



Měření tlaku, rychlosti a průtoku

Obsah přednášky

- Měření tlaku: obecné principy, měřicí přístroje (mechanické a kapalinové tlakoměry, elektronické snímače)
- Měření velmi nízkých tlaků
- Měření rychlosti a průtoku (objemový vs hmotnostní)

Měření tlaku

- Tlak můžeme měřit 3 způsoby: **absolutní, relativní a diferenční**

$$p_{abs} = p_{rel} + p_b \quad (1)$$

- Jednotkou je 1 Pascal (Pa) = (N/m²) = (kg/ms²)
- Jednotky obvykle uváděny bar(a), bar(g), bar(d)
- Přístroje nazýváme barometry (pro měření p_b , a p_{abs}), manometry (pro měření p_{rel} a p_{abs}) nebo obecně tlakoměry

Tradiční tlakoměry

- Kapalinové a mechanické

Tlakové snímače (převodníky)

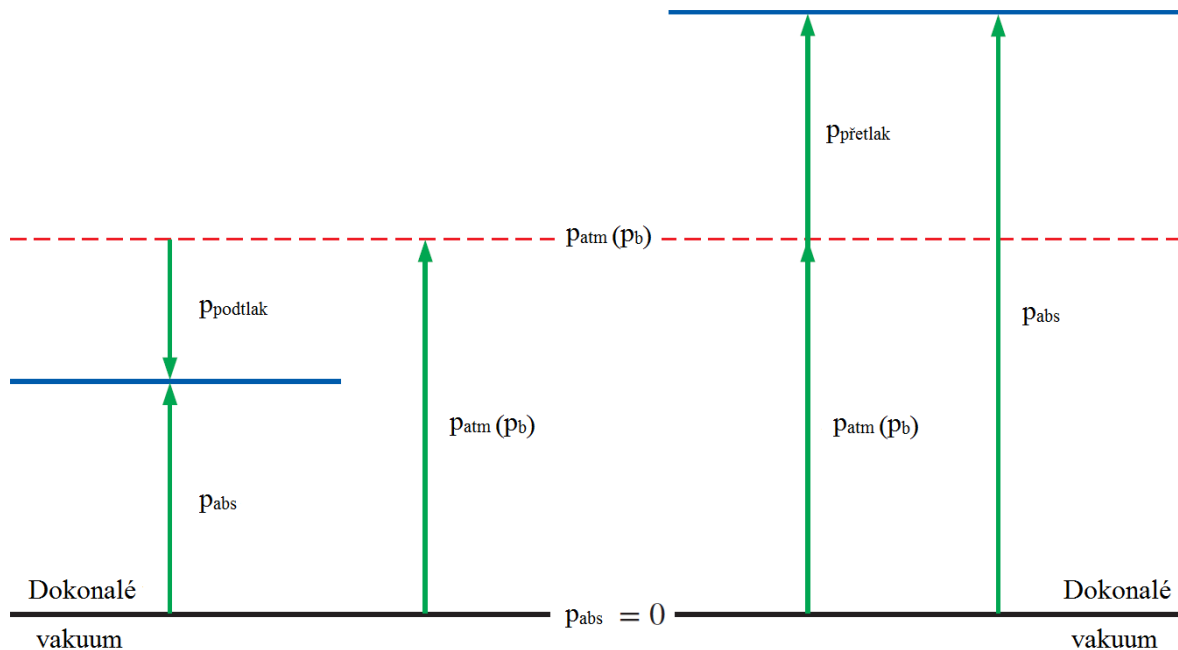
- Obvykle elektro-mechanický princip
- Membránové, piezoelektrické, kapacitní, LVDT

Tlakoměry pro měření nízkých tlaků

- Využití specifických fyzikálních principů (tepelná vodivost, ionizace, stlačitelnost)

Měření tlaku

Relativní tlak (přetlak, podtlak), absolutní tlak, barometrický tlak



Základní definice pro měření tlaku

Definice pomocí základních jednotek SI a definice hydrostatického tlaku

$$p = \frac{F}{S} = \frac{mg}{L^2}$$

$$(Pa) = \frac{(N)}{(m^2)} = \frac{(kg) \left(\frac{m}{s^2}\right)}{(m)(m)} = \frac{(kg)}{(m)(s^2)}$$

$$p = h\rho g$$

$$(Pa) = (m) \left(\frac{kg}{m^3}\right) \left(\frac{m}{s^2}\right) = \frac{(kg)}{(m)(s^2)}$$

Základní definice pro měření tlaku

Celkový tlak, statický tlak, dynamický tlak

$$p_{celk} = p_{stat} + p_{dyn}$$

$$p_{dyn} = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Základní dělení přístrojů pro měření tlaku

- Tlakoměry kapalinové (hydrostatické)
 1. Zvonové (využívají zdvihu zvonu)
 2. Pístové (využívají Pascalova zákona)
 3. Sloupcové (využívají tíhy kapalinového sloupce)

- Tlakoměry deformační (využívají deformace pružného členu)
 1. Pružný prvek Bourdonova trubice
 2. Pružný prvek vlnovec (měchy)
 3. Pružný prvek membrána (krabicové tlakoměry apod.)

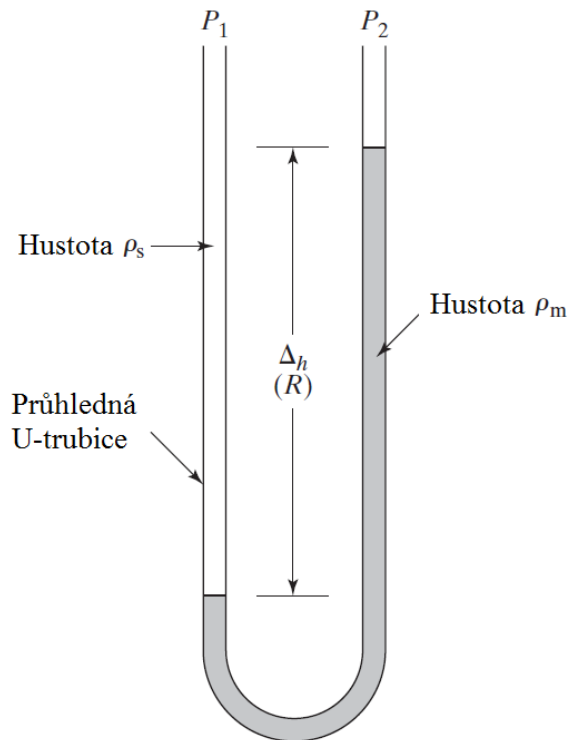
- Tlakoměry elektrické (využívají změny elektrické veličiny)
 1. Tenzometrické snímače tlaku
 2. Kapacitní snímače tlaku
 3. Piezoelektrické snímače tlaku
 4. LVDT snímače tlaku

Tradiční tlakoměry

- Většinou nemají elektrický výstup (analogový manometr, závažová pumpa pro kalibraci, Bourdonova trubice, měchy, pružiny apod.)
- Žádný z těchto měřidel není obvykle vhodný pro dynamické měření tlaku (rychlé změny tlaku v čase)

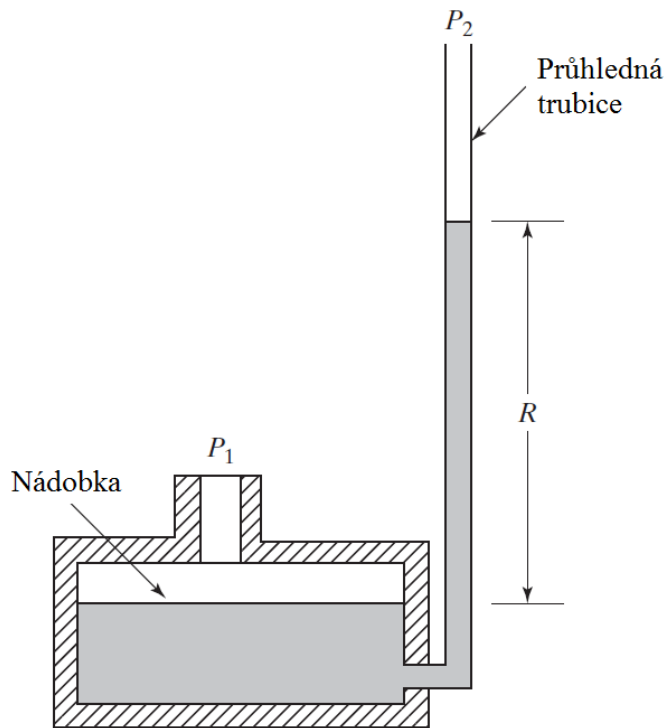
Tradiční tlakoměry

U-trubicový tlakoměr (U-manometr)



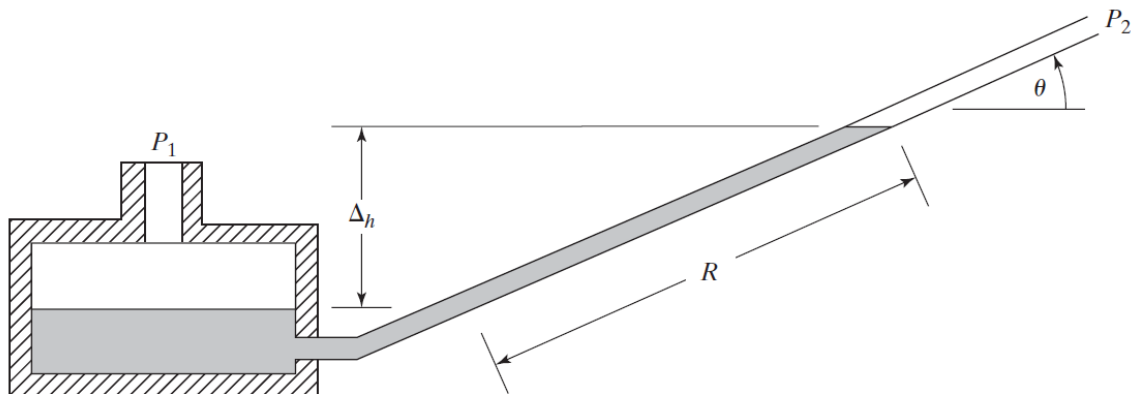
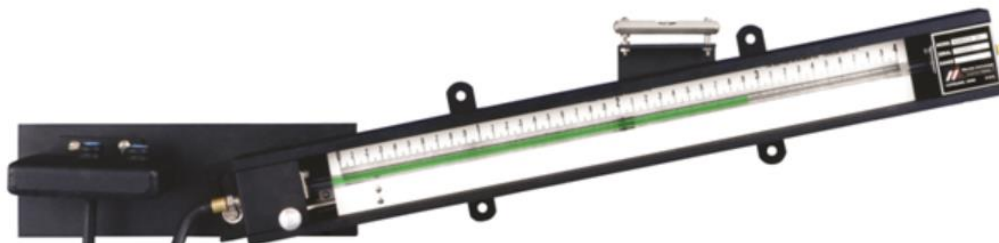
Tradiční tlakoměry

