

FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA

Departman: Energetika i procesna tehnika

Predmet: **MERENJE I REGULISANJE**

Poglavlje #10

MERENJE PROTOKA

deo 1

Predmetni nastavnik:

dr Miroslav Kljajić, Vanr. prof.

Prostorija 3, Blok F, SP
kljajicm@uns.ac.rs

Asistent:

Vladimir Munćan, MSc

Prostorija 9, Blok F, SP
vladimirmuncan@uns.ac.rs

Merenje protoka

- ▶ Merenje protoka fluida je izuzetno široko zastupljeno u industriji, nauci i svakodnevnom životu.
 - ▶ Meri se protok krvi, protok tečnog kiseonika u raketama, potrošnja vode u domaćinstvima, protok vodene pare, itd.
 - ▶ U nekim slučajevima se zahteva vrlo precizno merenje, dok se u drugim slučajevima dopušta i grubo merenje.
 - ▶ U mnogim industrijskim operacijama preciznost merenja protoka direktno utiče na profit. Jednostavni primeri su benziska pumpa i kućni vodomjer. Isto tako i mala greška merenja protoka u velikim gasovodima ili naftovodima može prouzrokovati ogromne novčane posledice.
- ▶ *Neophodan je optimalan izbor odgovarajuće merne opreme, što može da zavisi od niza faktora, kao što su: vrsta fluida, tačnost, cena opreme, potrebna pouzdanost, organizacija merenja, itd.*

Merenje protoka

- ▶ Za uspešno merenje protoka često je neophodno meriti i pritisak i temperaturu fluida čiji protok merimo.

Postoje i izvesne specifičnosti merenja protoka za neke fluide. Na primer, komercijalni merač protoka prirodnog gasa meri zapreminski protok pri standardnim uslovima (1.01325 bar i 15°C).

- ▶ Protok se može izraziti u masenim (kg/s ili kg/h) ili zapreminskim (m^3/s ili m^3/h) jedinicama.

Merenje protoka

Korektno merenje zahteva pažljiv **izbor tipa instrumenta**.

Koji će se instrument koristiti zavisi od niza faktora:

- Radnih uslova (pristup, organizacija, smetnje...),
 - Vrste fluida,
 - Mernog opsega,
 - Željene tačnosti
 - Troškova za mernu opremu i izvođenje merenja
 - ...
- Postojanje velikog broja instrumenata za merenje protoka čiji se rad zasniva na **različitim fizičkim principima**

Fizički principi koji se koriste za merenje protoka

- ▶ Pri strujanju fluida kroz suženje (prigušnice) nastaje pad pritiska koji zavisi od protoka. Pretvarači koji koriste ovaj princip mogu da se opišu na sledeći način:
 - Pri konstantnoj površini poprečnog preseka meri se pad pritiska
 - Pad pritiska se održava konstantnim, pomoću pokretnog klipa kojim se menja poprečni presek strujanja fluida. Meri se pomak klipa.
 - Presek suženja se menja u zavisnosti od protoka. Položaj pregrade je mera protoka.
- ▶ Pri strujanju fluida kroz zakrivljenu cev javljaju se centrifugalne sile, koje dovode do razlike pritisaka na različitim poluprečnicima zakrivljenosti.
- ▶ Kinetička energija fluida koji struji zavisi od brzine. Kočenjem fluidne struje pojaviće se merljivi pritisak.

Fizički principi koji se koriste za merenje protoka

- ▶ Frekvencija uređaja koji u nekom ritmu propušta određenu poznatu količinu fluida može biti mera protoka.
- ▶ Vreme prenosa nekog indikatora u fluidu koji se kreće biće proporcionalno protoku. Kao indikator može da se koristi boja, neke čestice koje su prepoznatljive itd. pa to može biti osnova za merenje protoka.
- ▶ Apsolutna brzina prostiranja zvučnih talasa kroz fluid koji se kreće je geometrijski zbir relativnih brzina prostiranja talasa i brzine fluida.
- ▶ Prostiranje ultrazvučnog talasa ili jonizacionog zraka koji se prenose kroz fluid, koji struji, menja se u zavisnosti od brzine strujanja.

Fizički principi koji se koriste za merenje protoka

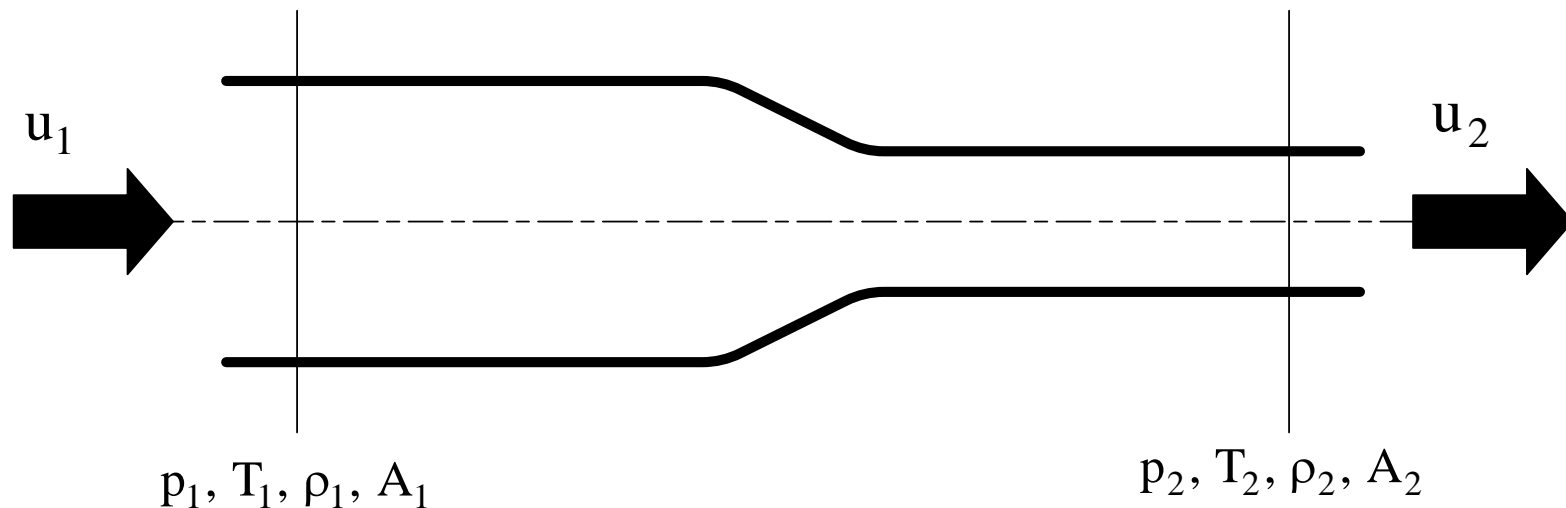
- ▶ Pri dovođenju dodatne energije fluidu koji se kreće, potrebna količina energije da bi se prouzrokovala određena pojava biće proporcionalna brzini strujanja fluida. *U masenim pretvaračima protoka, baziranim na ovom principu, pobuđuje se u fluidu koji struji oscilatorno kretanje i meri se za to potrebna energija.*
- ▶ Pri dovođenju konstantne količine toplote fluidu koji se kreće, porast temperature fluida je proporcionalan protoku fluida.
- ▶ Pri protoku elektroprovodnih fluida u magnetskom polju se indukuje elektromotorna sila u fluidu, koja je proporcionalna brzini strujanja.

Ova lista principa na kojima mogu da se baziraju uređaji za merenje protoka ili brzina fluida bi mogla još da se proširi, ali većina pobrojanih principa se svodi na primenu jednog od već poznatih pretvarača, a to je merenje razlike pritisaka, merenje pomaka ili broja obrtaja.

