijanja povećava promjenljivim otpornikom R_1 , čime se ponovo ostvaruje početna temperatura. Kao mjera brzine fluida koristi se struja I :

$$I^2(v) = \frac{A}{\alpha'} \frac{R_0 - R_f}{R_0 R_f} (C_0 + C_1 \sqrt{v})$$

ili se brzina očitava na skali promjenljivog otpornika R_1 .

ANEMOMETAR SA KONSTANTNOM TEMPERATUROM

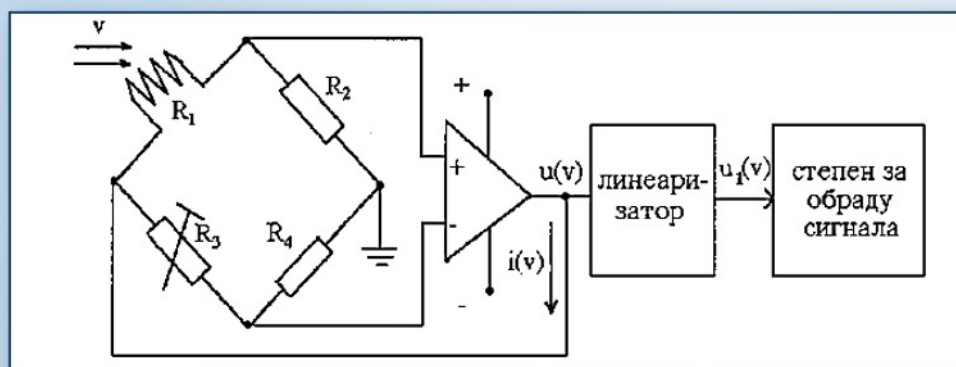
$$R_0 I^2(v) = hA(T_0 - T_f) \Rightarrow I^2(v) = \frac{hA(T_0 - T_f)}{R_0}$$

$$h = C_0 + C_1\sqrt{v}$$

$$R_0 = R_f[1 + \alpha'(T_0 - T_f)] \Rightarrow T_0 - T_f = \frac{R_0 - R_f}{R_f\alpha'}$$

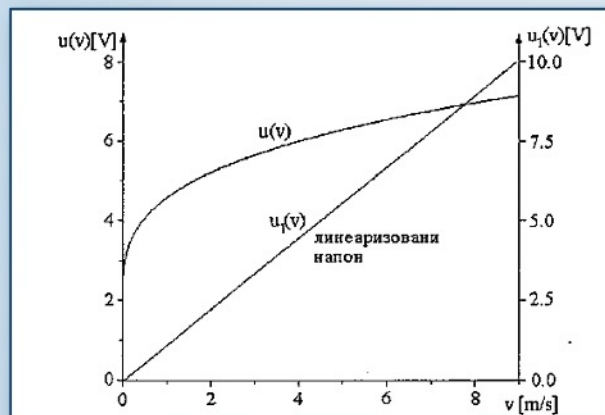
$$I^2(v) = \frac{A}{\alpha'} \frac{R_0 - R_f}{R_0 R_f} (C_0 + C_1\sqrt{v})$$

ANEMOMETAR SA KONSTANTNOM TEMPERATUROM



Anemometri sa konstantnom temperaturom koriste automatsko uravnotežavanje mosta uz pomoć pojačavača velikog pojačanja u čijem kolu povratne sprege se nalazi anemometarski most. Na izlazu pojačavača se dobija napon koji će izazvati takvo zagrijavanje pretvarača da most bude u ravnoteži pri različitim brzinama strujanja fluida. Otpornici u mostu R_2 , R_3 , i R_4 imaju konstantne vrijednosti pa će i otpornost senzora u svakom trenutku približno ispunjavati uslov $R_0 = R_2 R_3 / R_4$. Ako je, na primjer, u početnom stanju brzina fluida nula, na izlazu pojačavača postoji određeni napon $u(0)$. Pri tome je sonda zagrijana na temperaturu T_0 kojoj odgovara otpornost R_0 . Ako se brzina fluida povećava, usljed intenzivnijeg odvođenja toplote, temperatura i otpornost niti teže da se smanje. To dovodi do pojave izlaznog napona mosta koji je istovremeno ulazni napon pojačavača. Pojačani napon izaziva porast snage niti, pa njena temperatura ponovo dostiže prvobitnu vrijednost. Time se most vraća u stanje blisko ravnoteži. Kao mjera brzine strujanja koristi se izlazni napon pojačavača tj. napon napajanja mosta. Temperatura niti T_0 , odnosno otpornost R_0 određuje se jednim od otpornika u mostu, na primjer R_3 , kao što je naznačeno na slici.

