

Mjerenja u tehnici

II dio

prof.dr.sc. Frano Barbir
Katedra za termodinamiku, termotehniku i toplinske strojeve
soba 708
Tel. 305-889
E-mail: Frano.Barbir@fesb.hr
Konzultacije: Ponedjeljak 11-12 ili po dogovoru

Asistent: Ivan Tolj, dipl.ing., znanstveni novak

Mjerenja u tehnici

II dio

Sadržaj

Mjerenje temperature

Mjerenje tlaka

Mjerenje brzine strujanja fluida

Mjerenje protoka

Mjerenje vlažnosti

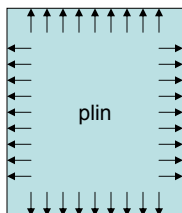
Mjerenje toplinske energije

i ostala toplinska mjerenja

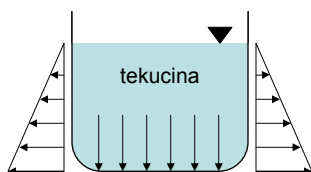
Definicija tlaka

Tlak je sila po jedinici površine.

Djeluje okomito na površinu koja predstavlja granicu nekog fluida.



Molekule plina su u konstantnom kretanju. One blizu granice se sudaraju s granicom. Prema Newtonovom 2. zakonu promjena momenta čestice uzrokuje silu u suprotnom smjeru. Suma svih sila rezultira u tlaku koji se osjeća na granici.



Kod tekućina, tlak je rezultat težine tekućine

$$P = F/A = Mg/A = V\rho g/A = \rho gh$$

Definicija tlaka

Tlak je sila po jedinici površine.

Jedinica mjere

$$\frac{\text{Sila}}{\text{Površina}} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \text{Pa (Pascal)} \quad \text{N} = \text{kg} \cdot \text{m/s}^2$$

Tlak zraka na površini mora pri standardnim atmosferskim uvjetima iznositi:

$$1,01320 \times 10^5 \text{ Pa} = 101,32 \text{ kPa}$$

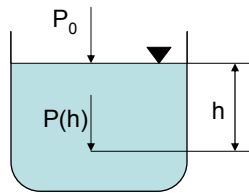
$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm}$$

$$1,0132 \text{ bar} = 1013,2 \text{ mbar}$$

Zadatak za domaći rad: Kolika je težina cjelokupne Zemljine atmosfere?

Hidrostatski tlak



$$P_{\text{aps}}(h) = P_0(h_0) + \rho gh$$

$$h = (P_{\text{aps}} - P_0) / (\rho g)$$

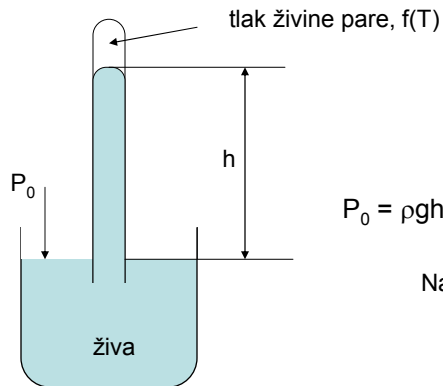
1 atm = 760 mm Hg (aps)
= 10.350 mm H₂O (abs)
= 10,35 M H₂O (abs)

Mjerenje tlaka

Referentni instrumenti

- Barometar
- Manometar
- McLeodov instrument
- Instrument s utegom

Barometar



$$P_0 = \rho gh$$

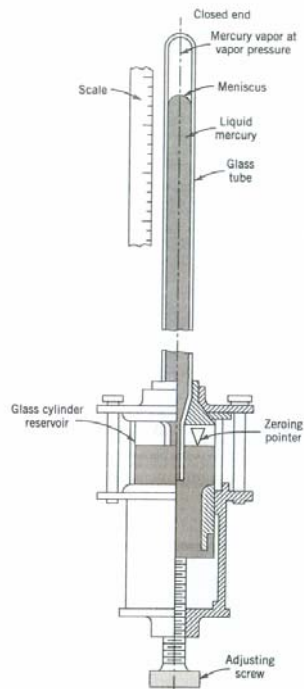
Na morskoj površini:

$$P_0 = 760 \text{ mm Hg}$$

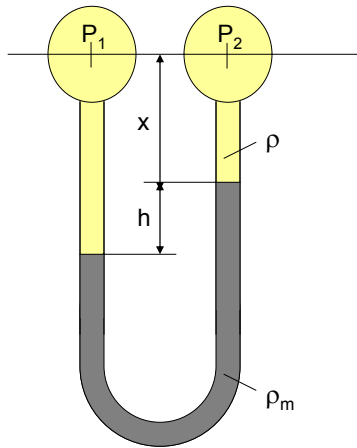
Korekcije za temperaturu i gravitaciju!