MERENJE PROTOKA PRIGUŠNICAMA

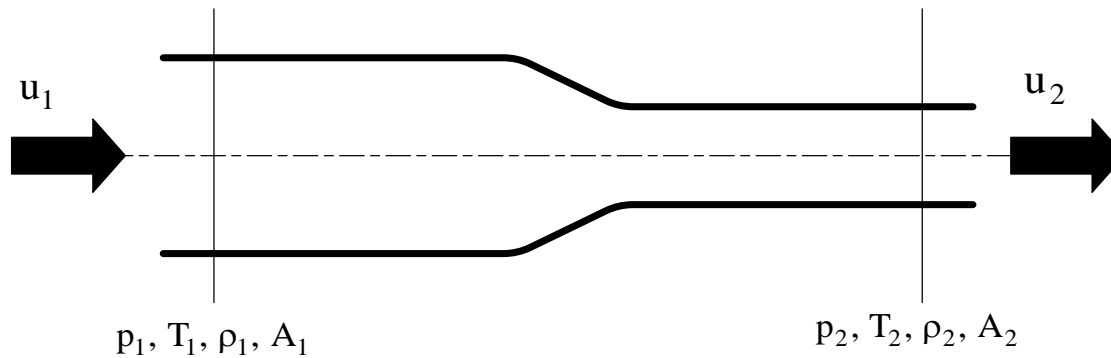
Nekoliko tipova protokomera koristi princip prigušivanja fluidne struje.

Pokazatelj protoka kod ovih mernih uređaja je **pad pritiska**, pa se ponekad ovi uređaji i zovu diferencijalni protokomeri.



Jednodimenzionalno strujanje u cevi

MERENJE PROTOKA PRIGUŠNICAMA



Jednačina kontinuiteta: $m = \rho_1 A_1 u_1 = \rho_2 A_2 u_2$

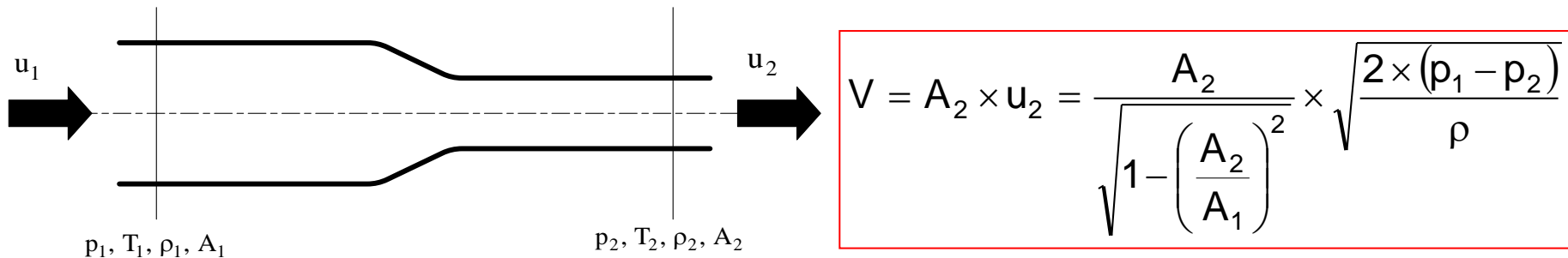
Bernulijeva jednačina: $\frac{p_1}{\rho_1} + \frac{u_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{u_2^2}{2}$

Pad pritiska (pri $\rho_1 = \rho_2$): $\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{u_2^2 \times \rho}{2} \times \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]$

► **Jednačina zapreminskog protoka:**

$$V = A_2 \times u_2 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2}} \times \sqrt{\frac{2 \times (p_1 - p_2)}{\rho}}$$

MERENJE PROTOKA PRIGUŠNICAMA



Odavde se može uočiti da se cevovod prikazan na slici može koristiti za određivanje protoka jednostavnim merenjem **pada pritiska Δp** , **poznavanjem geometrijskih karakteristika cevovoda i izračunavanjem po prikazanoj jednačini.**

Međutim, strujanje u cevovodu praćeno je sa **trenjem**, nekad malim a nekad i vrlo značajnim, te je potrebno obaviti korekciju izračunatog protoka, množeći ga sa koeficijentom kontrakcije mlaza C .

Tako se dobija da je: **$V_{\text{stvarno}} = C \cdot V_{\text{idealno}}$**

C – Korekcija usled promene geometrije profila brzina, izazvane lokalnim otporima. **Ovaj koef. zavisi od Rejnoldsovog broja i dimenzija cevovoda.**

MERENJE PROTOKA PRIGUŠNICAMA

Osnovne jednačine na osnovu kojih se izvode praktični izrazi za proračun zapreminskog i masenog protoka za sve primenjivane oblike prigušenja su:

$$V = C \cdot \frac{A_2}{\sqrt{1-\beta^2}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$

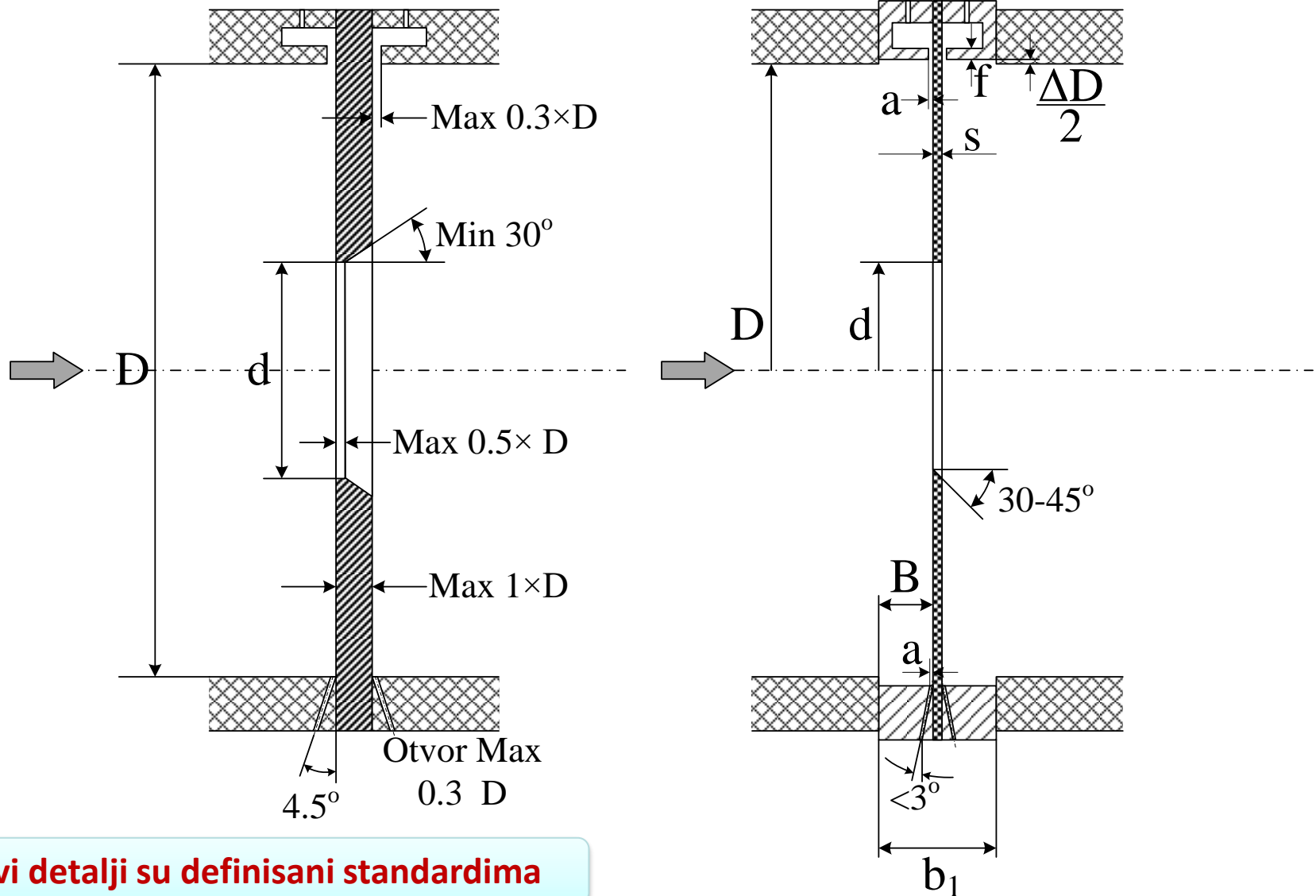
$$m = C \cdot \frac{A_2}{\sqrt{1-\beta^2}} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}$$

gde je:

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

odnos prečnika prigušnice
i unutrašnjeg prečnika cevovoda.