ANEMOMETAR SA KONSTANTNOM TEMPERATUROM

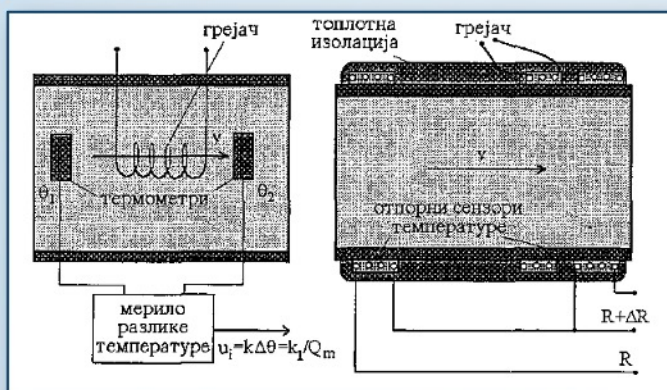


Tipičan oblik izlaznog napona $u(v)$ prikazan je na slici. Izlazni napon je izrazito nelinearna funkcija brzine. Zato se kod nekih anemometra koriste stepeni za linearizaciju. Na izlazu se dobija napon proporcionalan mjerenoj brzini. Osnovna prednost metode konstantne temperature je širok mjerni opseg, jer karakteristika nema zasićenja u oblasti većih brzina, kao kod metode konstantne struje. U dinamičkom pogledu anemometar sa konstantnom temperaturom je veoma složen sistem, što znači da postoji opasnost samooscilovanja. Međutim, u užem opsegu brzina sistem se može opisati linearnom diferencijalnom jednačinom prvog reda. Vremenska konstanta zavisi prvenstveno od pojačanja pojačavača tj. inverzno je proporcionalna pojačanju. Sa minijaturnim pretvaračima (manji poprečni presjek senzora odgovara većoj otpornosti a samim tim i većoj vremenskoj konstanti) i odgovarajućim pojačavačem širokog propusnog opsega ostvaruje se gornja granična učestanost reda stotina kHz.

TERMALNI PROTOKOMETRI

$$P = \frac{mc\Delta\theta}{t} = Q_m c \Delta\theta$$

$$u_i = k\Delta\theta = \frac{kP}{cQ_m}$$



Osnovne djelove termalnog protokometra čine cijev u kojoj su smješteni grijač i dva termometra koji mjere razliku temperatura fluida ispred i iza grijača, slika. Ako je snaga grijača stalna, pri stacionarnom toku i uz zanemarivanje gubitaka toplote, cjelokupna energija grijača se odnosi protokom fluida koji se zagrijava za temperaturnu razliku $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$:

$$P = \frac{mc\Delta\theta}{t} = Q_m c \Delta\theta$$

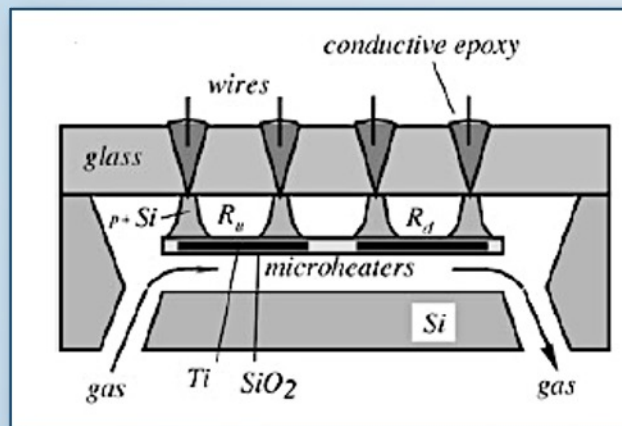
gdje je Q_m maseni protok, dok je c specifična toplota medijuma. Ako je izlazni signal u_i termometra srazmjeran razlici temperatura, tada važi:

$$u_i = k\Delta\theta = \frac{kP}{cQ_m}$$

Izraz važi za protoke veće od neke minimalne vrijednosti. Termalni protokometri daju izlazni signal srazmjeran masenom protoku fluida, za razliku od većine drugih uređaja koji mjere zapreminski protok fluida. Razlika temperatura $\Delta\theta$ je reda veličine 1 °C ili manja pa se koriste osjetljivi senzori temperature.

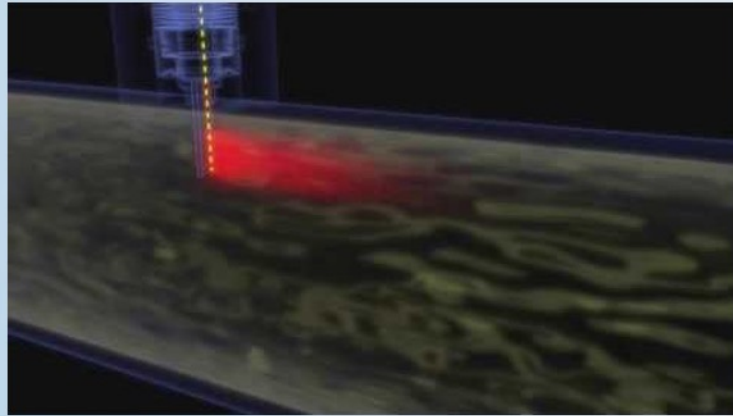
Komercijalni termalni protokometri se koriste za precizna mjerenja malih protoka gasova u tehnici plazme i drugim istraživanjima u fizici. Na slici desno je prikazana konfiguracija termičkog protokometra sa grijačem i senzorom razlike temperature postavljenim na spoljašnje strane cijevi tako da se ne ometa proticanje fluida. Karakteristike ovog protokometra se optimizuju empirijskim podešavanjem međusobnog položaja grijača i senzora. Protokometar na slici je pogodan za mjerenje većih protoka tečnosti i gasova.

