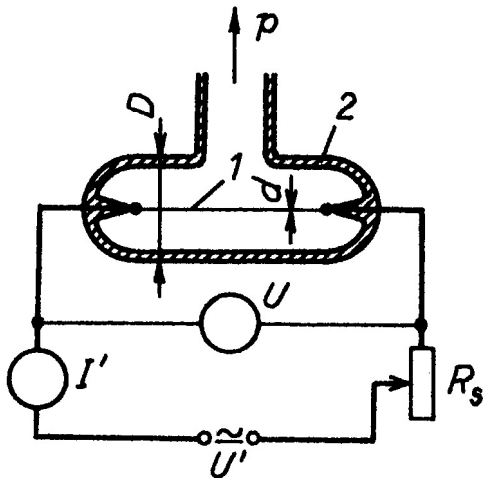


Tepelné manometry

Princip je založen na závislosti tepelné vodivosti plynu na tlaku.
Podstatnou částí manometru je nějaký citlivý element, který je elektrickým příkonem P vyhříván na teplotu T , vyšší než je teplota okolí T_0 .
Nejčastěji měříme teplotu T :

- z velikosti odporu - odporové manometry
- pomocí termočlánku - termočláňkové manometry
- z deformace bimetalu - dilatační manometry

Odporové manometry - Pirani



J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

Odpor vlákna $R = f(T)$

$$P_e = UI = I^2R = \frac{U^2}{R} ; R = R_0(1 + \beta(T - T_0))$$

$$P_e = P_c + P_z + P_p$$

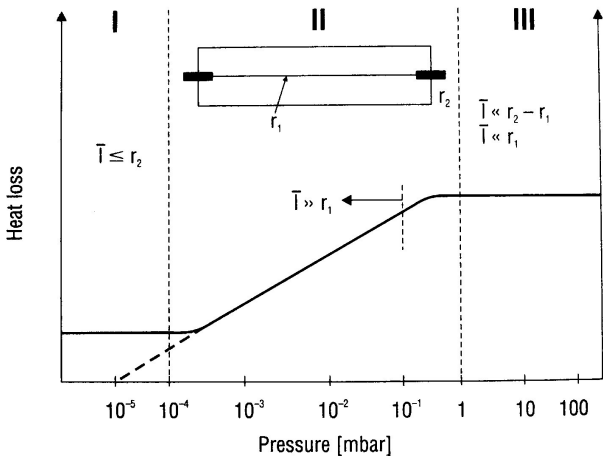
- P_c - výkon odváděný molekulami plynu
- P_z - výkon odváděný zářením vlákna
- P_p - výkon odváděný přívody vlákna

$$P_z = S_0\sigma\varepsilon(T^4 - T_0^4)$$

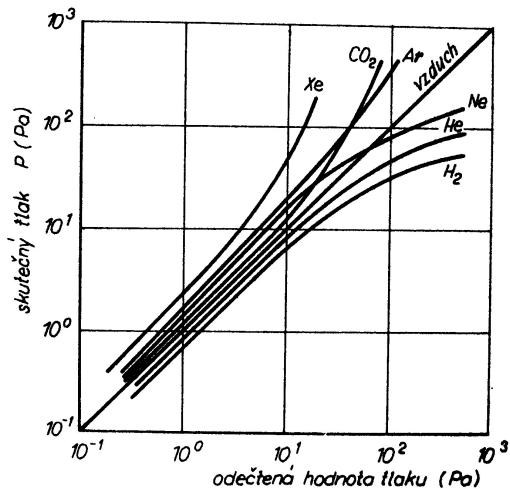
$$P_c = [\alpha\lambda_T(p)]S_0(T - T_0)$$

α - akomodační koeficient

$\lambda_T(p)$ - tepelná vodivost



- I Thermal dissipation due to radiation and conduction in the metallic ends
- II Thermal dissipation due to the gas, pressure-dependent
- III Thermal dissipation due to radiation and convection



Závislost na druhu plynu, na ose x je tlak z Piraniho manometru.