Nádobkový tlakoměr



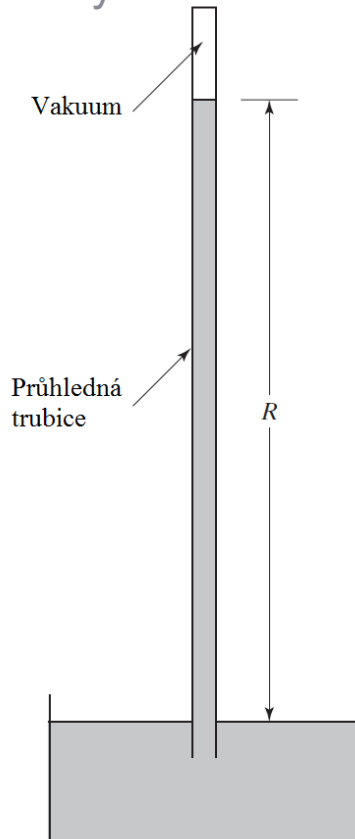
Tradiční tlakoměry

Sklonný kapalinový tlakoměr (úprava rozsahu, větší přesnost)



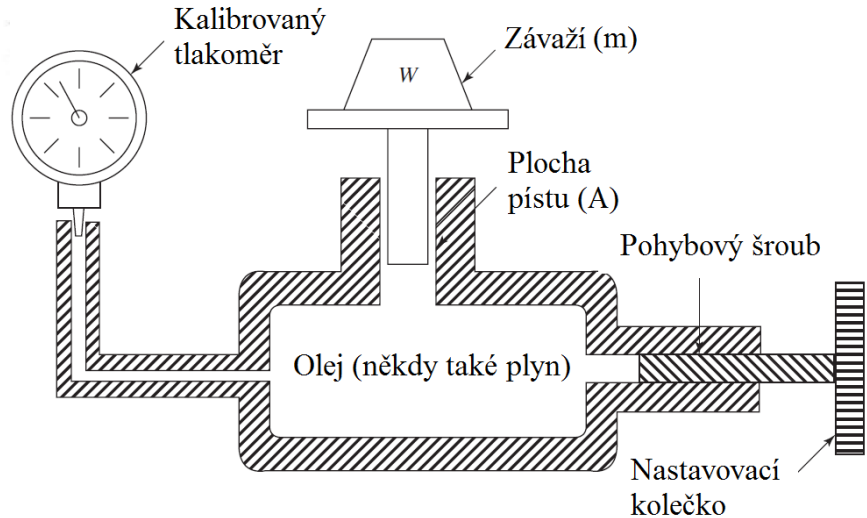
Tradiční tlakoměry

Rtuťový barometr



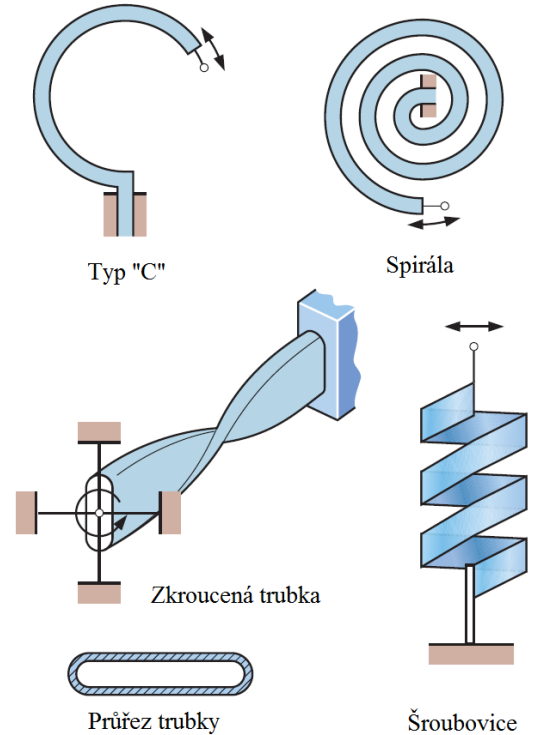
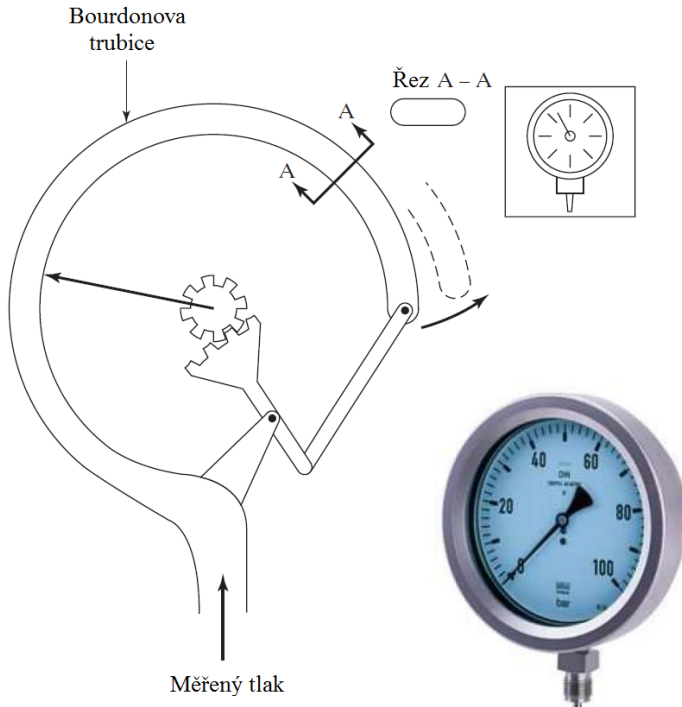
Tradiční tlakoměry

Pístový tlakoměr (závažová pumpa) – především vhodný pro kalibraci dalších tlakoměrů



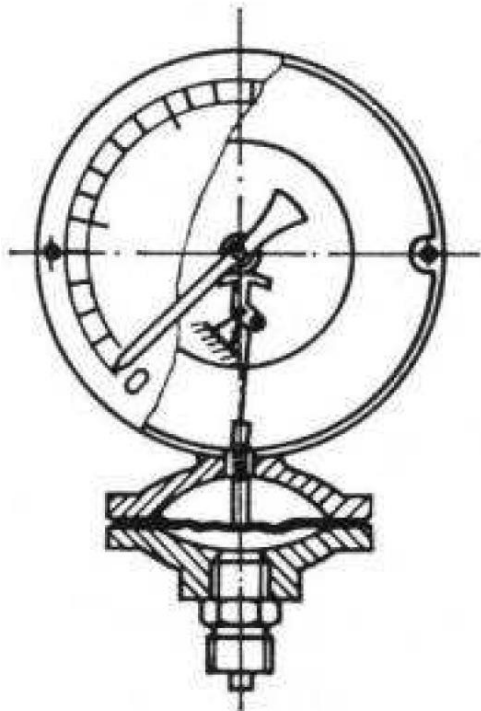
Tradiční tlakoměry

Bourdonův deformační tlakoměr



Tradiční tlakoměry

Membránový deformační tlakoměr

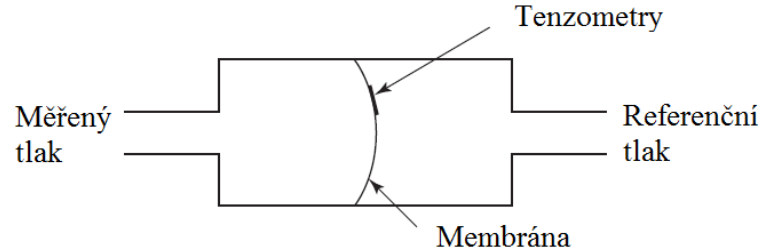


Elektronické snímače

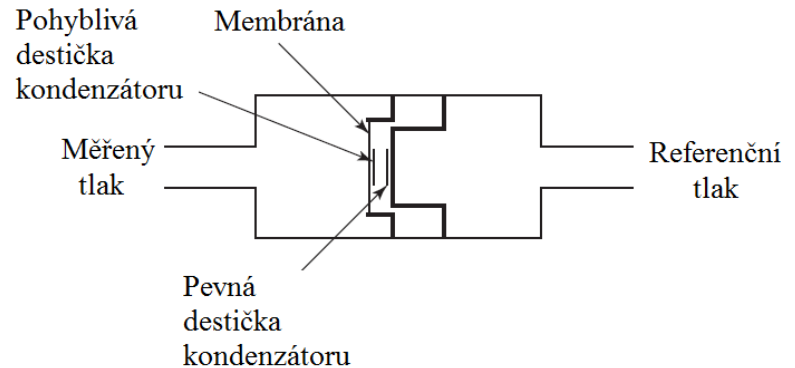
- Mají elektrický výstup (mohou využívat principy mechanických převodů používaných u deformačních tlakoměrů)
- Obvykle nejsou vhodné pro dynamické měření tlaku (rychlé změny tlaku v čase), ale záleží na jejich konstrukci
- Nejpoužívanější pro dynamická měření jsou piezoelektrické snímače tlaku