MJERENJE MIKROPROTOKA TERMOANEMOMETRIMA



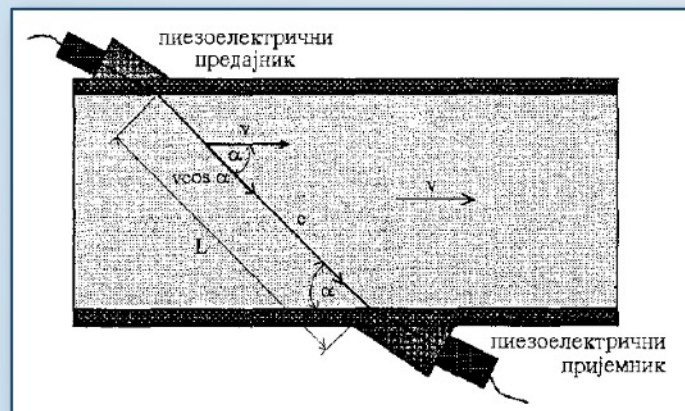
Minjturni senzori protoka se sve češće koriste u hemijskoj i farmaceutskoj industriji, kao i u biomedicini. Primjer termalnog mikrosenzora dat je na slici. Titanijumski filmovi debljine 0.1 μm služe i kao temperaturni senzori i kao grijači. Njihova otpornost iznosi oko 2 $\text{k}\Omega$. Titanijumski filmovi su između dva sloja SiO_2 . Titanijum se koristi zbog svog visokog temperaturnog koeficijenta otpornosti. Dva mikrogrijača su povezana za četiri Si nosača na međusobnom rastojanju od 20 μm .

TERMALNI PROTOKOMETRI



ULTRAZVUČNI PROTOKOMETRI

$$\vec{c}' = \vec{c} + \vec{v}$$
$$c' = c + v \cos \alpha$$



Ultrazvučni protokometri baziraju svoj rad na zavisnosti brzine ultrazvuka (zvuka) od brzine fluida u kome se ultrazvuk prostire. Ako je c brzina ultrazvuka u mirnom fluidu a v brzina fluida, brzina prostiranja c' u pokretnom fluidu određena je vektorskim zbirom:

$$\vec{c}' = \vec{c} + \vec{v}$$

Pošto je uvijek zadovoljen uslov, $c \gg v$, vektorski izraz se može aproksimirati:

$$c' = c + v \cos \alpha$$

gdje je α ugao između pravca ultrazvuka i fluida. Ultrazvuk visoke učestanosti ima osobinu da se na kraćim rastojanjima kreće usmjereno slično svjetlosnim zracima, slika.

ULTRAZVUČNI PROTOKOMETRI

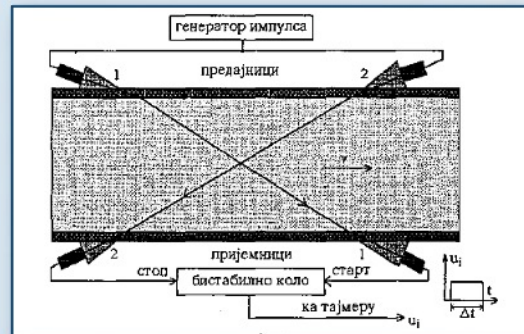
$$t_1 = \frac{L}{c + v \cos \alpha}$$

$$t_2 = \frac{L}{c - v \cos \alpha}$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2Lv \cos \alpha}{c^2 - v^2 \cos^2 \alpha}$$

$$\approx \frac{2Lv \cos \alpha}{c^2}$$

$$v = \frac{L(t_2 - t_1)}{2t_1 t_2 \cos \alpha}$$



Na slici je prikazana jedna od varijanti impulsnog ultrazvučnog protokometra koji radi sa dva predajna i dva prijemna piezoelektrična pretvarača. Predajnici i prijemnici su na jednakim rastojanjima L . Oba predajnika pobuđuju se istovremeno naponskim impulsom generišući kratkotrajni ultrazvučni impuls.

Prijemne ultrazvučne pločice se pobuđuju u trenucima t_1 i t_2 :

$$t_1 = \frac{L}{c + v \cos \alpha}$$

$$t_2 = \frac{L}{c - v \cos \alpha}$$

Trajanje impulsa Δt iznosi:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2Lv \cos \alpha}{c^2 - v^2 \cos^2 \alpha} \approx \frac{2Lv \cos \alpha}{c^2}$$

Trajanje impulsa Δt koje je proporcionalno brzini fluida je veoma kratko. Na primjer, za vrijeme $\Delta t = 0.4 \text{ us}$, i rezoluciju 1 %, potreban je digitalni brojač sa frekvencijom takt impulsa 250 MHz.

Promjene brzine prostiranja ultrazvučnog talasa usljed promjene temperature značajno utiču na mjereni rezultat. Iz tog razloga mjeri se vrijeme t_1 i t_2 , pa se brzina izračunava kao:

$$v = \frac{L(t_2 - t_1)}{2t_1 t_2 \cos \alpha}$$

U ovom izrazu nema brzine ultrazvuka u fluidu, pa je i temperaturni uticaj na rezultat mjerenja u znatnoj mjeri smanjen.