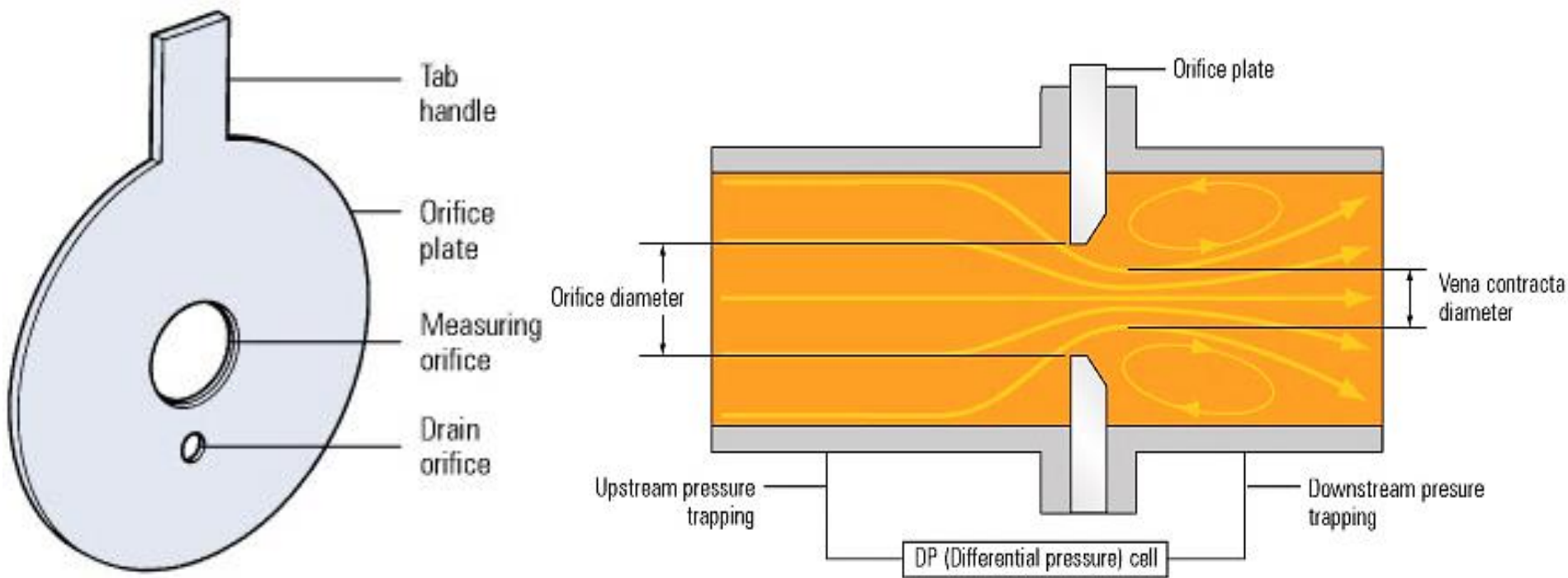
Primer konstruktivnih detalja dveju prigušnica



Svi detalji su definisani standardima

MERENJE PROTOKA PRIGUŠNICAMA

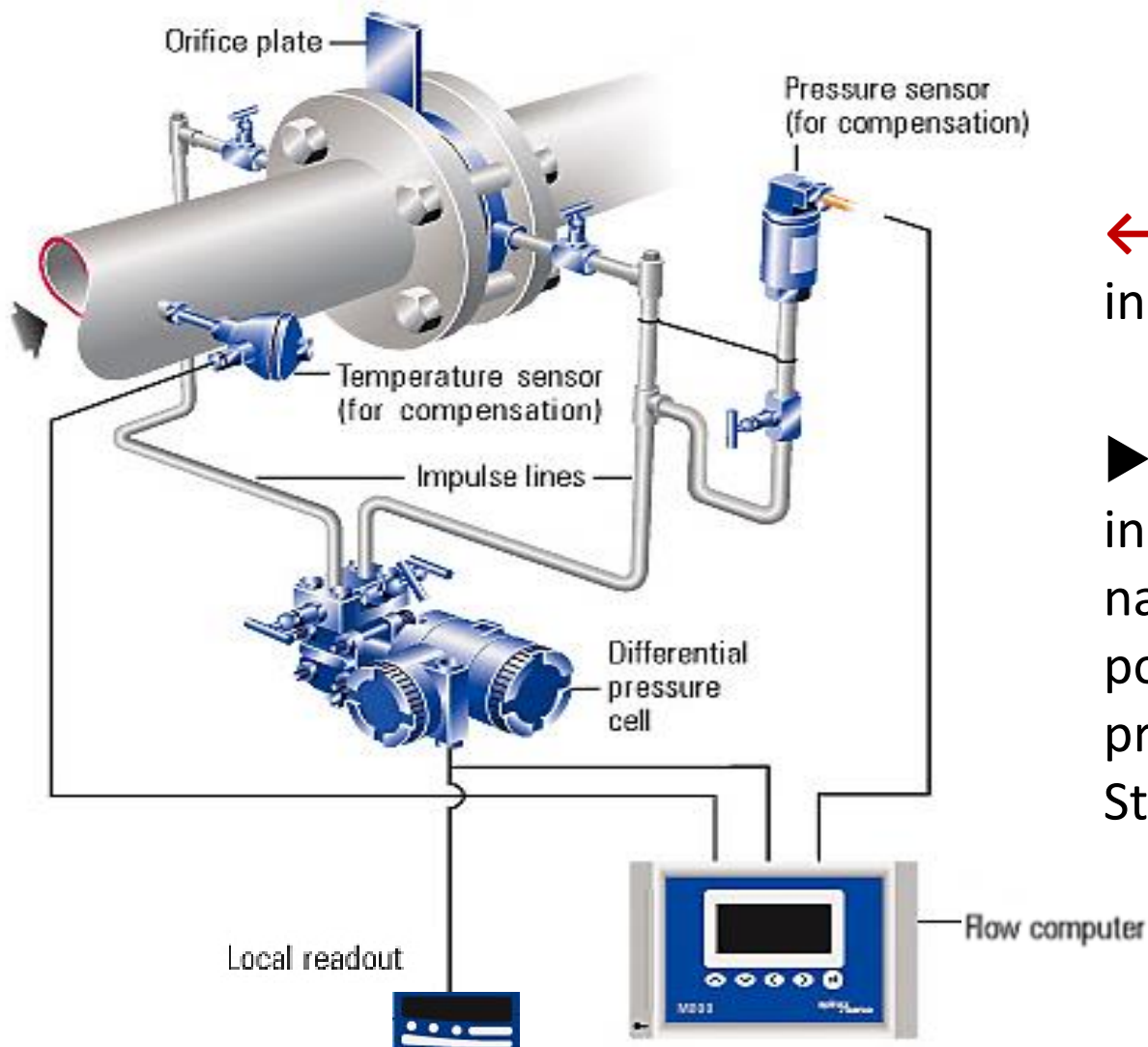
PRINCIP: Merenje protoka merenjem pada pritiska na mernoj blendi



Izgled prigušnice - elementa za prigušenje fluidne struje

Poremećaj toka fluidne struje usled postojanja prigušnice i stvaranje razlike pritiska

MERENJE PROTOKA PRIGUŠNICAMA



← Primer kompletne instalacije mernog mesta.