Elektronické snímače

Tenzometrický snímač tlaku

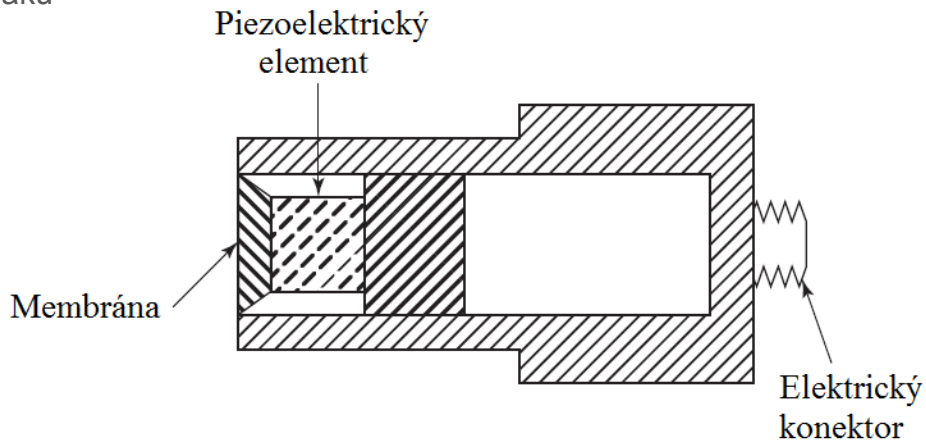


Kapacitní snímač tlaku



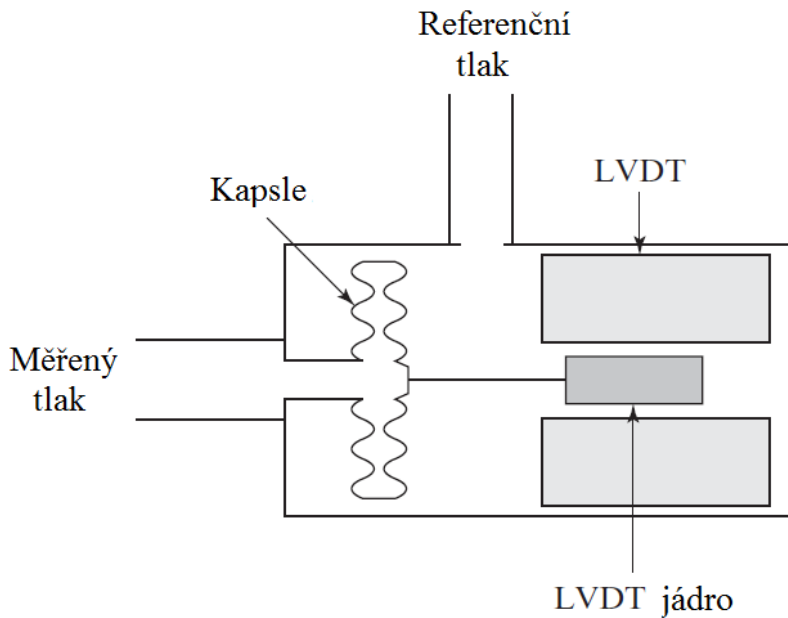
Elektronické snímače

Piezelektrický snímač tlaku



Elektronické snímače

LVDT snímač tlaku (Linear Variable Differential Transformer)

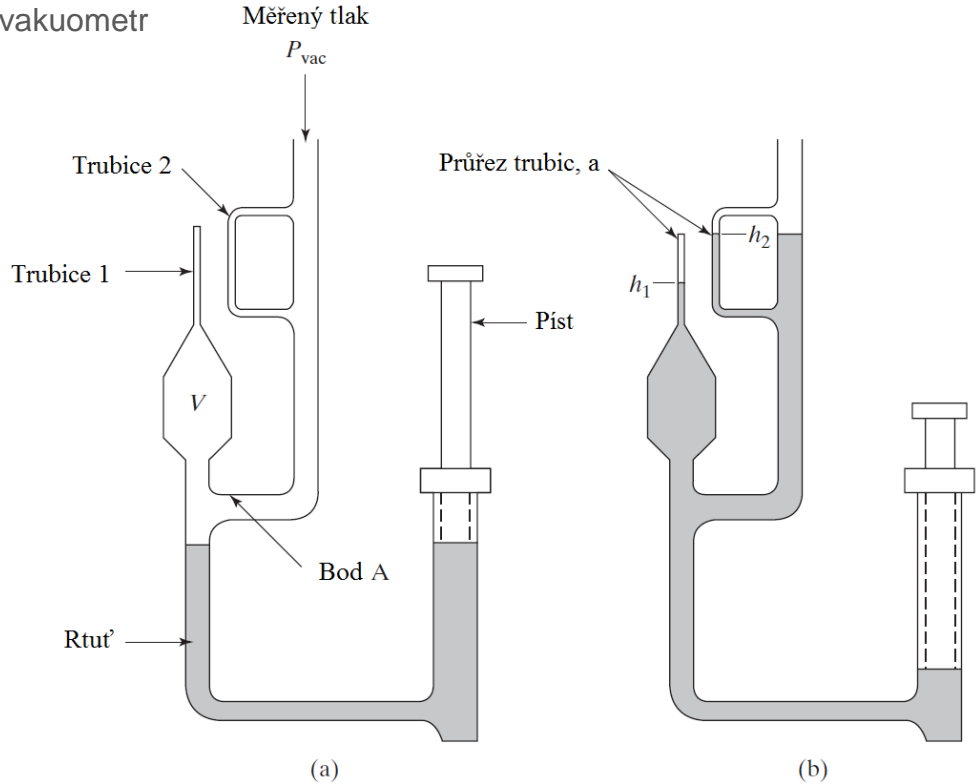


Základní dělení přístrojů pro měření velmi nízkého tlaku

- Kompresní vakuometry (hydrostatické, mechanické)
- Bolometrické vakuometry (tepelná vodivost plynu závislá na tlaku)
- Ionizační vakuometry (míra ionizace plynu závislá na tlaku)

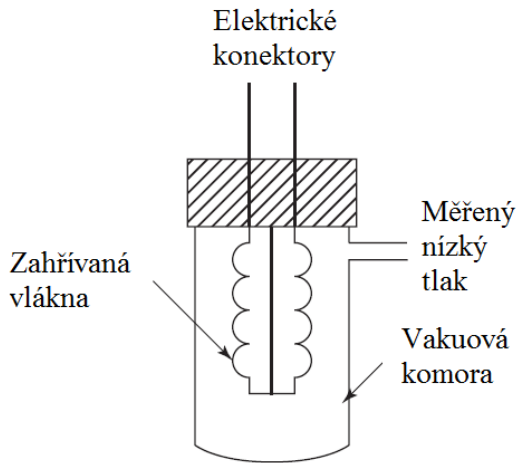
Měření velmi nízkého tlaku

Kompresní (McLeodův) vakuometr
(rozsah 10^3 až 10^{-4} Pa)

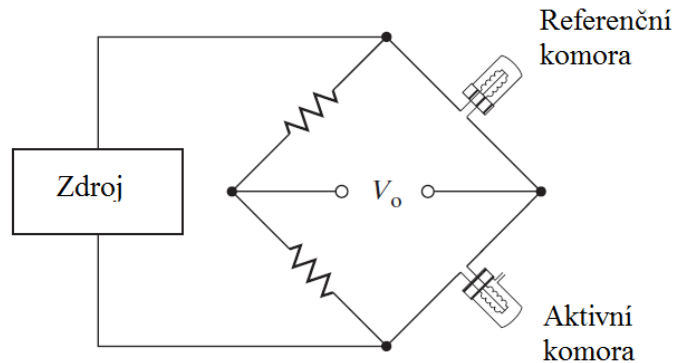


Měření velmi nízkého tlaku

Bolometrický (Piraniho) vakuometr
(rozsah 10^3 až 10^{-3} Pa)



(a) Měřicí komora



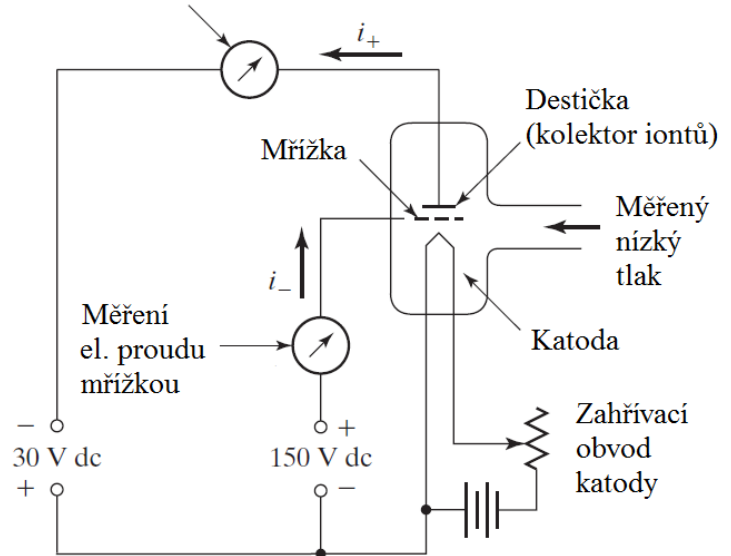
(b) Elektrické zapojení

Měření velmi nízkého tlaku

Ionizační vakuometr
(rozsah 10^{-1} až 10^{-10} Pa)



Měření el. proudu
destičkou



Základní dělení přístrojů pro měření rychlosti a průtoku

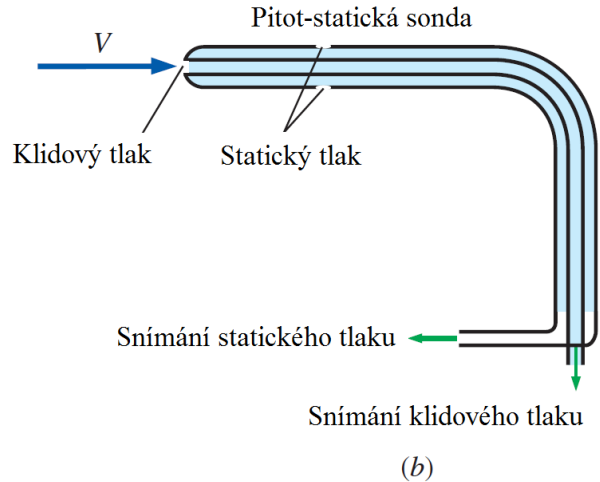
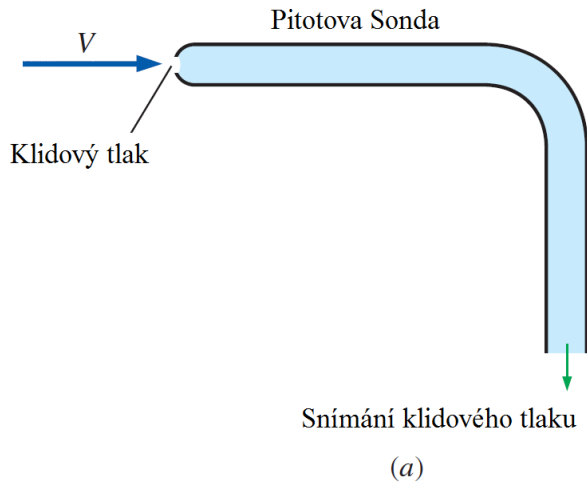
- Průtokoměry pro měření objemového průtoku
 1. Objemový průtokoměr
 2. Turbínkový průtokoměr
 3. Plováčkový průtokoměr
 4. Ultrazvukový průtokoměr
 5. Magnetický průtokoměr
 6. Vírový průtokoměr
 7. Průtokoměry využívající snímačů rychlosti