Koliki bi atmosferski tlak izmjerili na vrhu Mosora?

Barometar



Manometar



$$P_1 + \rho g(h + x) = P_2 + \rho g x + \rho_m g h$$

$$P_1 - P_2 = (\rho_m - \rho) g h$$

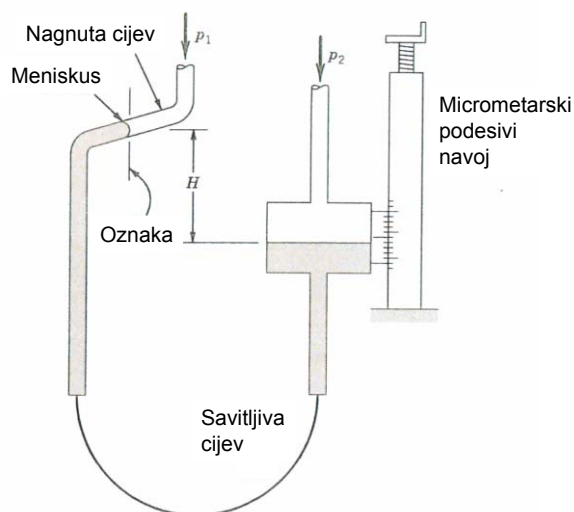
Osjetljivost manometra:

$$K = h / (P_1 - P_2) = 1 / [(\rho_m - \rho) g]$$

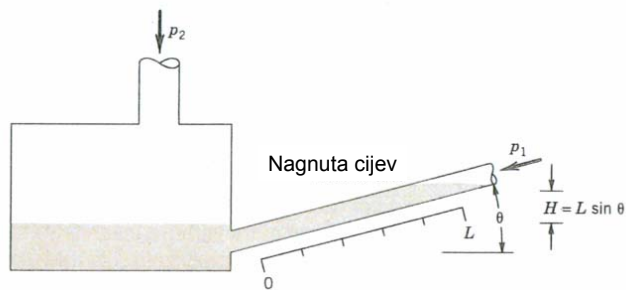
Maksimalna osjetljivost: $(\rho_m \rightarrow \rho)$

Radna tekućina mora biti odabrana tako da omogući mjerljivu ali ne i preveliku razliku razina.

Mikro-manometar



Manometar s nagnutom cijevi



$$L = H / \sin \theta$$

Osjetljivost povećana za $1/\sin \theta$

Tipične griješke u mjerenju s U manometrom

- Podešavanje
- Temperatura
- Gravitacija
- Kapilarna sila
- Meniskus

Gustoća žive kao funkcija temperature:

$$\rho = 13.595 / (1 + 0,00006 t) \quad t = \text{temperatura u } ^\circ\text{C}$$

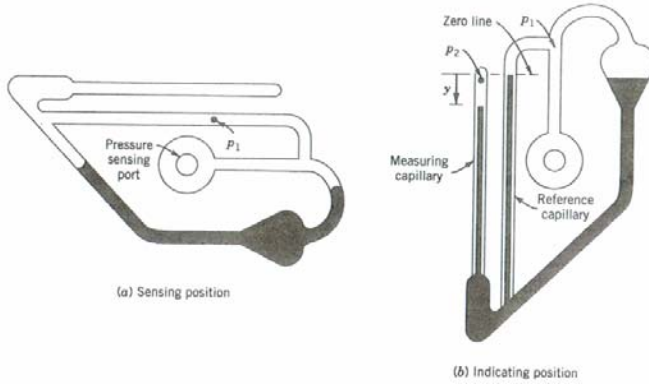
Korekcija za nadmorsku visinu i geografsku širinu

$$e_1 = - (2,637 \times 10^{-3} \cos 2\phi + 9,6 \times 10^{-8} z + 5 \times 10^{-5})$$