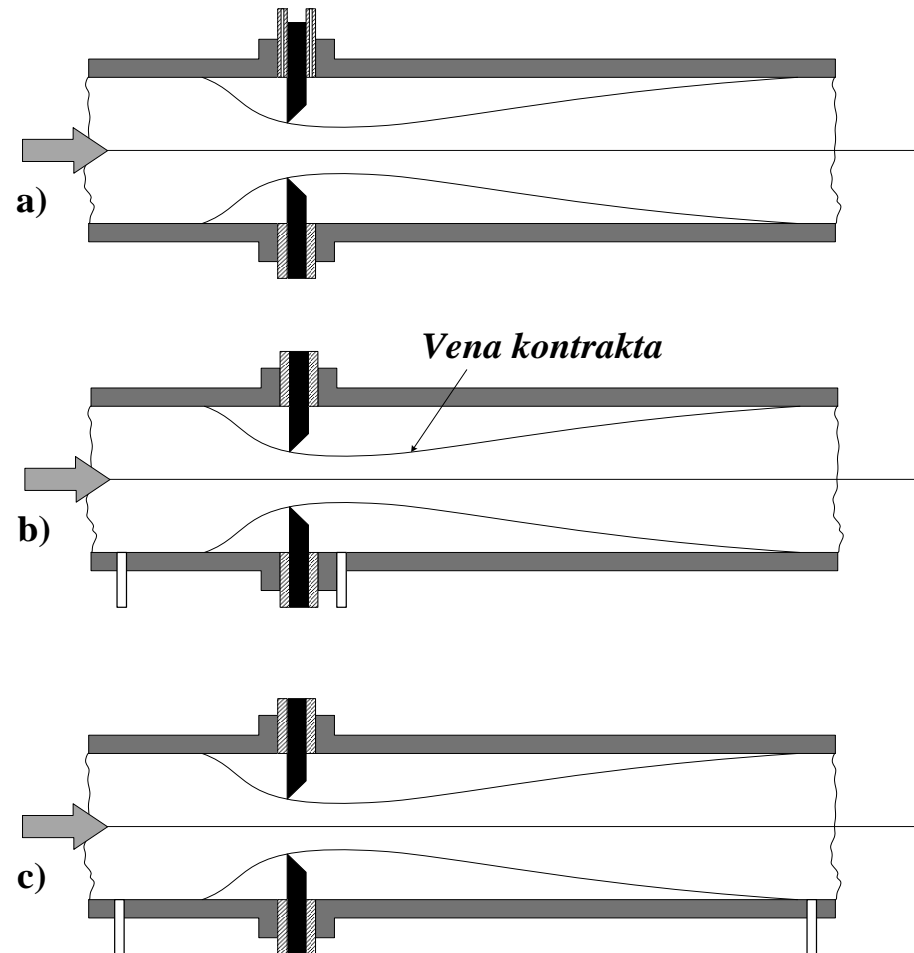
► Dimenzionisanje i instalacija značajno utiču na tačnost merenja i ovi postupci su iz tog razloga propisani međunarodnim Standardom ISO 5167.

MERENJE PROTOKA PRIGUŠNICAMA

Kada je reč o **realnim fluidima i realnim uslovima strujanja** pribegava se različitim načinima postavljanja priključaka za merenje pada pritiska: a) Izvodi na prirubnici, b) Vena kontrakta izvodi, c) Izvodi na cevi

Vrlo precizni proračuni zavisnosti padova pritiska i protoka za pojedine tipove prigušnica rade se prema **standardima** koji su bazirani na eksperimentalnim rezultatima.

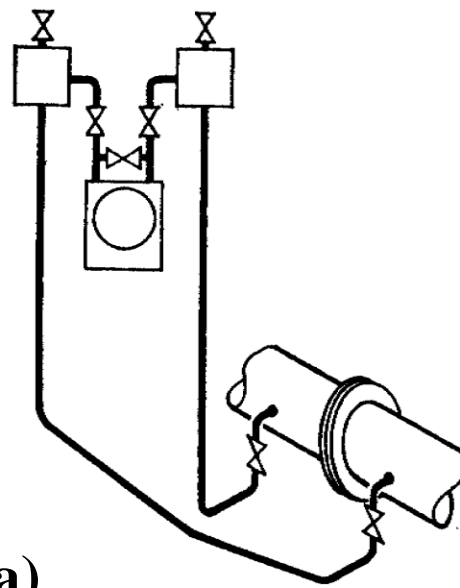
Standardima se preciziraju način izvođenja prigušnica (blendi) i načina i priključenja diferencijalnih manometara do detalja.



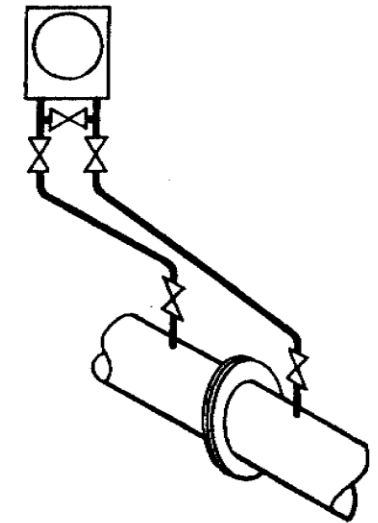
Načini ugradnje mernih prigušnica i pribora za merenje pada pritiska za različite fluide

Različiti načini priključenja diferencijalnog manometra:

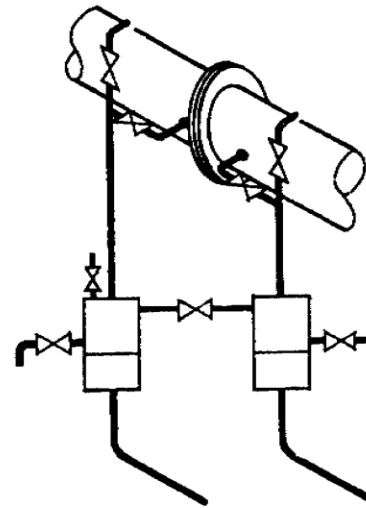
- a) Pri merenju protoka tečnosti,
- b) Pri merenju protoka gasova,
- c) Pri merenju protoka vodene pare,



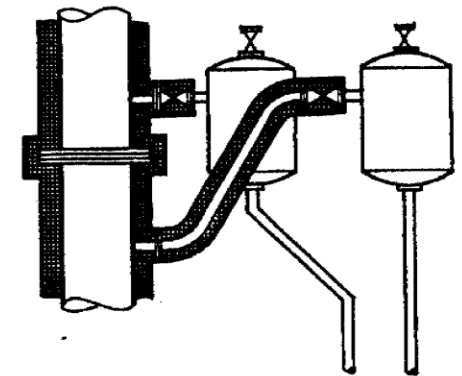
a)



b)



c)