- Průtokoměry pro měření hmotnostního průtoku
 1. Coriolisův průtokoměr
 2. Kalorimetrický průtokoměr

- Metody pro měření rychlosti
 1. Prandtlůva sonda
 2. Termoanemometrická sonda (CTA/CCA)
 3. Plošná metoda měření rychlosti (PIV)

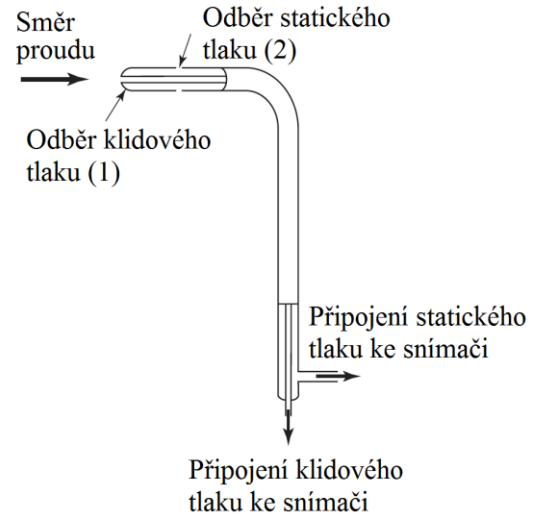
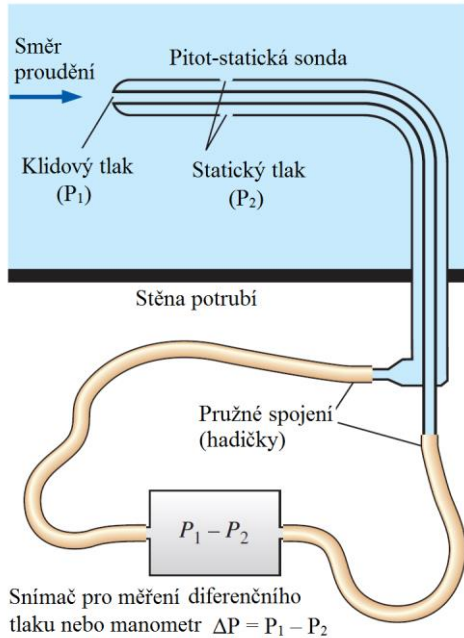
Měření rychlosti

Pitotova a Pitotova-Statická sonda (Prandtlova sonda)



Měření rychlosti

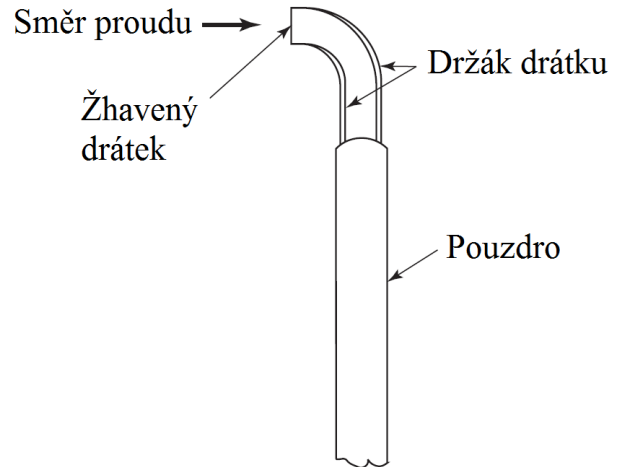
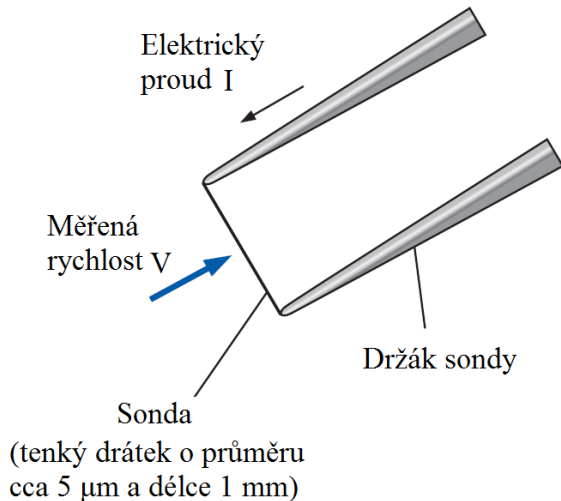
Pitotova-Statická sonda (Prandtlova sonda)



Měření rychlosti

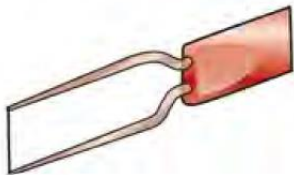
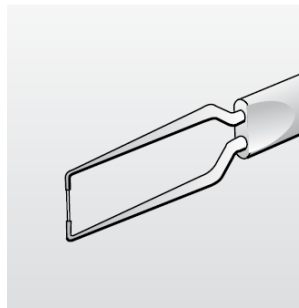
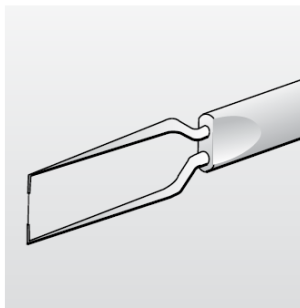
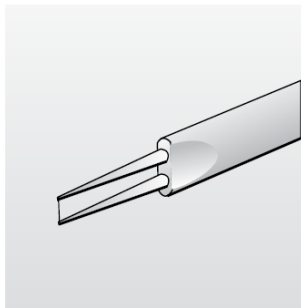
Termoanemometrie (metoda žhaveného drátku) – 2 možné režimy měření (CTA/CCA)

- **CTA** (Constant Temperature Anemometry) **pro měření rychlosti**
- **CCA** (Constant Current Anemometry) **pro měření teploty**

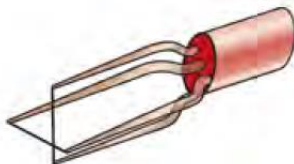


Měření rychlosti

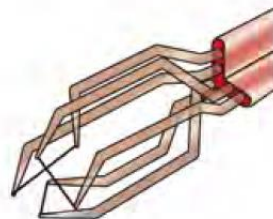
Termoanemometrie (metoda žhaveného drátku) – CTA/CCA



1D



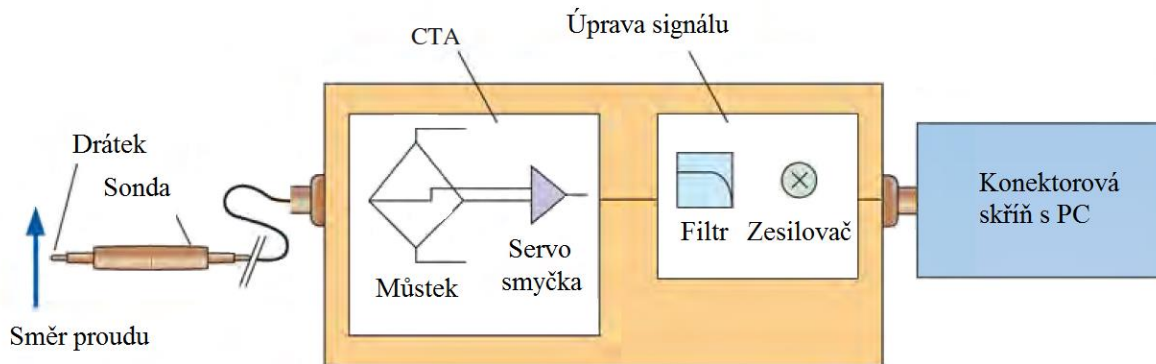
2D



3D

Měření rychlosti

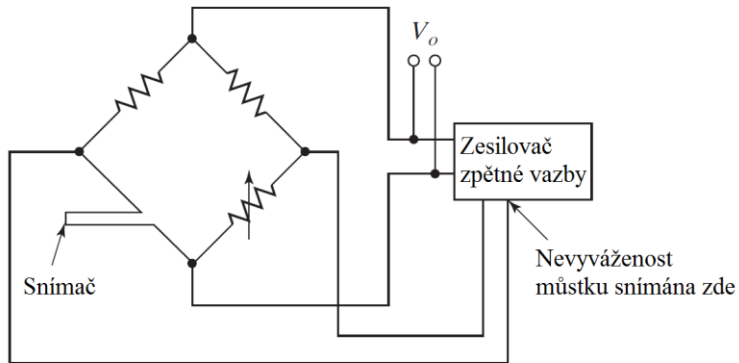
Termoanemometrie (metoda žhaveného drátku) – CTA/CCA