ϕ = geografska širina u $^\circ$

z = nadmorska visina u m

McLeodov instrument (vakum-metar)



$$P_2 = P_1 (V_1 / V_2)$$

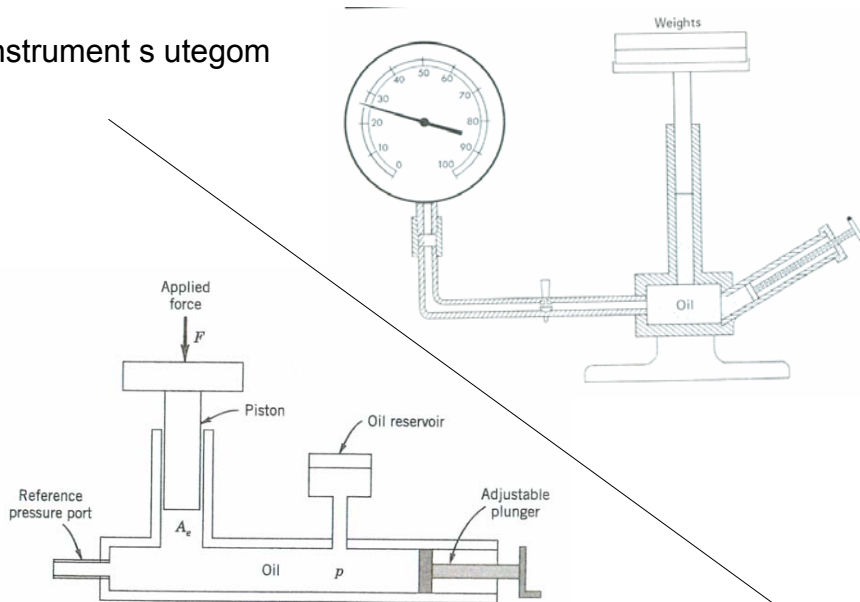
$$P_2 - P_1 = \rho g y$$

$$V_2 = A y$$

$$P_1 = \rho g A y^2 / (V_1 - A y)$$

Služi za mjerenje subatmosferskih tlakova (vakum)
Od 1 mm Hg do 0,1 μ m Hg

Instrument s utegom



Griješka 0,05 do 0,01%

Instrument s utegom

Moguće griješke u mjerenju:

- Uzgon zraka
- Lokalna gravitacija
- Masa klipa
- Trenje
- Termalna ekspanzija
- Deformacija klipa

$$P = F/A_e + \Sigma \text{ griješkaka}$$

$$P = P_i(1 + e_1 + e_2 + \dots)$$

Gravitacija: $e_1 = - (2,637 \times 10^{-3} \cos 2\phi + 9,6 \times 10^{-8} z + 5 \times 10^{-5})$

Uzgon: $e_2 = - (\rho_{\text{zrak}}/\rho_{\text{mase}})$

Primjer

Uređaj s utegom je izmjerio tlak od 608 kPa, na geografskoj širini 34° i na nadmorskoj visini od 256 m (Clemson, SC).

Gustoća zraka je 1,2 kg/m³; gustoća masa je 6530 kg/m³.

Koji je točan tlak?

$$e_1 = - (2,637 \times 10^{-3} \cos 2\phi + 9,6 \times 10^{-8} z + 5 \times 10^{-5})$$