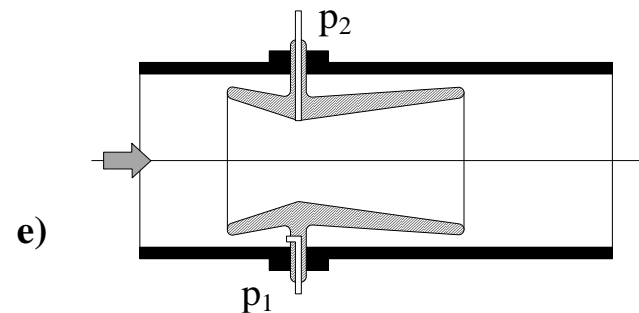
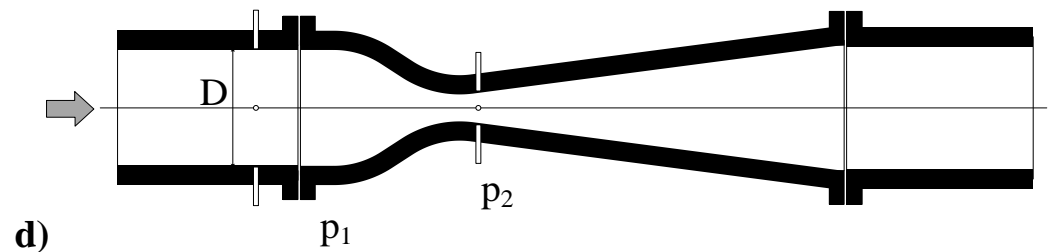
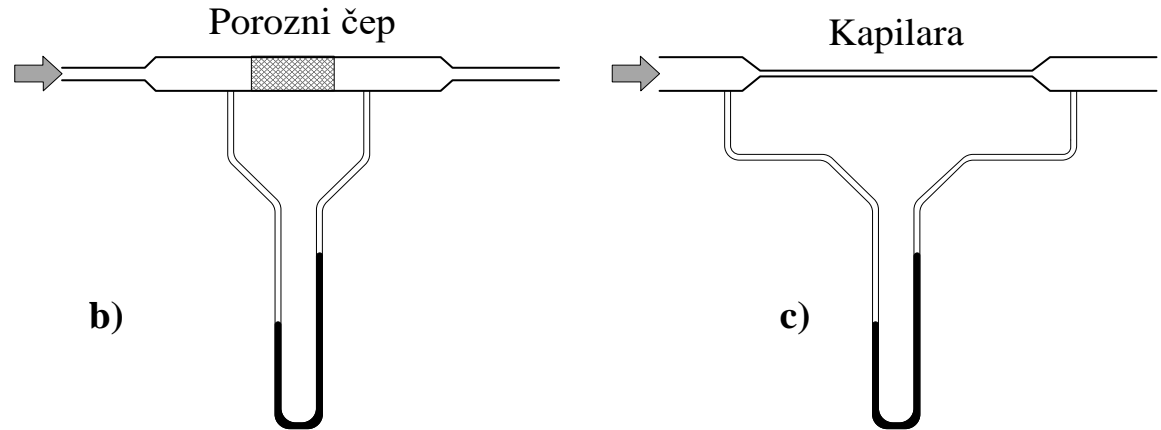
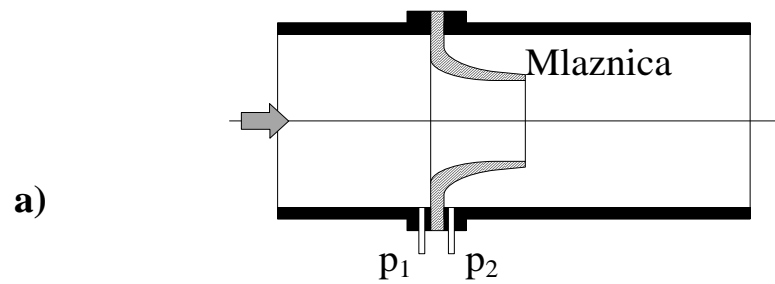
d)

d) Pri merenju protoka agresivnih tečnosti, tečnosti koje kristaliziraju i tečnosti koje su više temperature od $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (tečnosti koje ne treba da dođu u direktan kontakt sa diferencijalnim manometrom)

Različiti tipovi prigušenja:

- a) *Mlaznica,*
- b) *Porozni čep,*
- c) *Kapilarna cev,*
- d) *Venturijeva cev i*
- e) *Dalova cev*

Mlaznica i Venturijeva cev imaju manji trajni pad pritiska nego blenda, ali su i skuplje.

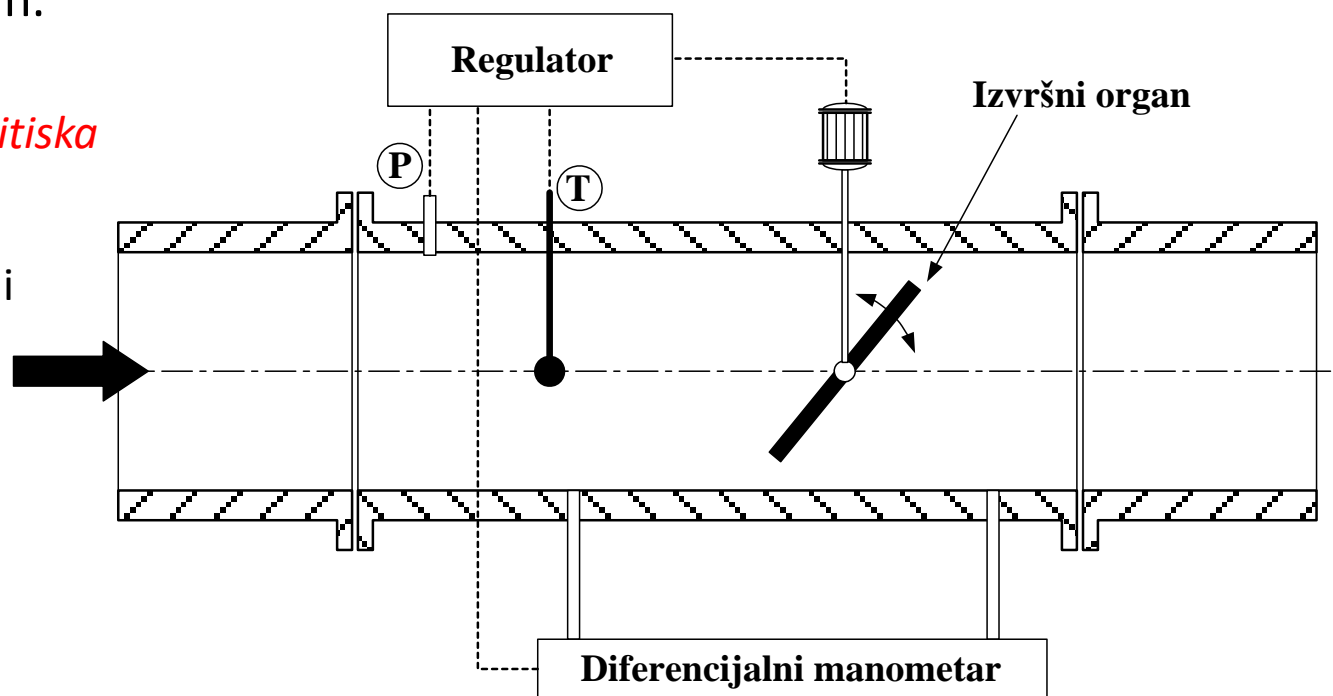


KONSTANTAN PAD PRITISKA I PROMENLJIVA POVRŠINA SUŽENJA KAO OSNOVA ZA MERENJE PROTOKA

Rad se bazira na neprekidnom usklađivanju poprečnog preseka strujanja fluida prema padu pritiska na tom prigušenju. Održavanje konstantnog pada pritiska na suženju postiže se regulacionim krugom, pri čemu pokretna pregrada u cevovodu služi kao izvršni organ.

Pretvarač protoka sa konstantnim padom pritiska

Korekcija protoka zbog promene temperature i pritiska fluida u regulatoru se obavlja automatski na osnovu stvarnih vrednosti temperature i pritiska.



PRICIP RADA: Prema zadatom padu pritiska pokreće se leptirasti sklop, održavajući pad pritiska konstantnim. **Položaj leptira je mera protoka koji se meri.**