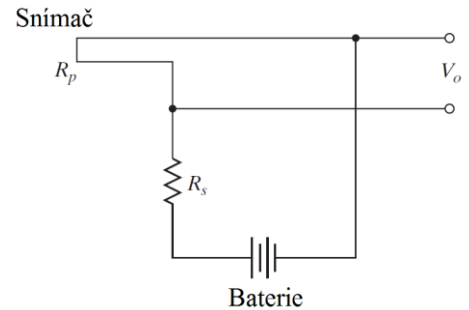
Měření rychlosti

Termoanemometrie (metoda žhaveného drátku) – CTA vs CCA režim

CTA

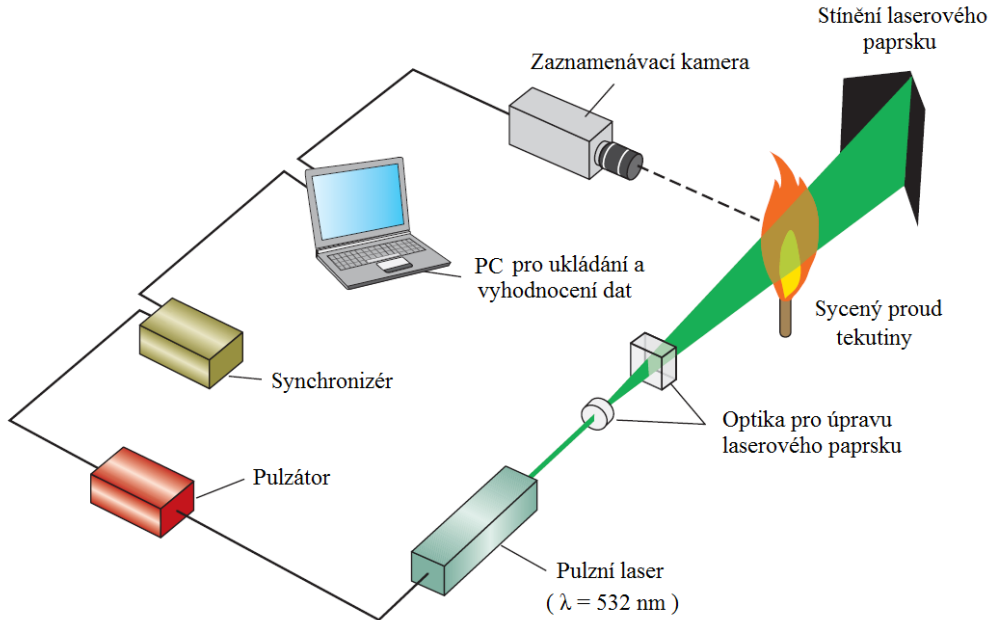


CCA



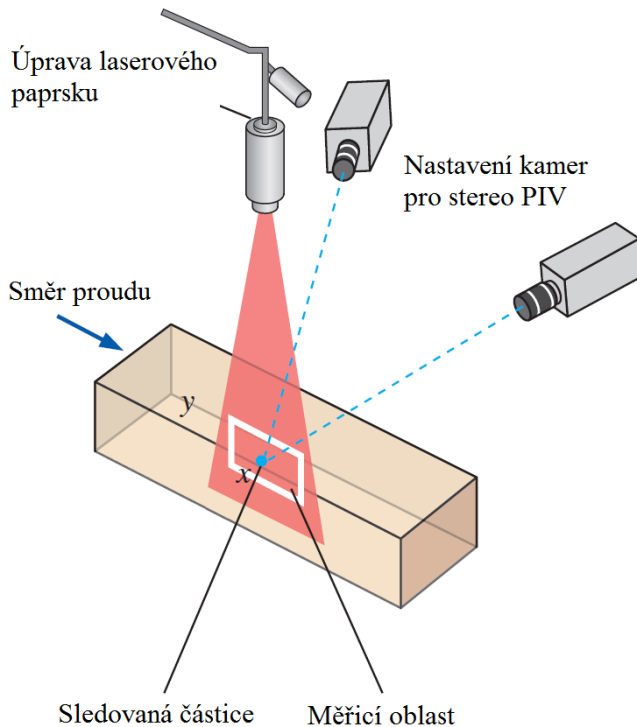
Měření rychlosti

PIV metoda (Particle Image Velocimetry)



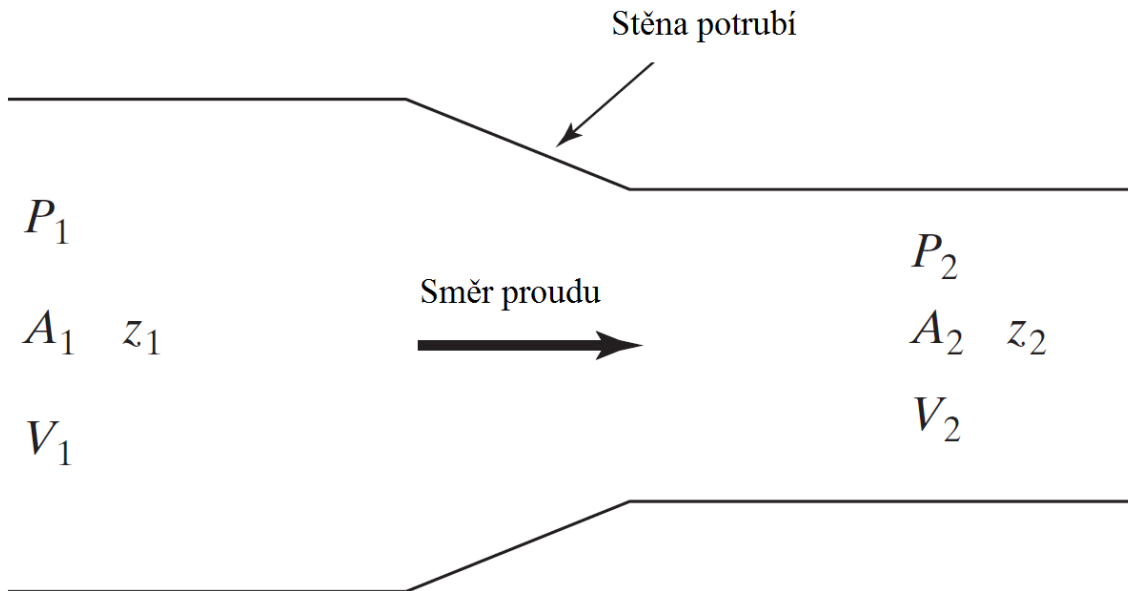
Měření rychlosti

3D PIV metoda (Particle Image Velocimetry)



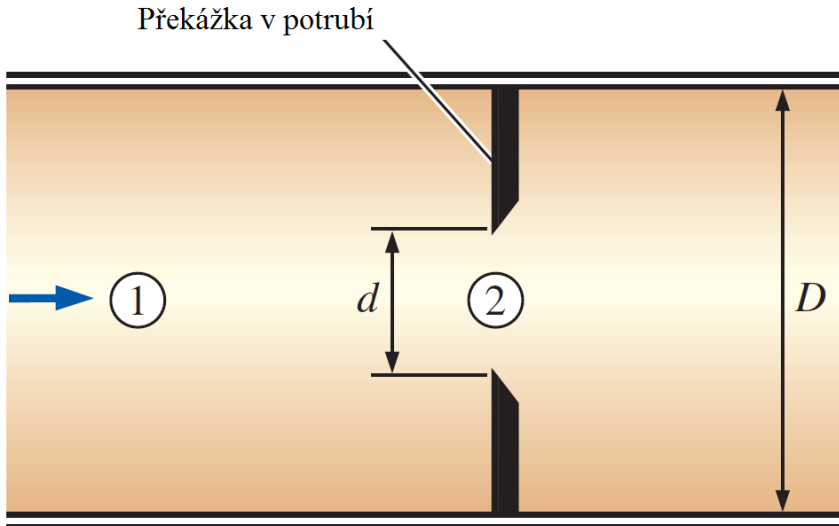
Měření průtoku

Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167)



Měření průtoku

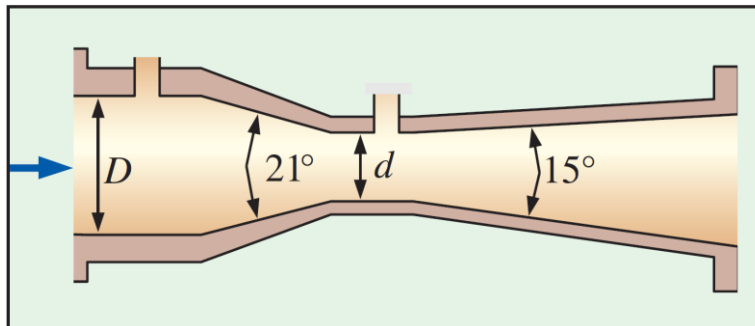
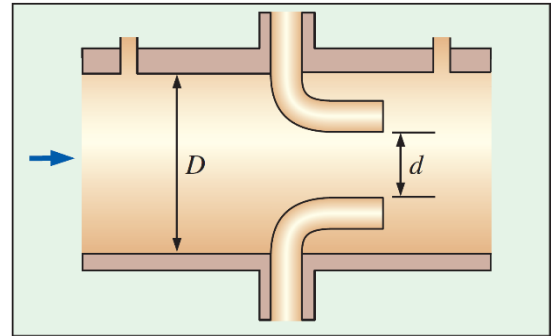
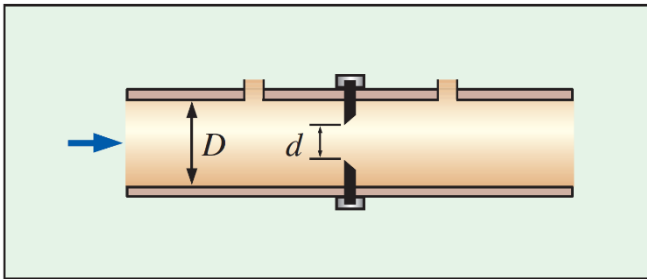
Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167)



Nutné provést korekci ideálního průtoku na reálný, případně také korekci stlačitelnosti.