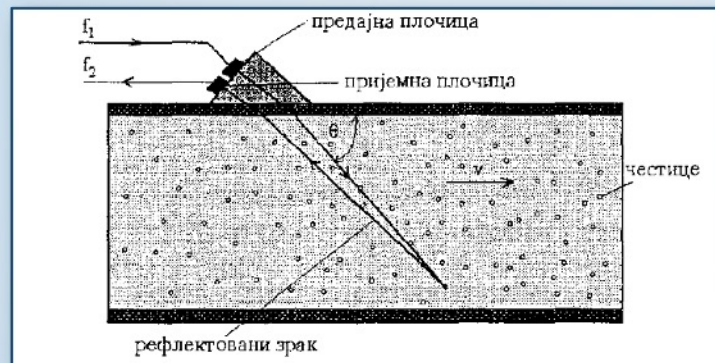
Ultrazvučni protokometri se primjenjuju češće kod tečnosti nego kod gasova. Kod tečnosti se frekvencija ultrazvuka kreće u opsegu 1 MHz do 5 MHz a u slučaju gasova od 0.2 MHz do 0.5 MHz.

ULTRAZVUČNI PROTOKOMETRI

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2Lv\cos\alpha}{c^2 - v^2\cos^2\alpha} \approx \frac{2Lv\cos\alpha}{c^2} \Rightarrow v = \frac{\Delta t c^2}{2L\cos\alpha}$$
$$t_1 = \frac{L}{c + v\cos\alpha} \text{ i } t_2 = \frac{L}{c - v\cos\alpha} \Rightarrow t_1 t_2 = \frac{L^2}{c^2 - v^2\cos^2\alpha} \approx \frac{L^2}{c^2} \Rightarrow \frac{c^2}{L} = \frac{L}{t_1 t_2}$$
$$v = \frac{L(t_2 - t_1)}{2t_1 t_2 \cos\alpha}$$

ULTRAZVUČNI PROTOKOMETRI

$$\begin{aligned}
 f_d &= f_2 - f_1 \\
 &= \frac{c \pm v \cos \theta}{c \mp v \cos \theta} f_1 - f_1 \\
 &= \left(\frac{c \pm v \cos \theta}{c \mp v \cos \theta} - 1 \right) f_1 \\
 &= \pm \frac{2v \cos \theta}{c \mp v \cos \theta} f_1 \\
 &\approx \pm \frac{2v \cos \theta}{c} f_1 \\
 v &\approx \pm c \frac{f_d}{2f_1 \cos \theta}
 \end{aligned}$$



Kada se na objekt koji se kreće brzinom v usmjeri ultrazvuk frekvencije f_1 , tada se frekvencija f_2 ultrazvuka reflektovanog sa objekta ponaša u skladu sa *Doppler*-ovom relacijom:

$$f_2 = \frac{c \pm v \cos \theta}{c \mp v \cos \theta} f_1$$

Doppler-ov ultrazvučni protokometar ima kao pretvarač primopredajnu glavu sa dvije piezoelektrične pločice, slika. Jedna od pločica emituje ultrazvuk učestanosti f_1 dok druga služi kao prijemnik ultrazvuka reflektovanog od čestica nečistoće, vazдушnih mjehurića i drugih nehomogenosti u fluidu. Usljed *Doppler*-ovog efekta, reflektovani ultrazvuk ima promijenjenu učestanost f_2 koja iznosi:

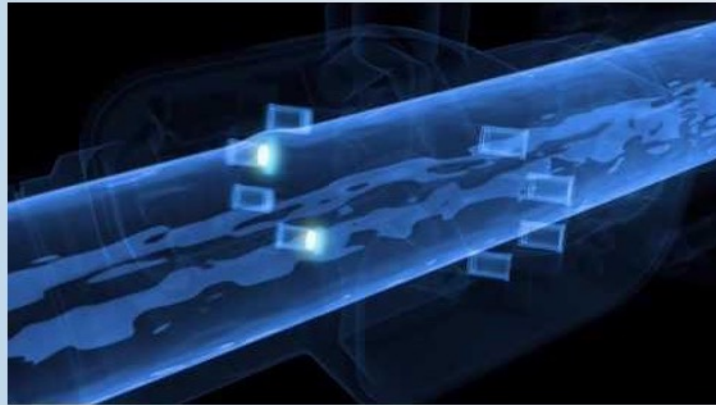
$$f_2 = f_1 \left(1 \pm \frac{2v \cos \theta}{c} \right)$$

odakle se dobija izraz za brzinu fluida:

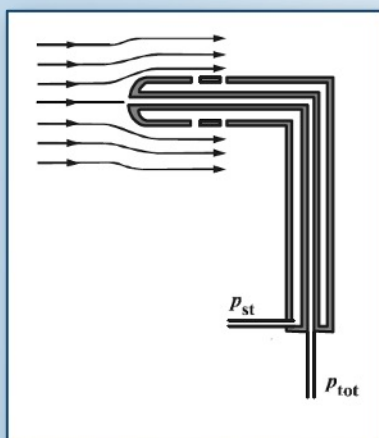
$$v = \pm c \frac{f_2 - f_1}{2f_1 \cos\theta}$$

Na rad ovih protokometara utiče koncentracija i veličina suspendovanih čestica kao i raspodjela brzine fluida po presjeku cijevi. Tačnost je relativno loša i uglavnom se koriste kao indikatori kada se ne zahtijeva veća tačnost mjerenja. Pomoću *Doppler*-ovog ultrazvučnog protokometra određuje se protok u krvnim sudovima u medicinskim dijagnostičkim sistemima.