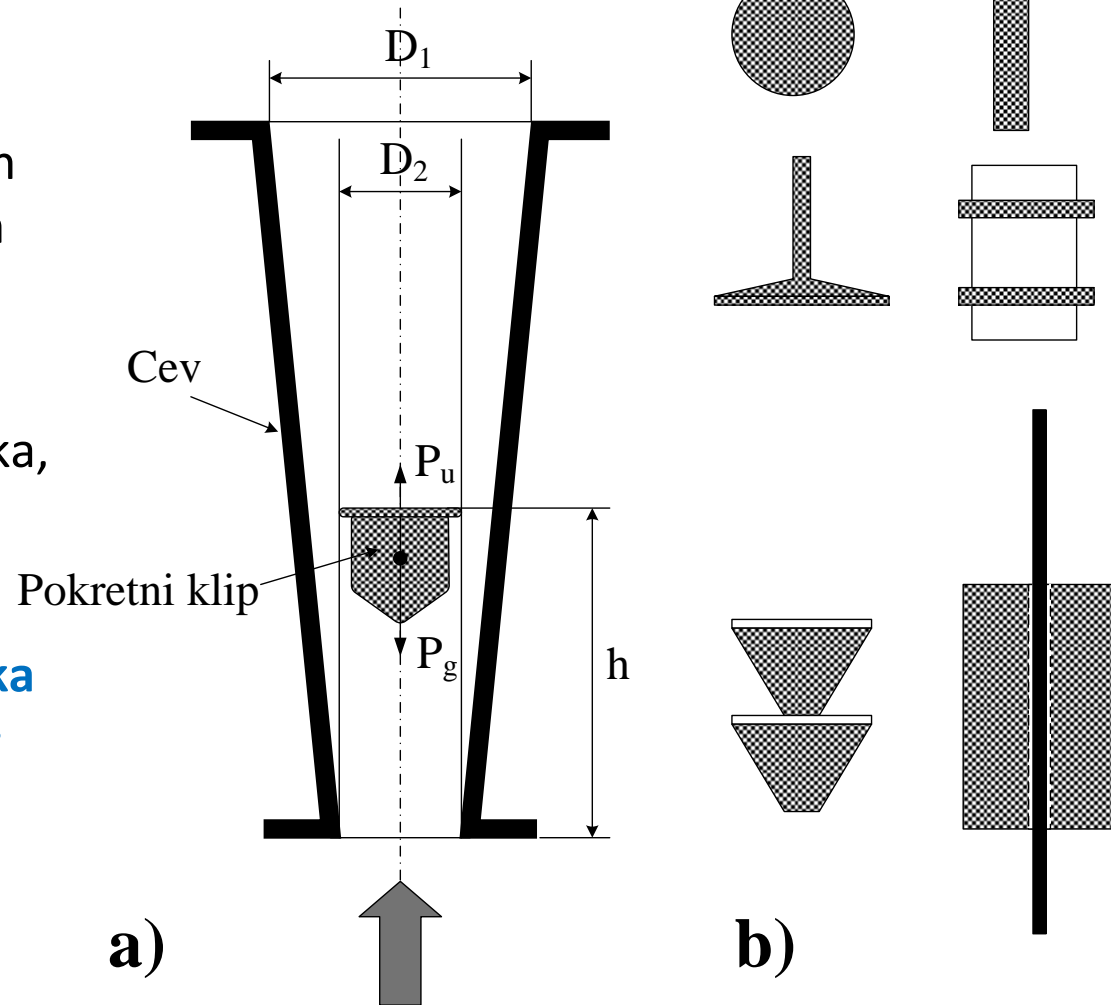
KONSTANTAN PAD PRITISKA I PROMENLJIVA POVRŠINA SUŽENJA KAO OSNOVA ZA MERENJE PROTOKA

PRINCIP RADA

Uređaj za merenje protoka (rotametar) održava konstantan pad pritiska, nastao na **čvrstom telu koje lebdi u fluidnoj struji**.

Cev u kojoj struji fluid je promenljivog poprečnog preseka, pa telo u zavisnosti od protoka menja položaj u njoj.

► **Položaj klipa je mera protoka koji se meri** (*protok može da se izrazi u funkciji od položaja plovka u konusnoj cevi*).



IZGLED ROTAMETRA I VARIJANTE IZVEDBE



KONSTANTAN PAD PRITISKA I PROMENLJIVA POVRŠINA SUŽENJA KAO OSNOVA ZA MERENJE PROTOKA

PRINCIP RADA

Fluid struji odozdo nagore u vertikalnoj koničnoj cevi mernog uređaja tako da na telo (klip, plovak itd.), pri konstantnom protoku deluju sile zemljine teže (P_g), sila potiska (P_u) i rezultatna sila razlike pritisaka ispod i iznad tela, tj:

$$g \cdot V_k \cdot (\rho_k - \rho_f) = A_k \cdot (p_1 - p_2)$$

gde je: V_k = zapremina klipa ili plovka

A_k = maksimalna površina poprečnog preseka klipa

ρ_k = gustina klipa ili plovka / ρ_f = gustina fluida

Protok možemo odrediti uvrštavajući gornju jednačinu u opštu jednačinu →

$$V = \frac{C \cdot (A_c - A_k)}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_c - A_k}{A_c}\right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot V_k \cdot g \cdot (\rho_k - \rho_f)}{A_k \cdot \rho_f}}$$

$$V = A_2 \cdot u_2 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho}}$$

U ovoj jednačini je A_c površina poprečnog preseka cevi na mestu maksimalnog poprečnog preseka klipa.

KONSTANTAN PAD PRITISKA I PROMENLJIVA POVRŠINA SUŽENJA KAO OSNOVA ZA MERENJE PROTOKA

Pošto je $\left(\frac{A_c - A_k}{A_c} \right)^2 \ll 1$

može da se napiše da je zapreminski protok fluida jednak:

$$V = K \cdot (A_c - A_k)$$

gde je **K**, za dati fluid i klip, konstanta.

► Pošto je poprečni presek konusne cevi uređaja u direktnoj zavisnosti od položaja klipa po visini cevi, to je očigledno da **protok može da se izrazi u funkciji od položaja plovka u konusnoj cevi**.

Zavisnost položaja klipa od protoka ukazuje na uticaj **gustine tečnosti** na protok, što znači da je rotametar potrebno etalonirati za svaki fluid čiji se protok meri.

► Obično se klip pravi od takvog materijala, čija je **gustina** nekoliko puta veća od gustine fluida koji se meri. Time se uticaj promene gustine fluida na grešku merenja smanjuje.

KONSTANTAN PAD PRITISKA I PROMENLJIVA POVRŠINA SUŽENJA KAO OSNOVA ZA MERENJE PROTOKA

OSTALE KARAKTERISTIKE:

Primena: Rotametri su naročito pogodni za merenje malih protoka, pa se upotrebljavaju za merenje protoka tečnosti manjih od $0,1 \text{ cm}^3/\text{min}$ i protoka gasova manjih od $1 \text{ cm}^3/\text{min}$.

Maksimalni pritisak za rotametre sa staklenom cevi je oko 50 bar, a za rotametre od čeličnih cevi do 350 bar.

Greška industrijskih rotametara je $\pm 1,5$ do $\pm 3\%$, a posebno etaloniranih laboratorijskih uređaja je oko $\pm 0,5\%$.

Merni opseg jednak je približno od petostruke do desetostruke vrednosti minimalno merljive vrednosti protoka.

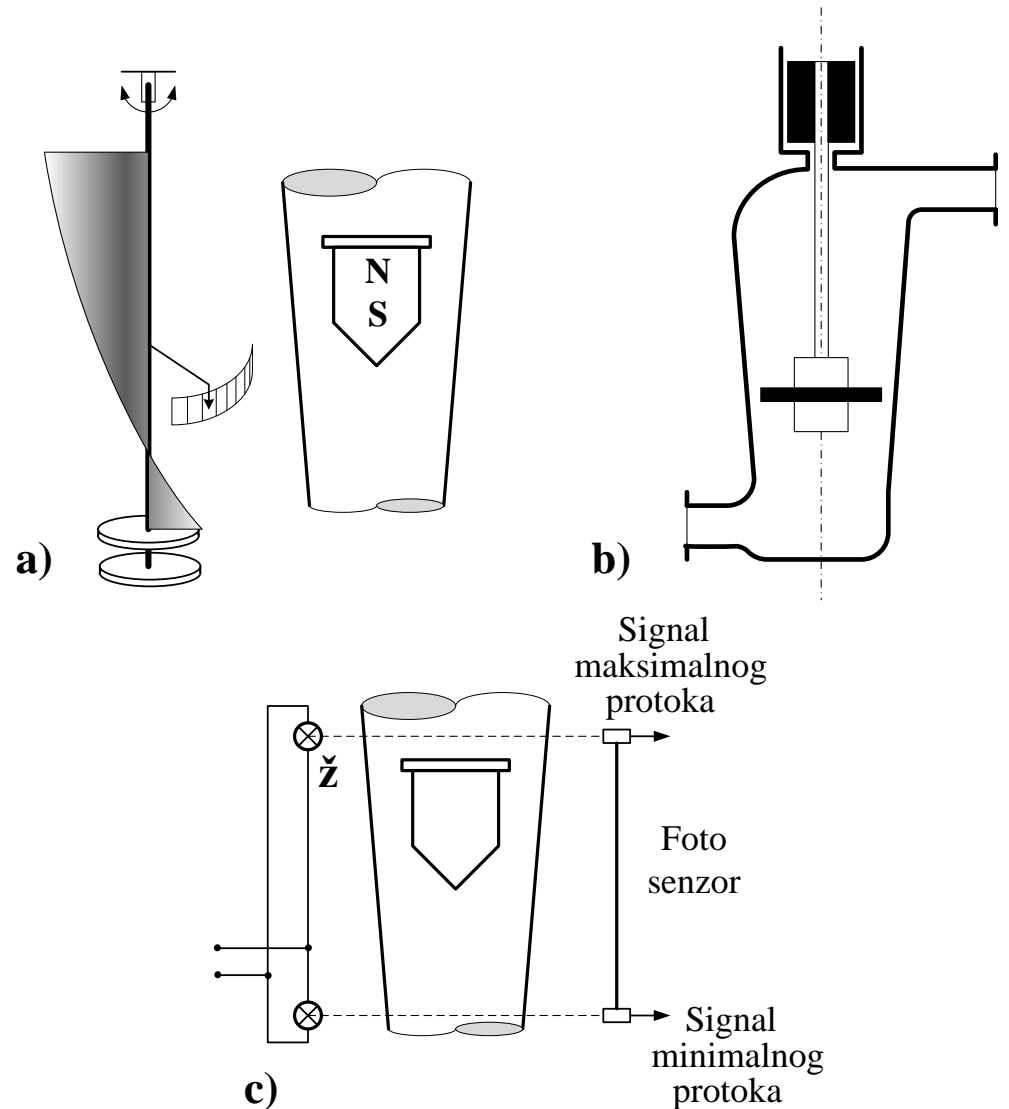
Odziv: Vreme potrebno da se klip pomeri iz jednog u drugi stabilan položaj je od 2 do 10 s.