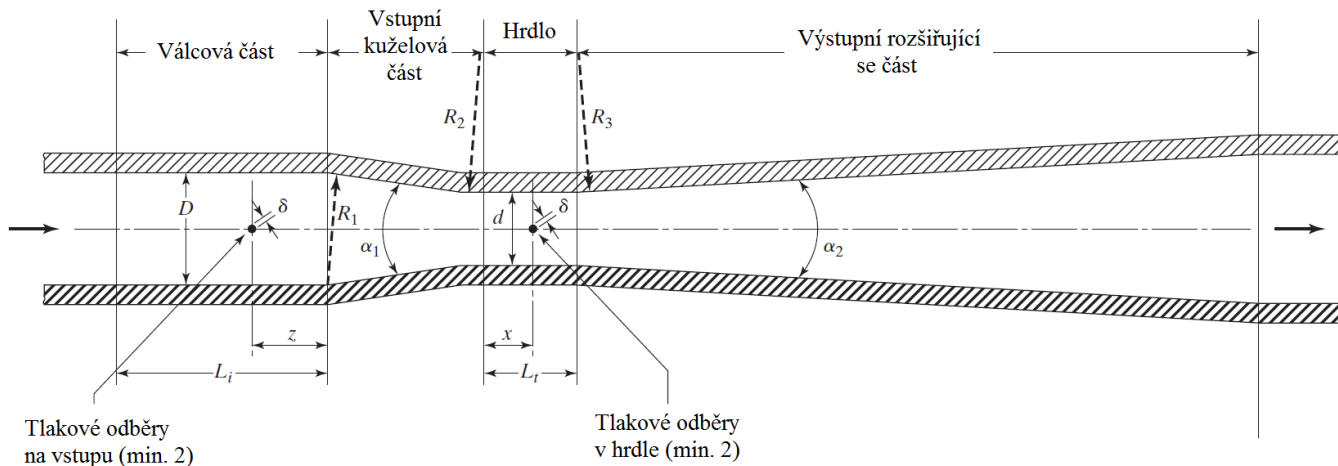
Měření průtoku

Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167) – clona, dýza, Venturiho trubice



Měření průtoku

Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167-4) – Venturiho trubice



$L_i > D$ or $L_i > (D/4 + 250 \text{ mm})$
 $z = D/2 (+0.0 D, -D/4)$, **minimálně 2 odběry**
 $L_t \geq d/3$
 $x = 0.5 d \pm 0.02 d$, **minimálně 2 odběry**
 $4 \text{ mm} \leq \delta \leq 10 \text{ mm}$ a $\delta < 0.1D$ nebo $0.13 d$

$R_1 = 1.375 D \pm 20\%$
 $R_2 = 3.625 d \pm 0.125 d$
 $5d \leq R_3 \leq 15 d$
 $\alpha_1 = 21^\circ \pm 1^\circ$
 $7^\circ \leq \alpha_2 \leq 15^\circ$

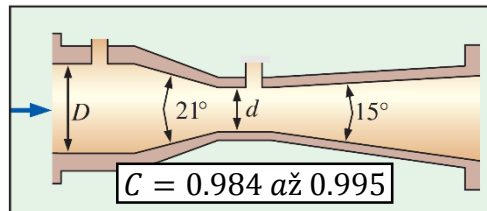
Měření průtoku

Měření průtoku pomocí tlakové difference (ISO 5167-4) – Venturiho trubice

Doporučené hodnoty součinitele průtoku pro Venturiho trubice

Litá a svařovaná vstupní kuželová část	Opracovaná vstupní kuželová část
$C = 0.984 \pm 1.0\%$	$C = 0.995 \pm 1.0\%$
$10.16 \text{ cm} \leq D \leq 121.92 \text{ cm}$	$5.08 \text{ cm} \leq D \leq 25.4 \text{ cm}$
$0.3 \leq \beta \leq 0.75$	$0.3 \leq \beta \leq 0.75$
$2 \times 10^5 \leq \text{Re} \leq 2 \times 10^6$	$2 \times 10^5 \leq \text{Re} \leq 2 \times 10^6$

Zdroj : ASME (1989).



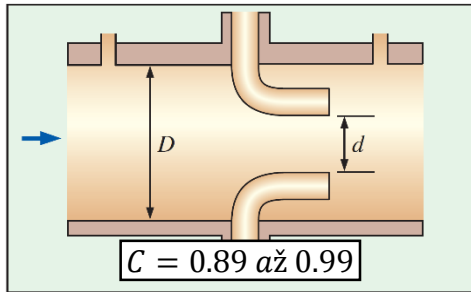
Měření průtoku

Měření průtoku pomocí tlakové difference (ISO 5167-4) – Venturiho trubice

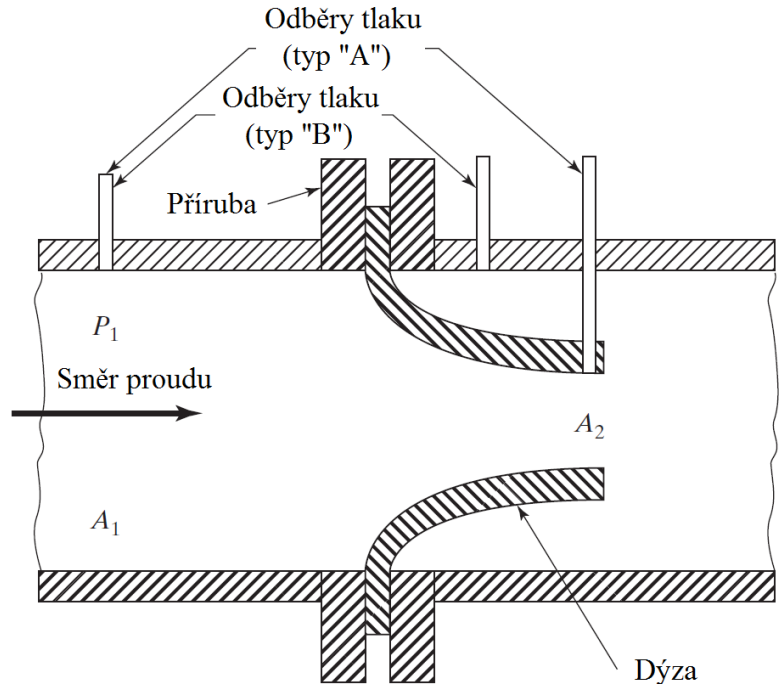


Měření průtoku

Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167-3) – Dýza (různá provedení)

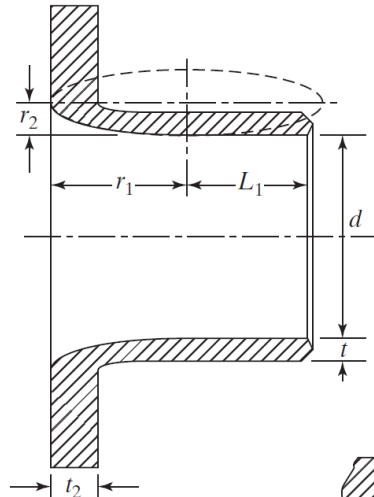


$$C = 0.9975 - 0.00653 \sqrt{\left(\frac{10^6 \beta}{Re_D}\right)}$$



Měření průtoku

Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167-3) – např. dýza s dlouhým poloměrem



Dýza pro vysoký poměr β

$$0.50 \leq \beta \leq 0.80$$

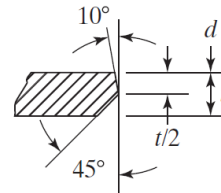
$$r_1 = D/2$$

$$r_2 = (D - d)/2$$

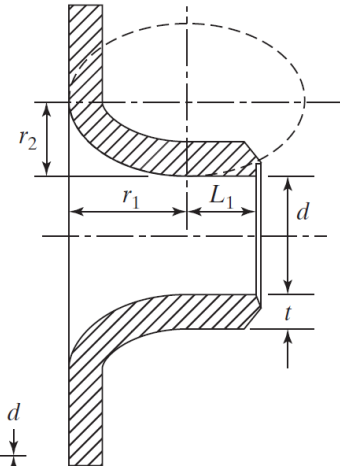
$$L_1 \leq 0.6 d \text{ or } \leq D/3$$

$$2t \leq D - (d + 6 \text{ mm})$$

$$3 \text{ mm} \leq t_2 \leq 0.15 D$$



Detail výstupu
dýzy



Dýza pro nízký poměr β

$$0.20 \leq \beta \leq 0.50$$

$$r_1 = d$$

$$0.63 d \leq r_2 \leq 0.67 d$$

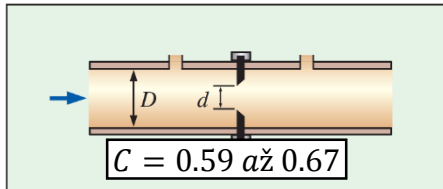
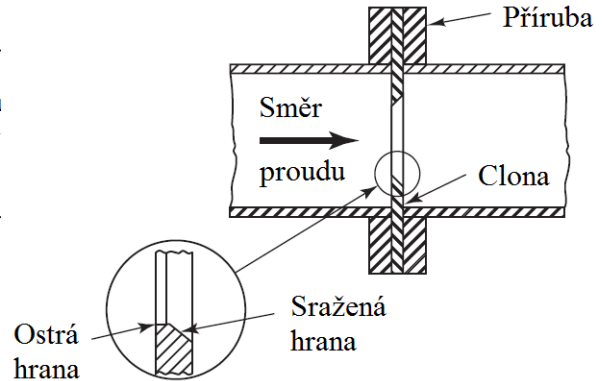
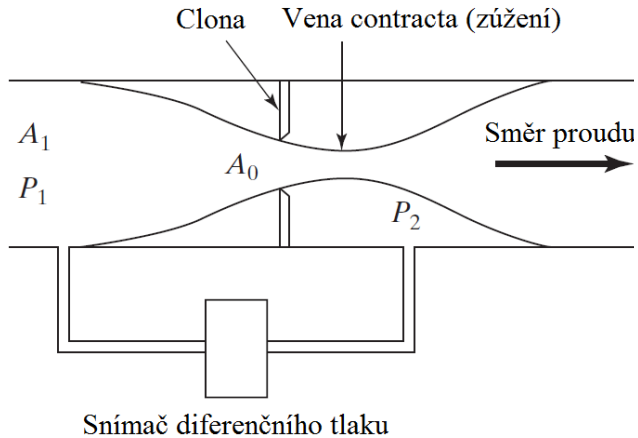
$$0.6 d \leq L_1 \leq 0.75 d$$

$$3 \text{ mm} \leq t \leq 12 \text{ mm}$$

$$3 \text{ mm} \leq t_2 \leq 0.15 D$$

Měření průtoku

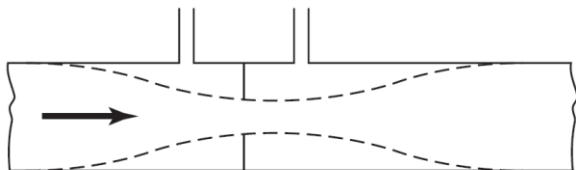
Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167-2) – clona (různá provedení)



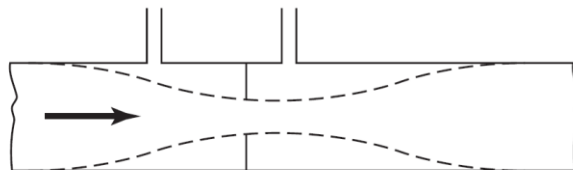
$$C = 0.5959 - 0.0312\beta^{2.1} - 0.184\beta^8 + \frac{97.71\beta^{2.5}}{Re_D^{0.75}}$$