$$\phi = 34^\circ ; z = 256 \text{ m}$$

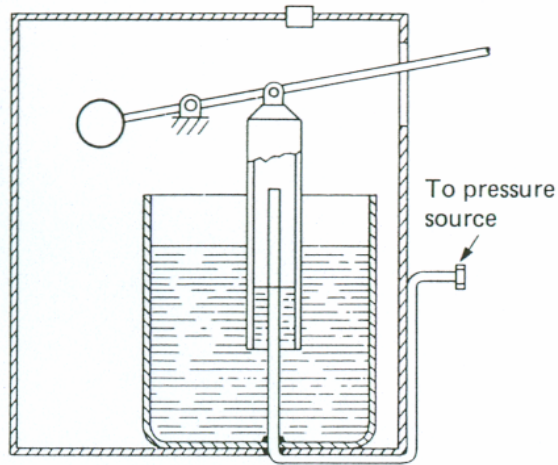
$$e_1 = - 0,001064$$

$$e_2 = - (\rho_{\text{zrak}}/\rho_{\text{mase}})$$

$$e_2 = - 0,000184$$

$$P = 608 (1 - 0,001064 - 0,000184) = 607,24 \text{ kPa}$$

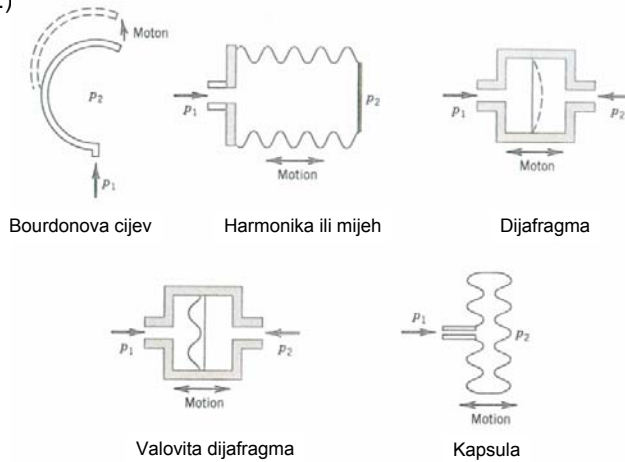
Uredjaj s izvrnutim zvonom



Transduceri ili pretvarači tlaka

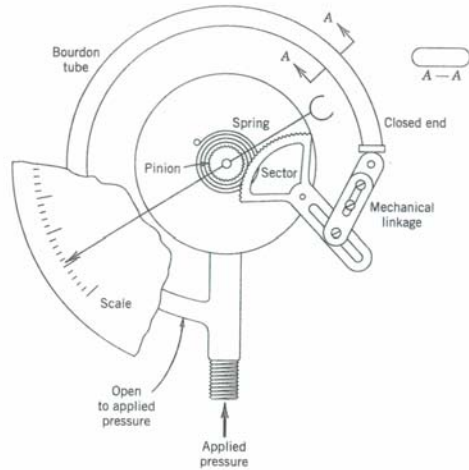
Pretvaraju izmjereni tlak u mehanički ili električni signal.

Obično sadrži elastični element i sekundarni element koji pretvara deformaciju elastičnog elementa u mjerljivu veličinu (zakret kazaljke, električni napon, ...)



Bourdonova cijev

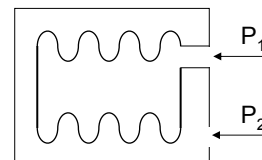
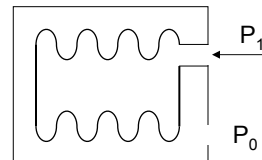
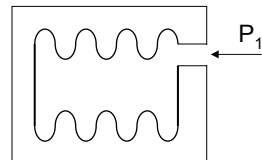
Bourdonova cijev je zakrivljena metalna cijev eliptičnog presjeka koja se deformira uslijed djelovanja tlaka iznutra.



Raspon $10^4 - 10^9$ Pa
Griješka: 0,5-2,0% (tipično);
0,1% najbolji instrumenti

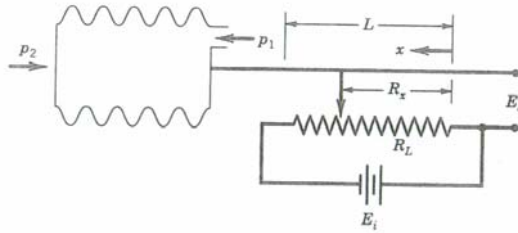
Mijeh ili harmonika ili kapsula

Mjerenje: apsolutnog tlaka
 pretlaka
 razlike tlakova

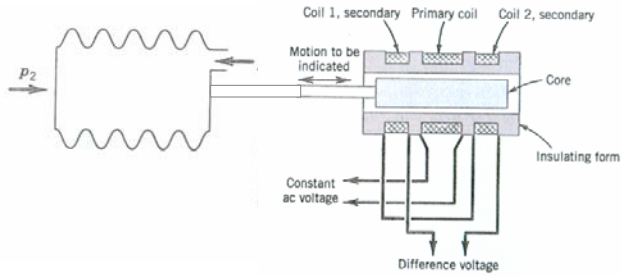


Mijeh ili harmonika ili kapsula

s kliznim
potencijometrom



s LVDT
(Linearni Variabilni
Diferencijalni
Transformator)