ULTRAZVUČNI PROTOKOMETRI



PITOT-OVA CIJEV



Pitot-ova cijev predstavlja široko rasprostranjen pretvarač za mjerenje brzine u otvorenim i zatvorenim strujanjima fluida, posebno gasova. Neposredno uz zid cjevovoda sa unutrašnje strane fluid miruje i tu djeluje samo statički pritisak p_{st} . Po osi cijevi djeluje totalni pritisak p_{tot} koji je u odnosu na statički uvećan za dinamičku komponentu $\rho v^2/2$. Dinamički pritisak računa se iz razlike:

$$\Delta p = p_{tot} - p_{st} = \rho v^2 / 2.$$

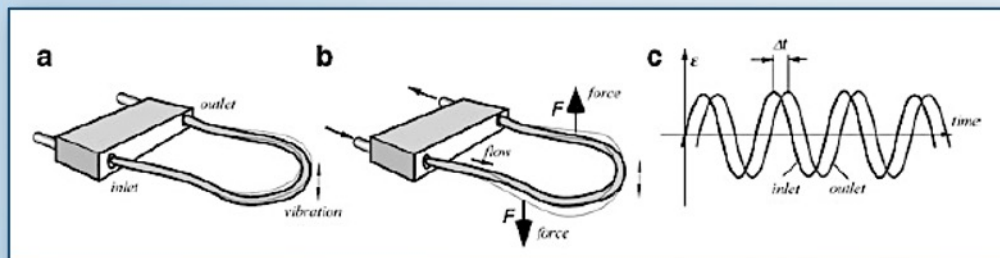
Na izlazu diferencijalnog pretvarača za mjerenje pritiska dobija se signal proporcionalan kvadratu brzine, slično kao i kod pretvarača sa suženom cijevi. *Pitot*-ova cijev se koristi za mjerenje brzine letjelice, za mjerenje strujanja gasova u cijevima, za kalibraciju anemometara itd.

U jedinstvenom kućištu otvor za totalni pritisak je u smjeru toka, a više otvora normalno na tok služi za mjerenje statičkog pritiska, slika desno.

PROTOKOMETRI NA BAZI *PITOT*-OVE CIJEVI



PROTOKOMETRI NA BAZI CORIOLIS-OVOG EFEKTA



Coriolis protokometri, razvijeni 80-tih godina prošlog vijeka, mjere direktno maseni protok fluida, za razliku od onih koji mjere brzinu ili zapreminski protok fluida. Kako su nezavisni od promjenljivih parametara fluida (pritisak, temperatura, viskoznost, gustina), našli su veoma široku primjenu. Odlikuje ih veoma visoka tačnost. Nemaju pokretnih elemenata, pa su jednostavni za održavanje i nije im potrebna česta kalibracija. Kada su uvedeni, koristili su se samo za tečnosti. Danas se koriste i za gasove.

Coriolis-ov senzor se sastoji od jedne ili dvije cijevi koje vibriraju sa dovodom i odvodom. Tipičan materijal za cijevi je nerđajući čelik. Većina cijevi su U oblika, ali postoje i drugi oblici. Tanje cijevi se koriste za gasove dok se deblje koriste za tečnosti. *Coriolis*-ova cijev vibrira pod uticajem spoljašnjeg elektromehaničkog sistema.

Maseni protok fluida se određuje na bazi uvrtnja cijevi koja vibrira pod uticajem fluida koji se kreće. Kao rezultat djelovanja *Coriolis*-ove sile, cijev se deformiše kako prolazi kroz vibrirajući ciklus. "Količina" uvrtnja je direktno proporcionalna masenom protoku fluida kroz cijev. Na slici a je prikazana *Coriolis*-ova cijev bez fluida, na slici b je prikazana *Coriolis*-ova cijev kroz koju protiče fluid.

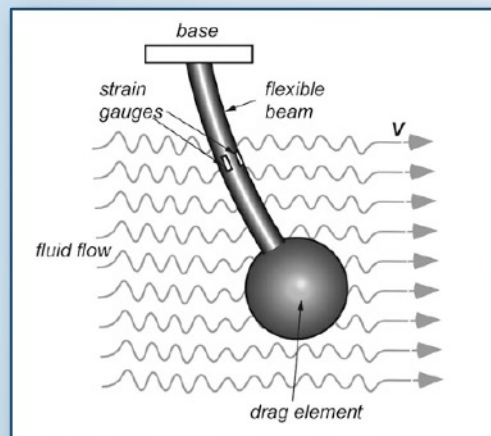
Ukoliko ne protiče fluid, cijev vibrira identično na strani dovoda i odvoda, u fazi. Prilikom proticanja fluida, cijev se uvija i dolazi do fazne razlike na strani dovoda i odvoda, slika c. Rezonantna učestanost cijevi proporcionalna je gustini fluida, pa se mogu koristiti i za određivanje gustine fluida.

Glavni nedostatak *Coriolis*-ovog senzora je visoka cijena. Sa druge strane, raznovrsnost *Coriolis*-ovih senzora za različite fluide (voda, sirova nafta, kiseline) čini ih veoma korisnim za primjene gdje je potrebno vršiti mjerenja upravo za različite tipove fluida.