KONSTANTAN PAD PRITISKA I PROMENLJIVA POVRŠINA SUŽENJA KAO OSNOVA ZA MERENJE PROTOKA

Primeri pretvaranja rotameterskog signala u električni signal

Osim direktnog očitavanja protoka na skali, moguće je mehanički signal pretvoriti u električni i tako obezbediti znatno kvalitetniji i pogodniji signal protoka.

Neke mogućnosti pretvaranja mehaničkog signala u električni, pri merenju protoka rotametrima



TURBINSKI UREĐAJI ZA MERENJE PROTOKA

Ukoliko se vijak sa lopaticama (turbina) smesti u cevovod kroz koji struji fluid, **brzina obrtanja turbine ω** zavisice od **zapreminskog protoka V** fluida.

Teorijski, ova zavisnost može da se prikaže sledećom relacijom:

$$\omega = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{(A_u + A_v) \cdot r} \cdot V$$

gde je:

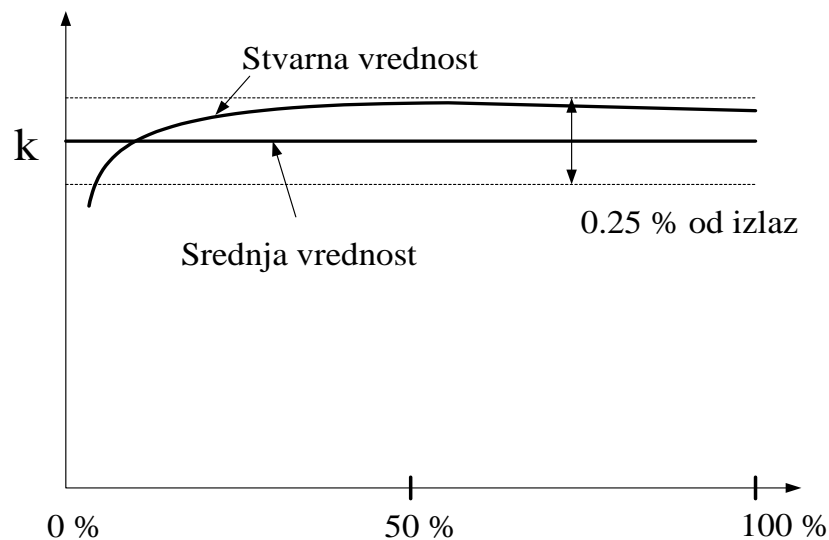
α = ugao lopatice u odnosu na smer strujanja fluida

r = srednji poluprečnik turbine

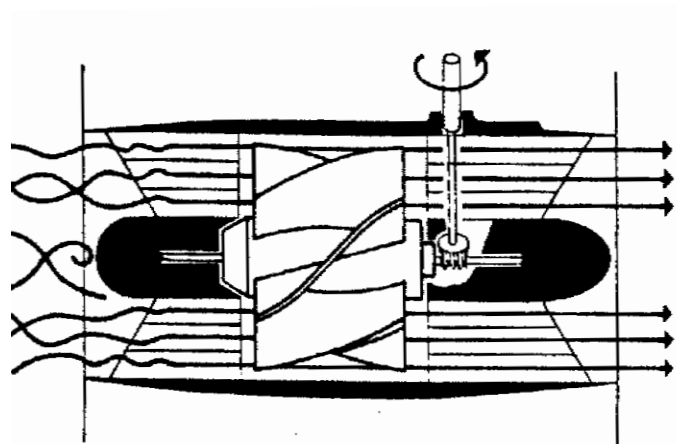
A_u = površina poprečnog preseka cevi / A_v = najveća površina popr. pr. turbine

Praktično, to je zavisnost tipa **$\omega = k \cdot V$** , pri čemu je **$k = \text{const.}$** koeficijent, koji obuhvata sve parametre koji utiču na zavisnost brzine obrtanja turbine od protoka.

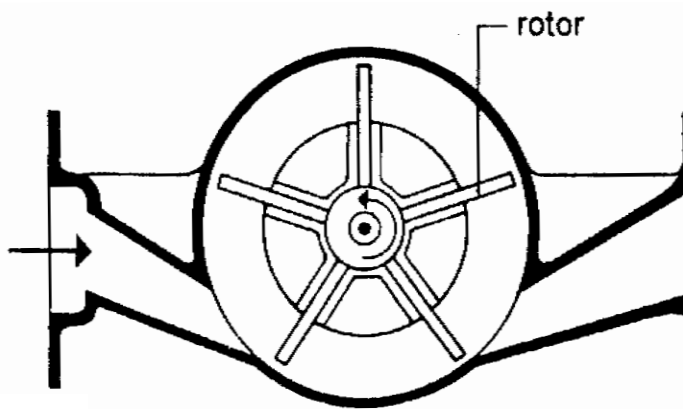
Koeficijent k se menja unutar mernog opsega. Samo pri vrlo malim protocima je uočljivo značajnije odstupanje stvarne vrednosti k .



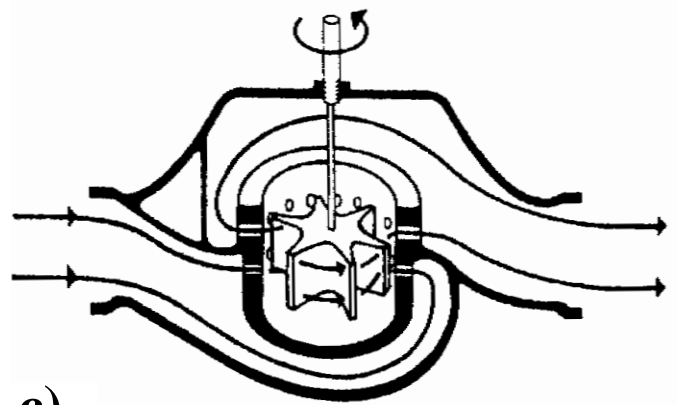
TURBINSKI UREĐAJI ZA MERENJE PROTOKA



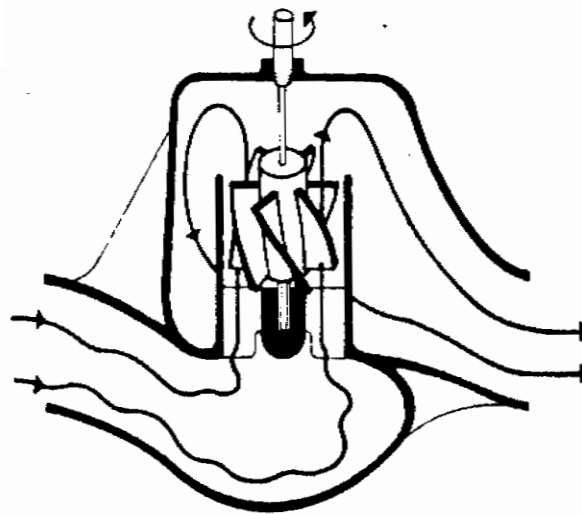
a)



b)



c)



d)



TURBINSKI UREĐAJI ZA MERENJE PROTOKA

GENERISANJE IZLAZNOG SIGNALA:

Turbina se smešta u cevovod od nemagnetskog materijala da bi brzina obrtanja mogla da se meri brojanjem prolaza lopatica pored induktivnog pretvarača.