Měření průtoku

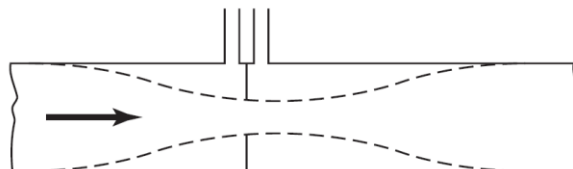
Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167-2) – clona (typy odběrů tlaku)



(a) Přírubové odběry



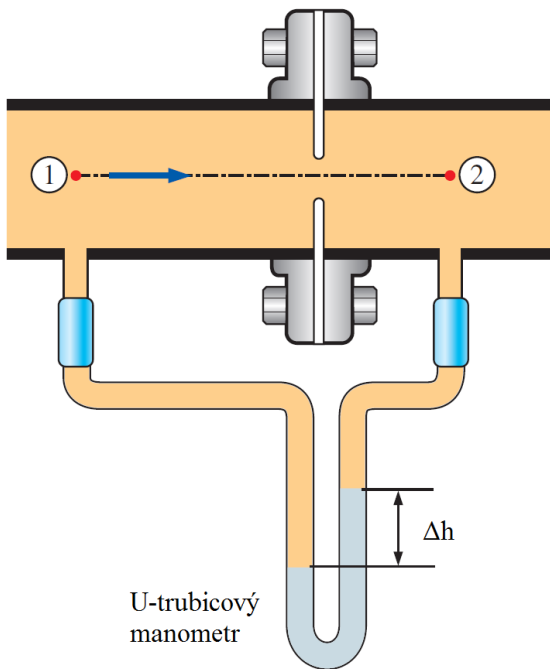
(b) $D-1/2D$ odběry



(c) Koutové odběry

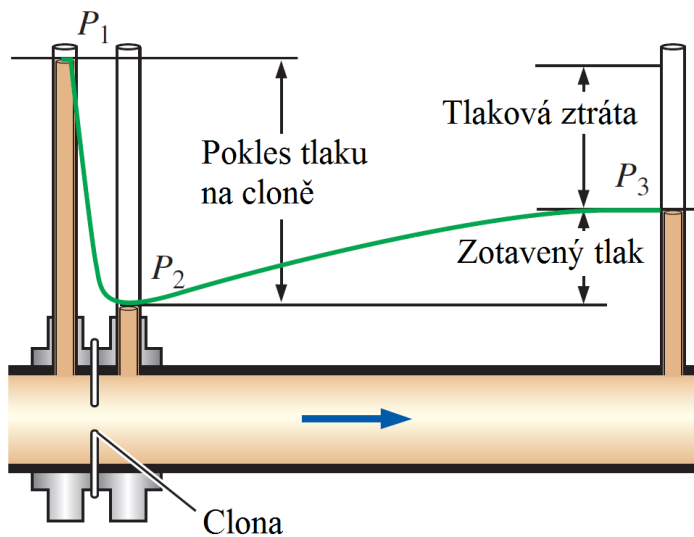
Měření rychlosti a průtoku

Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167-2) – clona



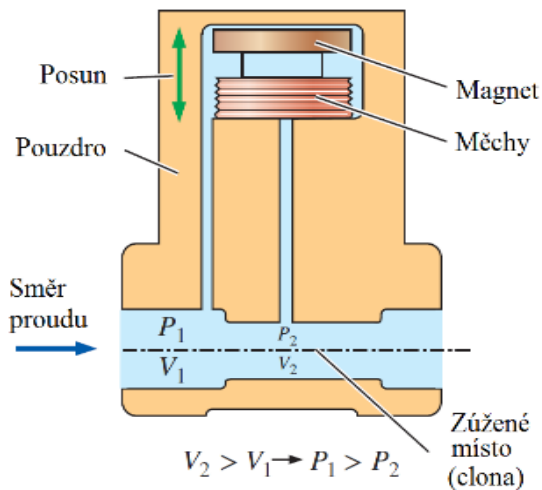
Měření průtoku

Měření průtoku pomocí tlakové diference (ISO 5167-2) – Pokles tlaku na cloně a tl. ztráta



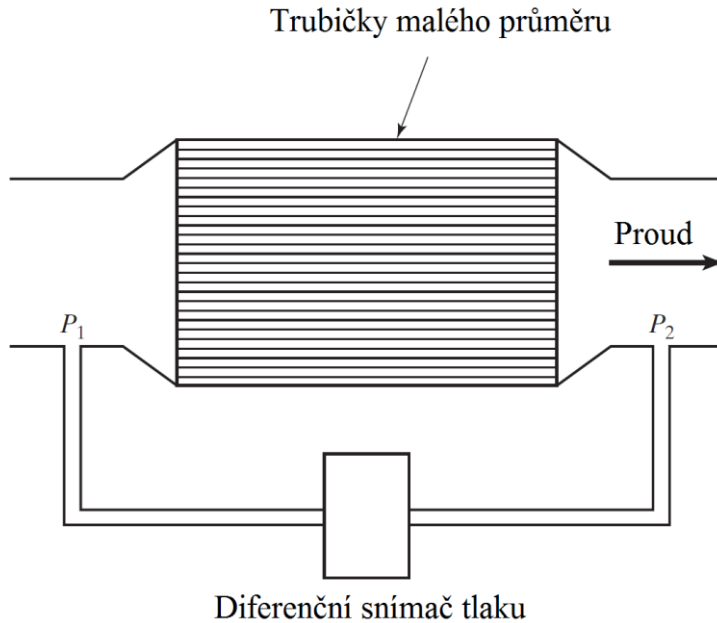
Měření průtoku

Měření průtoku pomocí tlakové diference – Obecná překážka (kalibrace)



Měření průtoku

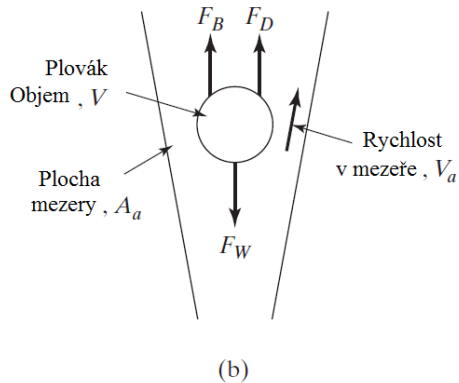
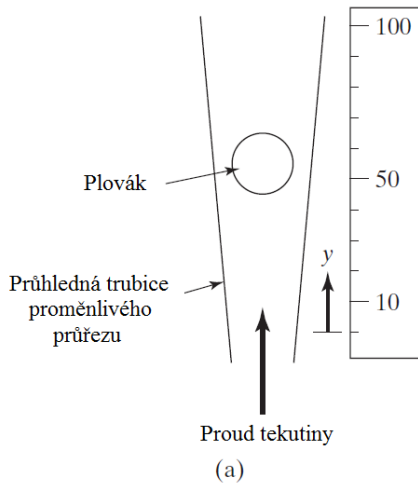
Měření průtoku – Laminární průtokoměr



$$Q_V = \frac{\pi D^4 (p_1 - p_2)}{128 \mu L}$$

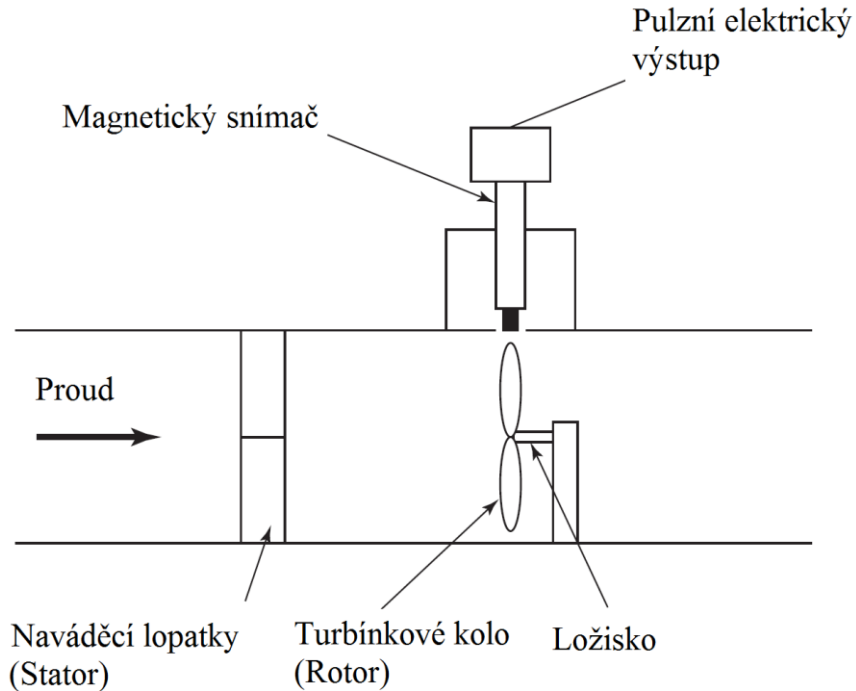
Měření průtoku

Měření průtoku – Plovákový průtokoměr (rotametr)