PROTOKOMETRI NA BAZI CORIOLIS-OVOG EFEKTA

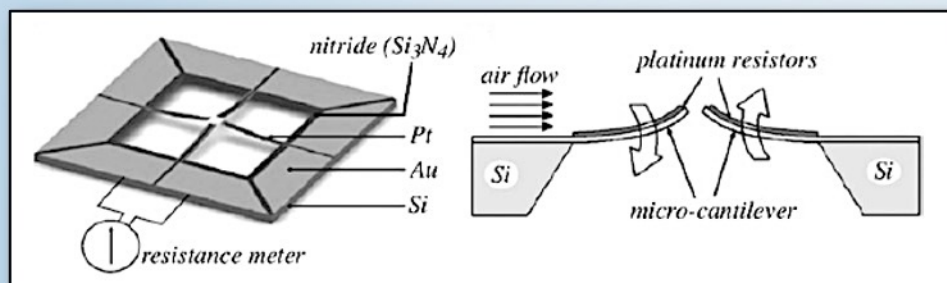


SENZORI PROTOKA NA BAZI POVLAČENJA



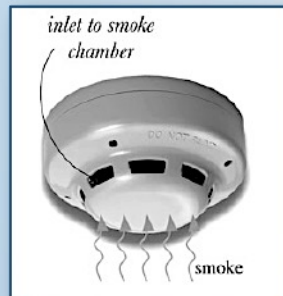
Ukoliko je kretanje fluida sporadično, multidirekciono, i turbulentno, senzori protoka na bazi povlačenja mogu biti korisni. Primjena ovih senzora se odnosi na monitoring okoline, meteorologiju, hidrologiju i pomorske studije koje uključuju mjerenje brzine vazduha ili protoka vode i turbulencije blizu površine vode. Čvrsti objekat koji se povlači se izlaže dejstvu fluida. Sila kojom fluid djeluje na čvrsti objekat se mjeri i ukazuje na vrijednost brzine protoka fluida. Posebna prednost ovih sistema je ta što je moguće obaviti mjerenje u više pravaca. Princip rada se zasniva na mjerenju naprezanja elastične konzole na koju se sila prenosi sa simetričnog sfernog tijela koje se povlači pod uticajem kretanja fluida, slika. Mjerenje se može izvršiti korišćenjem mjernih traka koje se moraju adekvatno zaštititi. Naprezanje je proporcionalno kvadratu brzine fluida.

KONZOLNI MEMS SENZORI



Slično sensorima na bazi povlačenja, konzolni senzori se baziraju na mjerenju naprezanja koje je izazvano protokom fluida. MEMS sensor za mjerenje brzine protoka fluida do 45 m/s, sa vremenom odziva od 0.5 s i potrošnjom snage 0.02 mW za bio-medicinske aplikacije prikazan je na slici. Prikazana struktura sadrži četiri prednapregnute grede sa platinskim piezotronicima na svakoj od njih. Pod uticajem strujanja fluida, zakrivljenost greda se moduliše kako je prikazano na slici. Pod uticajem fluida koji se kreće dolazi do mehaničkog naprezanja greda, a samim tim i do promjene otpornosti mjernih traka. Na osnovu mjerenja promjene otpornosti, može se odrediti brzina protoka fluida.

DETEKTORI DIMA I PRAŠINE

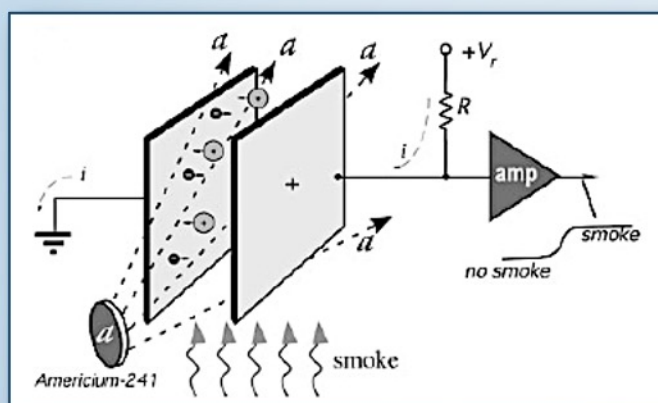


Particle	Particle size (µm)	Particle	Particle size (µm)
Glass wool	1000	Coal dust	1-100
Spanish moss pollen	150-750	Smoke from synthetic materials	1-50
Beach sand	100-10,000	Face powder	0.1-30
Mist	70-350	Asbestos	0.7-90
Pollens	10-1000	Calcium zinc dust	0.7-20
Textile fibers	10-1000	Paint pigments	0.1-5
Fiberglass Insulation	1-1000	Car emission	1-150
Grain dusts	5-1000	Clay	0.1-50
Human hair	40-300	Humidifier	0.9-3
Dust mites	100-300	Copier toner	0.5-15
Saw dust	30-600	Liquid droplets	0.5-5
Cement dust	3-100	Insecticide dusts	0.5-10
Mold spores	10-30	Anthrax	1-5
Textile dust	6-20	Yeast cells	1-50
Spider web	2-3	Carbon black dust	0.2-10
Spores	3-40	Atmospheric dust	0.001-40
Combustion-related carbon monoxide from motor vehicles, wood burning, open burning, industrial processes	up to 2.5	Smoldering or flaming cooking oil	0.03-0.9
Sea salt	0.035-0.5	Combustion	0.01-0.1
Bacteria	0.3-60	Smoke from natural materials	0.01-0.1
Burning wood	0.2-3	Tobacco smoke	0.01-4
Coal flue gas	0.08-0.2	Vinuses	0.005-0.3
Oil smoke	0.03-1	Pesticides and herbicides	0.001

Senzori dima i nečistoća u vazduhu se baziraju na detekciji prisustva malih čestica u vazduhu i imaju široku upotrebu. Iako u principu nije u pitanju mjerenje protoka fluida, posmatra se kretanje gasa kroz detekcionu komoru senzora. Najpoznatiji su detektori dima koji se postavljaju na plafon, slika. Detektori sadrže dovod kroz koji gas pasivno prolazi, ili se forsira na neki način.