Primjer

Potencijometrijski mijeh s rasponom mjerenja 0-700 kPa

Klizni potencijometar s otporom od $50 \Omega - 10 \text{ k}\Omega \pm 10\%$

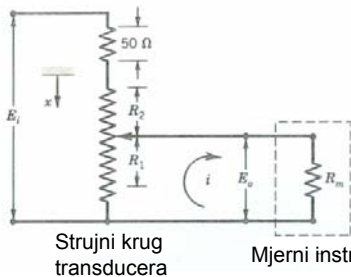
Linearnost kalibriranja: $< 0,5\%$

Ponovljivost: $\pm 0,1\%$

Napon: 5-10 V DC

Mjerni instrument (voltmetar) ima impedanciju od $100 \text{ k}\Omega$

Zadatak: Izračunati nesigurnost u mjerenju tlaka od 350 kPa



Strujni krug
transducera

Mjerni instrument

Pri $P = 0$

$R = 50 \Omega$

$E_o = 5 \text{ V}$

Pri $P = 700 \text{ kPa}$

$R = 10 \text{ k}\Omega$

$E_o = 2,5125 \text{ V}$

Onda

Pri $P = 350$

$R = 5025 \Omega$

$E_o = 0,0250 \text{ V}$

Osjetljivost instrumenta $K = E_o(700) - E_o(0) / (700 - 0 \text{ kPa}) = 7,11 \mu\text{V/Pa}$

Na pouzdanost mjerenja će utjecati griješke:

e_L = linearnost

e_p = ponovljivost

e_i = opterećenja

$$e_L = 5 \text{ V} \times 0.5\% = 0,0250 \text{ V}$$

$$e_p = 5 \text{ V} \times 0.1\% = 0,0050 \text{ V}$$

$$e_i = E_o(350)_{R_m=\infty} - E_o(350)_{R_m}$$

$$E_o(350) = E_i R_m / [R_1(R_2+50) + (R_2+50) + R_m]$$

$$E_i = 5 \text{ V}$$

$$R_m = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = 5025 \text{ }\Omega$$

$$R_2 = 4975 \text{ }\Omega$$

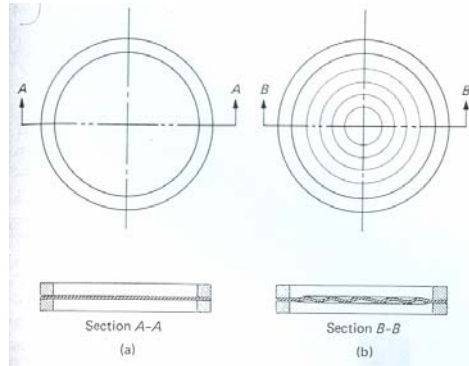
$$E_o(350) = 2,4387 \text{ V}$$

$$e_i = 2,5125 - 2,4387 = 0,0738 \text{ V}$$

$$u_c = \left\{ \sum_{i=1}^3 e_i^2 \right\}^{1/2} = (0,025^2 + 0,005^2 + 0,0738^2)^{1/2} = 0,0780 \text{ V}$$

$$u_c = 0,0780 \text{ V} / 7,11 \text{ }\mu\text{V/Pa} = \underline{\underline{10,98 \text{ kPa}}}$$

Dijafragme



Veličina deformacije je proporcionalna razlici tlakova

Ravne membrane ili valovite

Izbor materijala ovisi o tlaku i fluidu

Koriste se i za statički i dinamički tlak

Različiti sekundarni elementi se koriste za očitavanje tlaka:

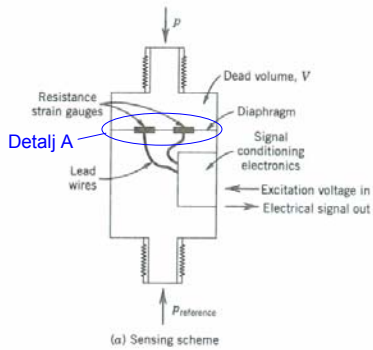
-Mjerenje naprezanja

-Kapacitet

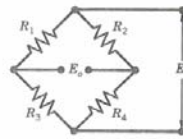
-Induktivni

-Piezoelektrični efekt

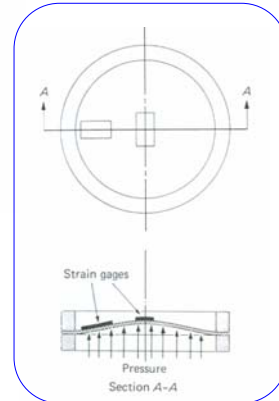
Mjerenje naprezanja



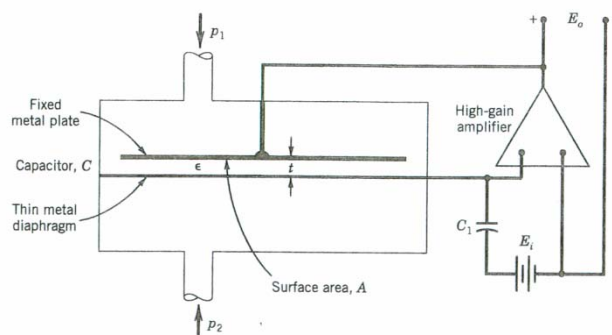
Detalj B



Detalj A



Kapacitet



$$C = c\epsilon A / t$$

$$E_0 = E_i (C/C_1)$$

C = kapacitet

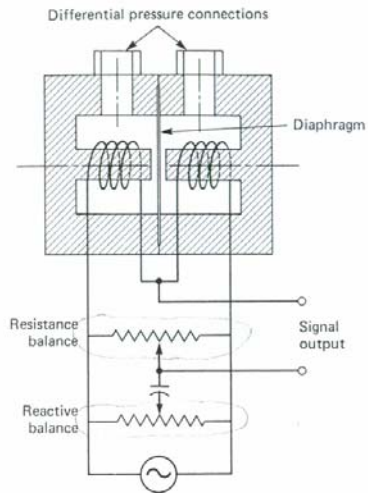
c = konstanta proporcionalnosti (0,0885)

ϵ = dielektrična konstanta (za zrak $\epsilon = 1$)

A = površina (cm²)

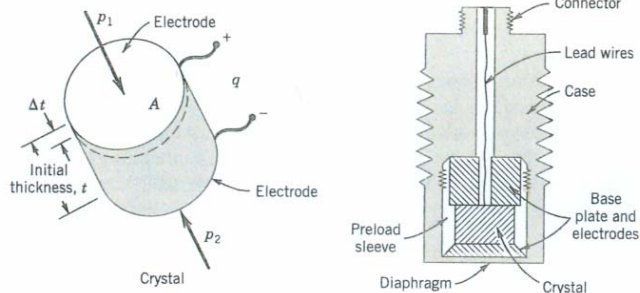
t = razmak (cm)

Induktivni osjetnik (transducer)



Piezoelektrični kristal

Uslijed deformacije kristala stvara se na njegovoj površini električni naboj



$$q = K_q P A$$



$$E_o = q/C$$



$$E_o = K_q P t / c \epsilon = K_e P t$$

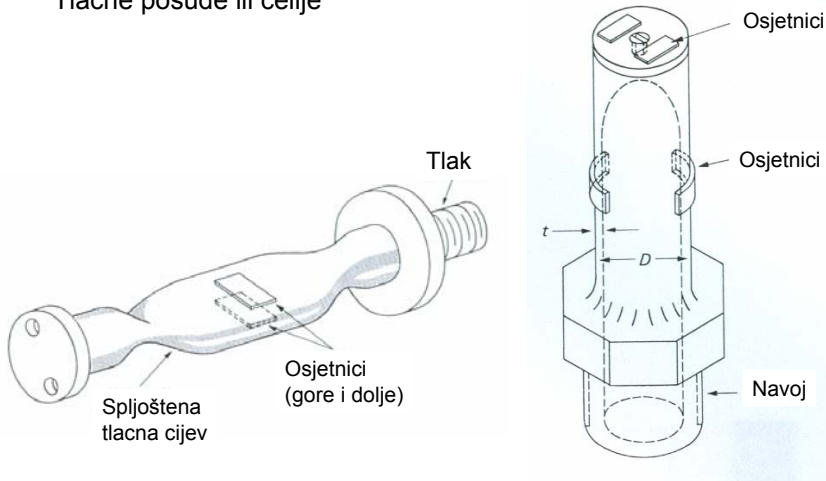
$$C = c \epsilon A / t$$

q = el. naboj
 K_q = osjetljivost kristala
 P = tlak
 A = površina

E = napon
 C = kapacitet

K_e = naponska osjetljivost osjetnika

Tlačne posude ili ćelije

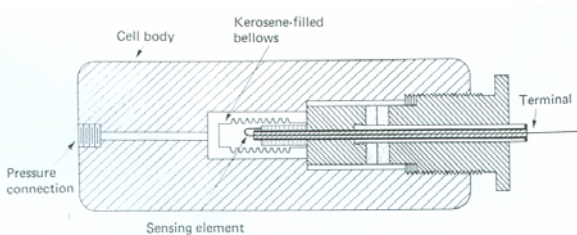


Mjerenje visokih tlakova

>700 atm pa do 10^7 atm

- Bourdonove cijevi – 3500 atm pa čak i do 7000 atm (okruglog presjeka, debljih stijenki, vrlo krute, nekoliko namotaja)
- Tlačne posude ili ćelije (do 3500-7000 atm)