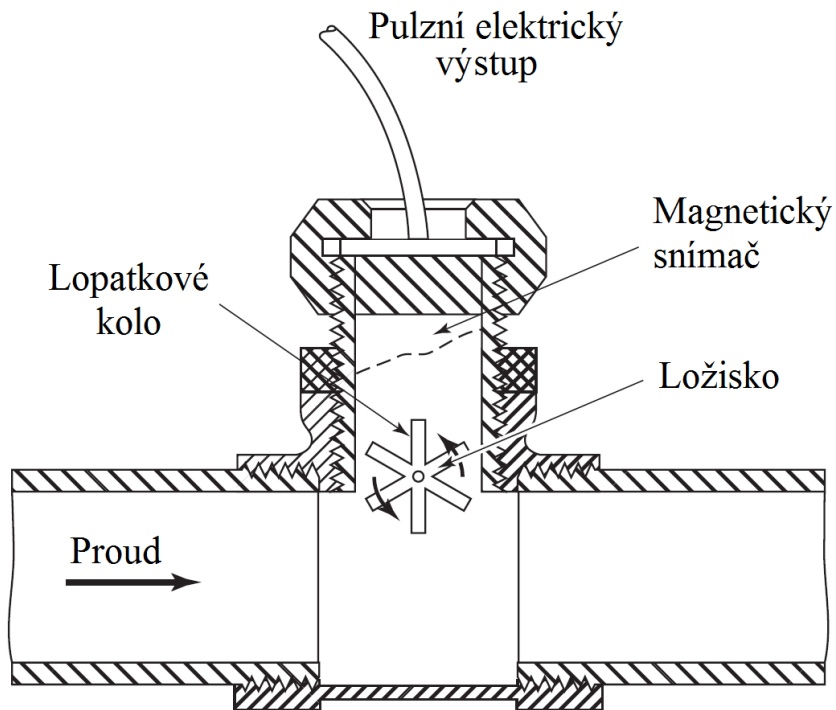
Měření průtoku

Měření průtoku – Turbínkové (vrtulkové) průtokoměry



Měření průtoku

Měření průtoku – Lopatkové (vrtulkové) průtokoměry



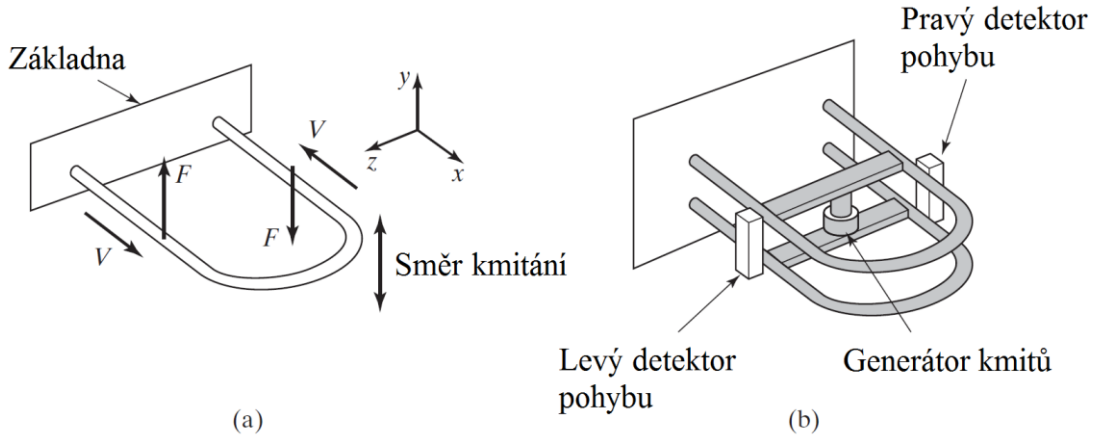
Měření průtoku

Měření průtoku – Turbínkové (vrtulkové) průtokoměry



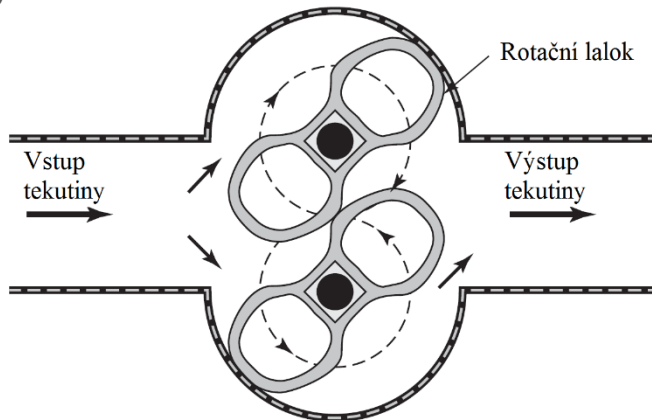
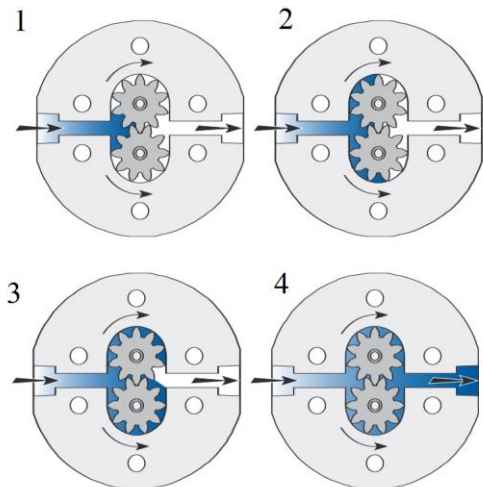
Měření průtoku

Měření průtoku – Coriolisovy (hmotnostní) průtokoměry



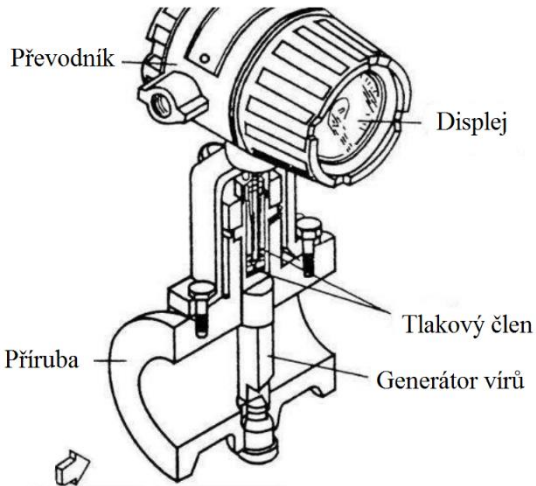
Měření průtoku

Měření průtoku – Objemové průtokoměry

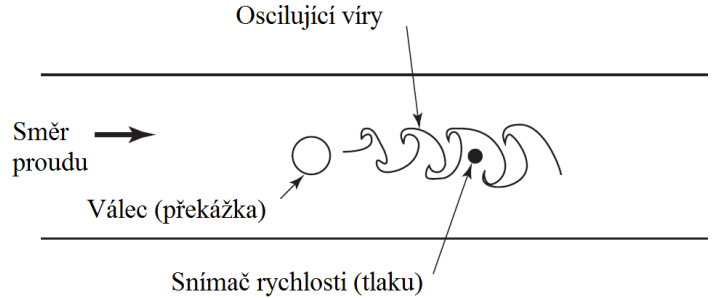


Měření průtoku

Měření průtoku – Vírové průtokoměry

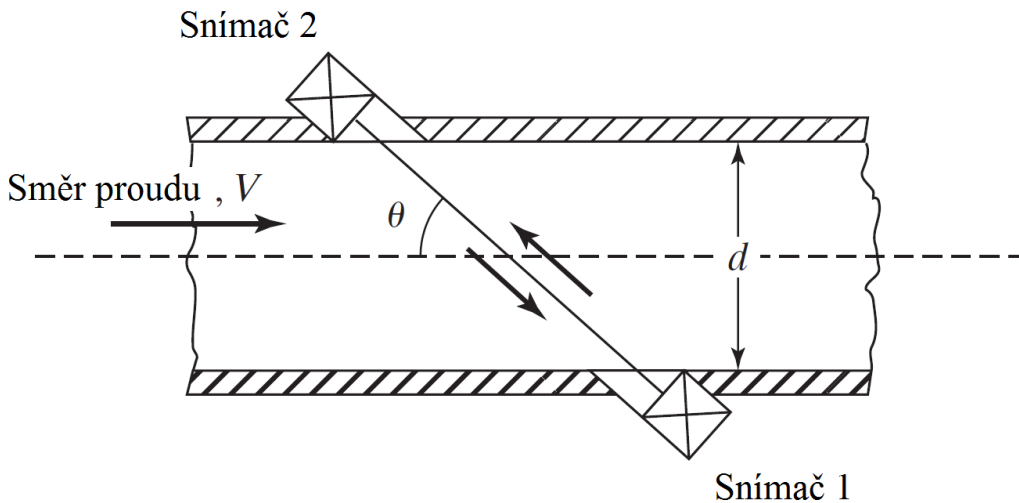


$$v = \frac{fD}{St}$$



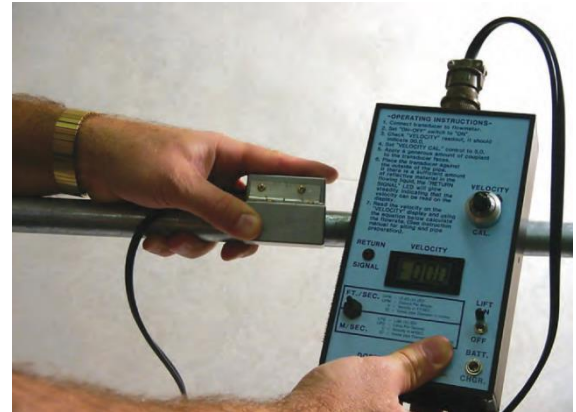
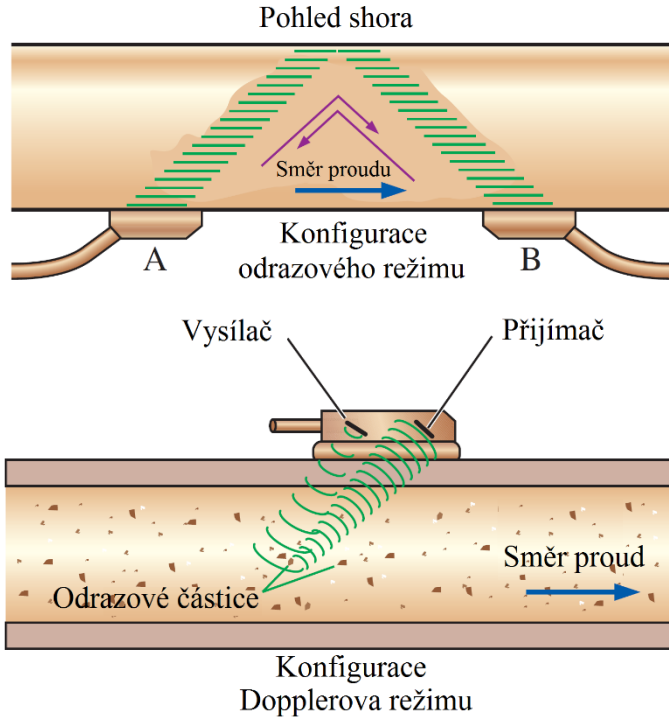
Měření průtoku

Měření průtoku – Ultrazvukové průtokoměry



Měření průtoku

Měření průtoku – Ultrazvukové průtokoměry



Shrnutí přednášky

- Měření tlaku (přetlak, absolutní, velmi nízký tlak)
- Měření rychlosti (nepřímé, přímé, bodové, plošné)
- Měření průtoku (nepřímé, přímé, objemové, hmotnostní)



Děkuji za pozornost!