Veličina čestica u vazduhu varira u zavisnosti od porijekla, tabela. Za detekciju prisustva malih čestica u vazduhu koriste se dva tipa senzora: jonizacioni i optički detektori.

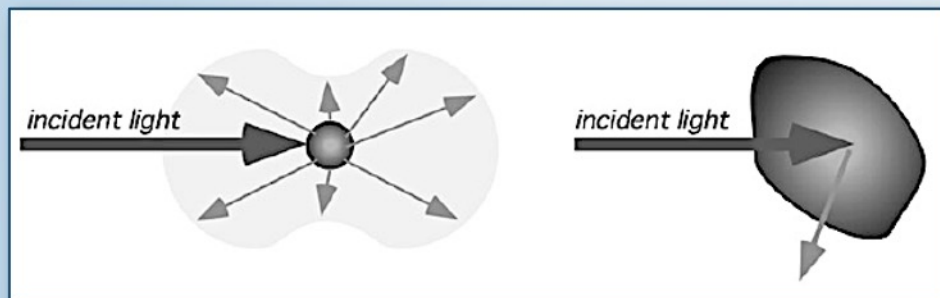
JONIZACIONI DETEKTORI



Jonizacioni detektori se koriste za detekciju dima koji sadrži veoma male submikronske čestice, kao one koje generiše veliki požar. Osnovni dio ovog tipa senzora je jonizaciona komora koja sadrži manje od miligrama radioaktivnog elementa Am^{241} (americium). Ovaj element je prirodni izvor alfa čestica. Jonizaciona komora podsjeća na kondenzator pločastog tipa, čija je jedna elektroda vezana za uzemljenje (ili negativan napon), dok je druga elektroda vezana za pozitivan napon od nekoliko volti, preko otpornika R na slici. Napon kreira električno polje između elektroda. Prostor između elektroda je ispunjen vazduhom koji se posmatra. Alfa čestice imaju kinetičku energiju reda 5 MeV, što je dovoljno da jonizuju molekule vazduha cijepajući ih na pozitivne jone i slobodne elektrone. Naelektrisane čestice se pod uticajem polja usmjeravaju, što rezultira malom konstantnom strujom. Kao rezultat, napon na ulazu pojačavača opada što ukazuje da nema dima u vazduhu. Kada dim dospije u jonizacionu komoru, čestice dima apsorbuju alfa zračenje, redukujući jonizaciju vazduha, pa je samim tim i generisana struja manja. Napon na ulazu pojačavača je veći, što ukazuje na prisustvo dima u jonizacionoj komori. Kako je *half-life* (vrijeme za koje radioaktivnost opadne na pola početne vrijednosti) Am^{241} -a oko pola milenijuma, to je svakako dovoljno za sve praktične primjene. Razlog zbog koga se koristi Am^{241} umjesto beta ili gama zračenja je veća sposobnost alfa zračenja da jonizuje i veoma mala sposobnost penetracije alfa čestica (brzina

čestica je mala, pa je jednostavno zaustaviti sudaranjem sa molekulima vazduha, ne prelaze rastojanja duža od par centimetara). Dakle, zračenje se apsorbuje u okviru kućišta detektora dima, što znači da nisu škodljivi po zdravlje ljudi.

RASIJANJE SVJETLOSTI (LIGHT SCATTERING)



U praznom prostoru, svjetlost se prostire pravolinijski. Međutim, ukoliko prostor nije potpuno prazan, ovo ne važi. Rasijanje je elektromagnetni fenomen gdje se svjetlost skreće sa svog pravolinijskog puta nailazeći na neuniformnosti u medijumu. Primjeri neuniformnosti su čestice dima, prašine, bakterije, kapljice vode, molekuli gasa. Kada je čestica veća od talasne dužine upadne svjetlosti i nađe joj se na putu, ponaša se kao reflektor, slika desno.

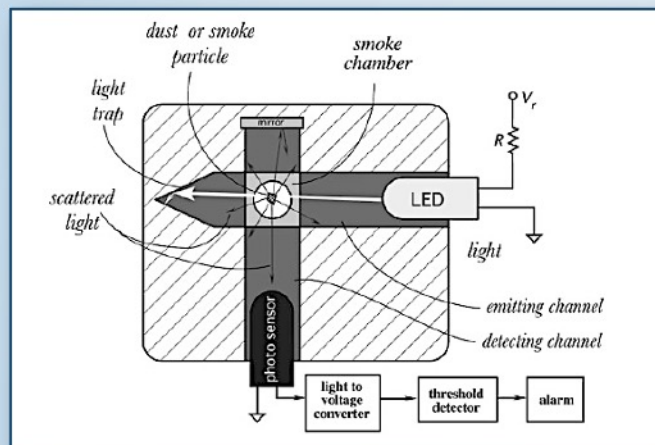
Manje čestice čije dimenzije su bar desetak puta manje od talasne dužine svjetlosti, apsorbiraju svjetlosnu energiju i reemituju svjetlost u svim pravcima, slika lijevo. Za veoma male čestice oblik nije toliko važan, i mogu se aproksimirati sferom ekvivalentne zapremine (*Rayleigh-ov model*).