Mjerači tlaka putem električnog otpora



$$R = \rho L/A$$

$$dR/R = dL/L - 2d/D + d\rho/\rho$$

R = otpor

L = dužina

D = promjer

ρ = specifični otpor, otpornost

$$(dR/R)/P = 2/E + (d\rho/\rho)/P$$

Podesni materijali: manganin i legura zlata (s 2,1% Cr)

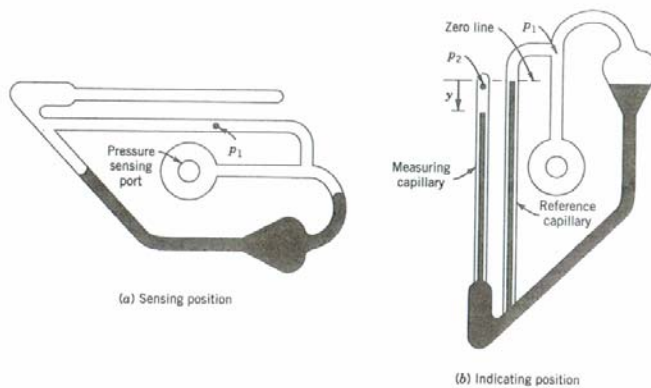
Mjerenje niskih tlakova

<1 mm Hg

Ultra niski tlakovi <1 nm Hg

- Bourdonove cijevi – do 1 mm Hg
- McLeodov Instrument
- Instrument temeljen na toplinskoj vodljivosti
- Ionizirajuće komore

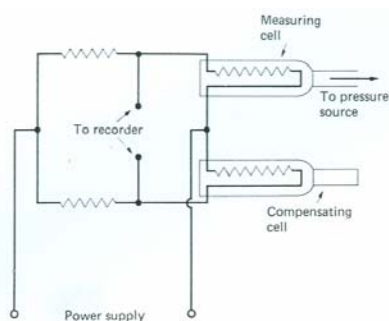
McLeodov instrument (vakum-metar)



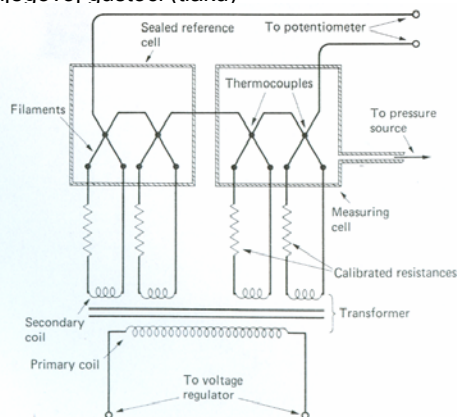
Služi za mjerenje subatmosferskih tlakova (vakum)
Od 1 mm Hg do 0,1 μ m Hg

Instrument temeljen na toplinskoj vodljivosti

Protok el. struje kroz žicu stvara toplinu
Temperatura žice ovisi o struji, specifičnom otporu i odvođenju topline
Odvođenje topline ovisi o toplinskoj vodljivosti okolnog medija
Toplinska vodljivost medija ovisi o njegovoj gustoći (tlaku)



Pirani mjerac toplinske vodljivosti



Mjerač toplinske vodljivosti termoparovima

Instrument temeljen na ionizirajućim komorama

Za mjerenje ekstremno niskih tlakova (10^{-9} mm Hg)

Ionizirajuća komora je slična elektronskoj cijevi – triodi
Ima žareću nit, pozitivnu mrežicu i negativnu pločicu
Mrežica privlači elektrone iz žarne niti
Sudarom elektrona i molekula plina molekule se ioniziraju
Negativna pločica privlači pozitivne molekule što rezultira vanjskom strujom koja se onda može izmjeriti
Struja je funkcija količine molekula – dakle tlaka

Problemi:

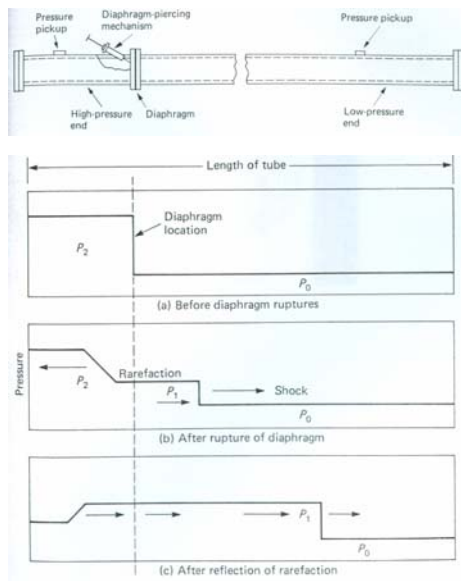
- Tlakovi iznad $1-2 \mu\text{m}$ uzrokuju brzo propadanje žare niti
- Gustoća elektrona je funkcija temperature žarne niti što zahtijeva vrlo preciznu kontrolu struje kroz nju

Baždarenje pretvarača tlaka (transducera)

Statičko baždarenje – koristi se referentni instrument
(U manometar, tester s utegom za veće tlakove)

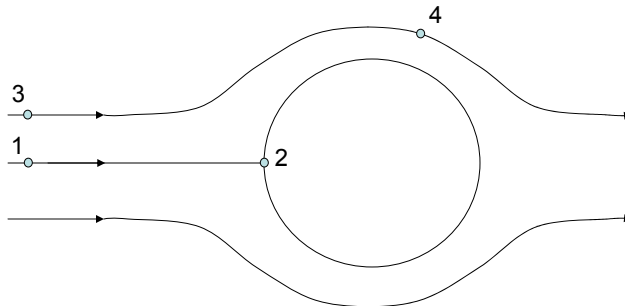
Dinamičko baždarenje: šok valovi

Dinamičko baždarenje: šok valovi



$$\frac{P_1}{P_0} = 1 + \frac{2k}{k+1} (M_0^2 - 1),$$

Mjerenje tlaka u pokretnom fluidu (koji teče)



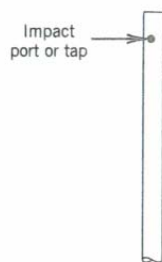
Bernoullijeve jednačbe između točaka 1 i 2 te između 3 i 4

$$P_1 + \rho U_1^2/2 = P_2 + \rho U_2^2/2 \quad U_2 = 0 \quad P_1 + \rho U_1^2/2 = P_2 = P_{\text{total}} \quad P_1 < P_2$$

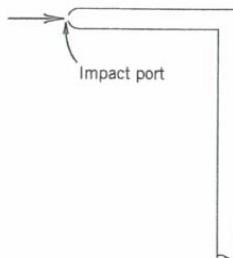
$$P_3 + \rho U_3^2/2 = P_4 + \rho U_4^2/2 \quad U_3 < U_4 \quad P_3 > P_4$$

$$U_1 = U_3 \quad P_1 = P_3$$

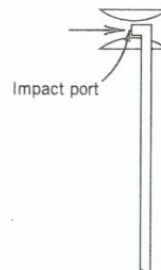
Mjerenje totalnog tlaka



(a) Impact cylinder



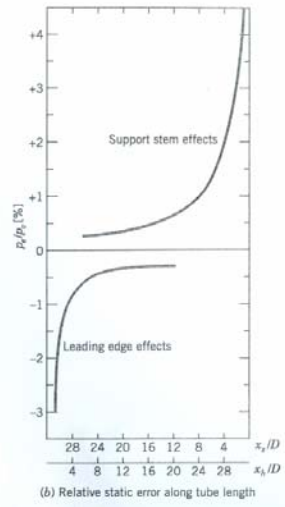
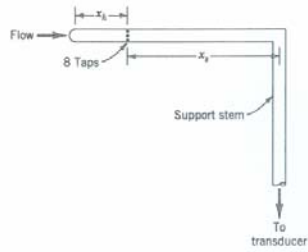
(b) Pitot tube



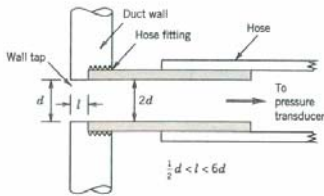
(c) Kiel probe

Mjerenje statičkog tlaka

Prandtlova cijev



Mjerenje na stijenci kanala



(a) Design

(b) Relative static error along tube length