Lopaticice (ili jedna lopatica) su od magnetskog materijala.

► Izlaz iz induktivnog pretvarača je napon, pri čemu je frekvencija promene napona proporcionalna brzini obrtanja turbine. Ovaj pretvarač se ugrađuje u zid cevovoda.

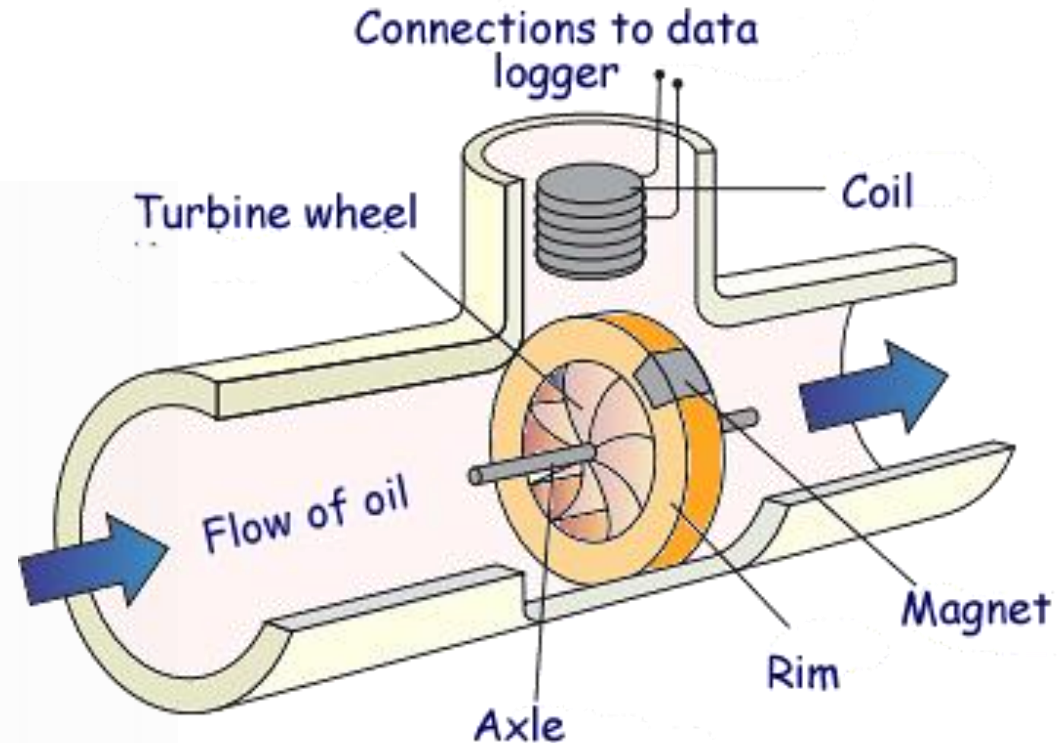
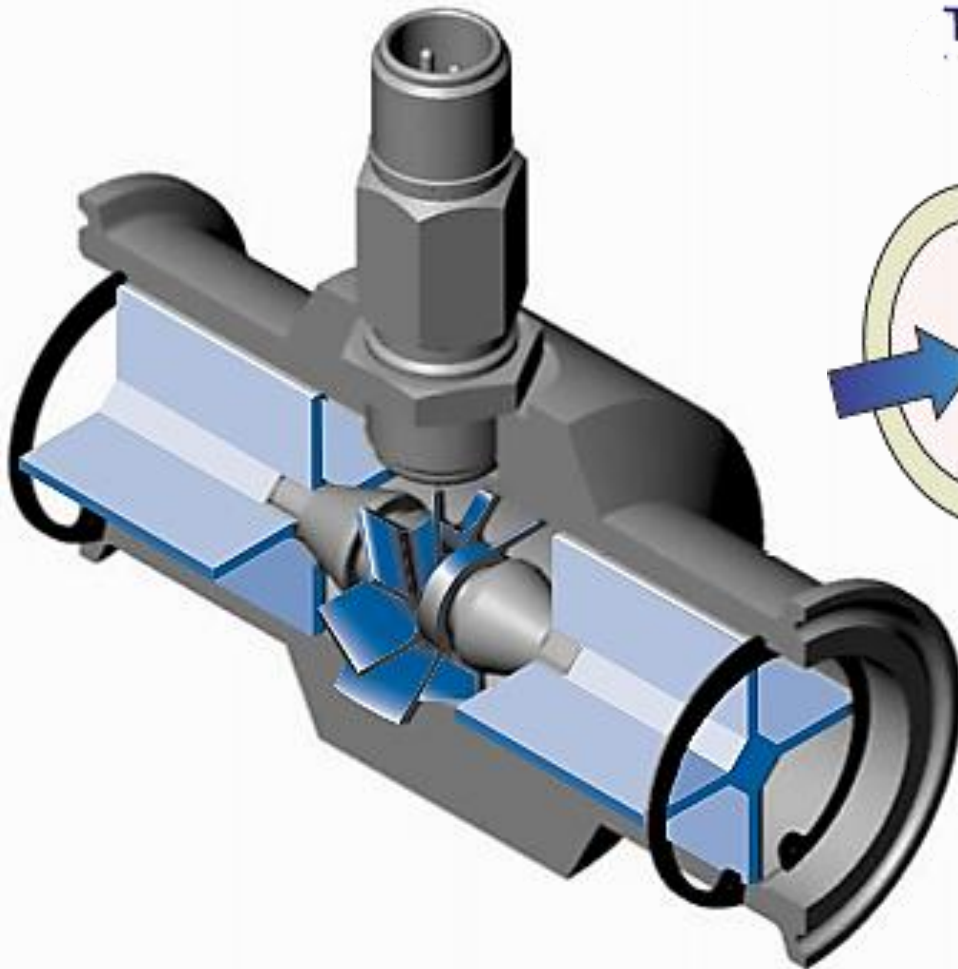
TAČNOST:

Trenje, vrtloženje i poremećaji u profilu brzine unose značajnu grešku merenja.

Ovu grešku je moguće smanjiti dobrom konstrukcijom mehanizma turbinskog merača i ugradnjom posebnog usmernika toka ispred turbine. Ovi usmernici se izrađuju u obliku snopa cevi ili u obliku posebno ugrađenih statičkih lopatica ispred turbine.

TURBINSKI UREĐAJI ZA MERENJE PROTOKA

Princip generisanja izlaznog signala



Elektromagnetna indukcija je proces stvaranja potencijalne razlike (ili napona) u provodniku koji se nalazi u promenljivom magnetskom polju.

TURBINSKI UREĐAJI ZA MERENJE PROTOKA

Spoljašnji izgled turbinskih protokomera



TURBINSKI UREĐAJI ZA MERENJE PROTOKA

OPSEG MERENJA:

Turbinski merači mogu da se koriste za merenje protoka od 0,01 l/min do 40.000 l/min.

Za merenja u naftovodima i gasovodima izrađuju se merni uređaji turbinskog tipa sa znatno širim dijapazonom merenja. Na primer, za gasovode je uobičajena primena merača protoka u opsegu od 600 do 250.000 l/min.

OSTALE KARAKTERISTIKE:

- ▶ Linearnost turbinskih merača protoka je oko $\pm 0,25\%$.
- ▶ Temperaturski opseg primene je od 250 do 550 °C.
- ▶ Pritisak fluida može biti do 35 bar
- ▶ Ograničenje jeste konstrukcija kućišta i zaptivanje. Primenjuju se u cevovodima prečnika od 10 mm do nekoliko stotina milimetara.