Mehanizam rasijanja svjetlosti je odgovoran za plavu boju neba u toku dana kada je vedro, odnosno narandžasto-crvenu boju pri izlasku i zalasku sunca. U principu, dolazi do intenzivnijeg rasijanja svjetlosti manje talasne dužine (plave) prema posmatraču na Zemlji prilikom nailaska na molekule atmosfere. Prilikom izlaska i zalaska Sunca, ugao koji zaklapaju sunčevi zraci sa atmosferom je manji, odnosno, dolazi do intenzivnijeg rasijanja crvene svjetlosti (veće talasne dužine). Noću se Sunčevi zraci prostiru iznad atmosfere, nema rasijanja, i posmatrač na Zemlji registruje izostanak svjetlosti.

Dakle, senzor koji se bazira na efektu rasijanja svjetlosti, može da radi na principu mjerenja intenziteta svjetlosti ili mjerenja pozicije u spektru.

Rasijanje svjetlosti je fenomen koji se može koristiti za detektovanje malih stranih tijela u gasovima i tečnostima i za mjerenje koncentracije čestica u fluidima. Primjeri upotrebe su detektori dima i uređaji za monitoring čistoće vazduha koji detektuju prisustvo i koncentraciju prašine.

OPTIČKI DETEKTORI DIMA



Optički detektor sadrži izvor svjetlosti (infracrvenu LED, lasersku diodu) i detektor svjetlosti (fotodioda ili fototranzistor). Izvor svjetlosti i detektor su postavljeni u kućištu tako da nijedan foton koji emituje izvor ne dopije do detektora bilo direktno, bilo po refleksiji. Kućište takođe štiti fotosenzor od ambijentalne svjetlosti. Kako bi se ostvarili prethodno navedeni zahtjevi, izvor i detektor se nalaze u posebnim kanalima koji su postavljeni međusobno pod uglom od 90° , što je konstrukcijski najjednostavnije.

Unutrašnji zidovi kanala su od materijala koji veoma slabo reflektuje svjetlost. Pored toga, udaljeni kraj kanala u kome se nalazi izvor svetlosti je konusnog oblika kako bi se spriječila lažna refleksija svjetlosti prema fotosenzoru. Ovaj oblik se označava kao zamka za svjetlost. Prostor gdje se dva kanala ukrštaju se označava kao "dimna komora" koja je otvorena prema ambijentalnom vazduhu ili je povezana za izvor gasa koji se testira. "Dimna komora" ima dovod i odvod za vazduh koji se testira, ali je zaštićena od ambijentalne svjetlosti.

U prisustvu čistog vazduha u komori, svjetlosni snop od izvora ne može dospjeti do fotosenzora (u praznom prostoru, svjetlost ne može "da skrene iza čoška"), pa fotosenzor daje veoma malu struju tzv. *dark* struju. Kada se u komori nađe prašina ili dim, svjetlost se rasijava u svim pravcima, uključujući i pravac prema senzoru. Kanal za detekciju može sadržati ogledalo na suprotnom kraju kako bi se svjetlost usmjerila ka

fotodetektoru, koji će sada dati odgovarajuću struju. Male čestice koje su značajno brojnije dovode do približno konstantne fotostruje, dok će prisustvo krupnijih čestica rezultirati impulsnom fotostrujom.

Fotodetektor na svom izlazu daje napon koji je proporcionalan optičkoj snazi upadne svjetlosti. Izlaz fotodetektora se vodi na detektor praga koji je dalje vezan za alarm. Ukoliko je u pitanju detekcija impulsa, u slučaju krupnijih čestica, fotodetektor treba da ima dovoljno širok frekventni opseg.

Optički detektori dima su otporniji na lažne alarme od jonizacionih kada je u pitanju para ili isparenja prilikom pripreme hrane, ili para iz kupatila. Pogotovo su efikasni kada je u pitanju dim požara koji tinja.



LITERATURA

- Dragan Stanković, *Fizičko-tehnička mjerenja, Senzori*, Univerzitet u Beogradu, 1997. (poglavlje 7)
- Jacob Fraden, *Handbook of Modern Sensors Physics, Designs, and Applications*, 5th edition, Springer, 2016. (poglavlje 12)
- John G. Webster, Halit Eren, *Measurements, Instrumentation, and Sensors Handbook*, CRC Press, 2nd edition, 2014 (poglavlje VI)

LINKOVI

- https://www.youtube.com/watch?v=_pL7bGFF52s (princip)
- <https://www.youtube.com/watch?v=oUd4WxjoHKY> (na bazi mjerenja diferencijalnog pritiska)
- <https://www.youtube.com/watch?v=XlIViaNITlw> (Coriolis)
- <https://www.youtube.com/watch?v=YfQSf2NBGqc> (termalni protokometri)
- <https://www.youtube.com/watch?v=GmTmDMZjHzA> (vrtložni protokometri)
- <https://www.youtube.com/watch?v=Bx2RnrlkQg> (ultrazvučni protokometri)
- <https://www.youtube.com/watch?v=AbBDMQ7fHS4> (*Pitot*-ova cijev)
- https://www.youtube.com/watch?v=kdFGbUouE_4