J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

Tab. 5.3. Měrný odpor ρ a teplotní součinitel odporu β (orientační údaje)

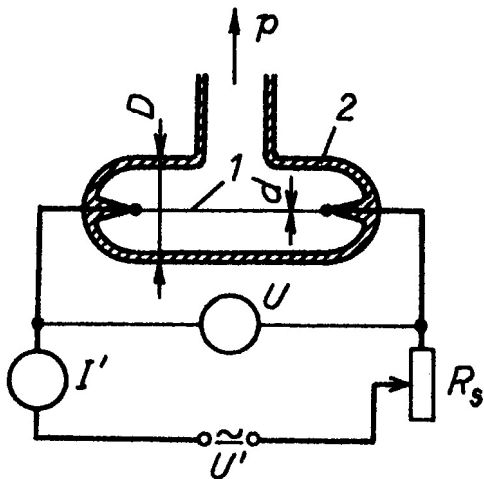
| Kov | ρ ($t = 0^\circ\text{C}$) ($\Omega \text{ cm}$) | β ($t = 0$ až 100°C) (K^{-1}) |
|-------------------------------|---|---|
| konstantan (60 % Cu, 40 % Ni) | $50 \cdot 10^{-6}$ | ~ 0 |
| měď (obyčejná, vyžíhaná) | $1,6 \cdot 10^{-6}$ | $4,5 \cdot 10^{-3}$ |
| molybden (vyžíhaný) | $4,5 \cdot 10^{-6}$ | $3,3 \cdot 10^{-3}$ |
| nikl (obyčejný) | $6,5 \cdot 10^{-6}$ | $6 \cdot 10^{-3}$ |
| platina | $10 \cdot 10^{-6}$ | $3 \cdot 10^{-3}$ |
| slitina Pt–Rh (90 % Pt) | $21 \cdot 10^{-6}$ | $4 \cdot 10^{-3}$ |
| stříbro elektrolytické | $1,5 \cdot 10^{-6}$ | $4 \cdot 10^{-3}$ |
| tantal | $15 \cdot 10^{-6}$ | $4,5 \cdot 10^{-3}$ |
| wolfram (vyžíhaný) | $4,5 - 5,5 \cdot 10^{-6}$ | $4,5 \cdot 10^{-3}$ |
| železo (čistě) | $9 \cdot 10^{-6}$ | $5 \cdot 10^{-3}$ |

J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

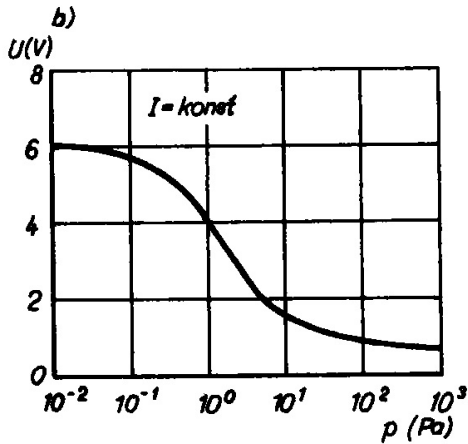
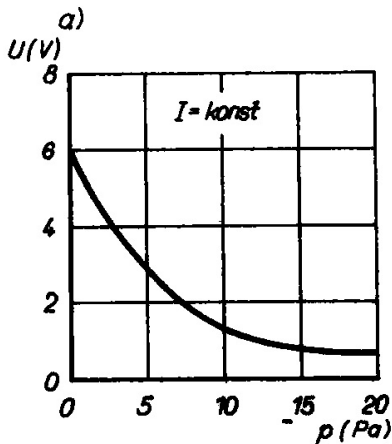
Metody měření

- Metoda konstantního proudu
- Metoda konstantní teploty (odporu)

Metoda konstantního proudu

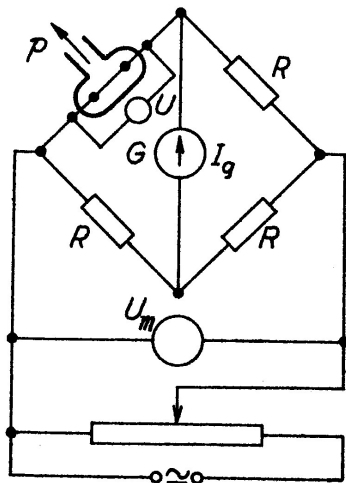


J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

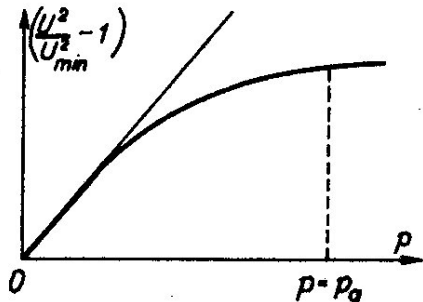


Obr. 5.19. Závislost $U = f(p)$ u manometru měřícího při $I = konst$
 a) lineární stupnice, b) semilogaritmická stupnice

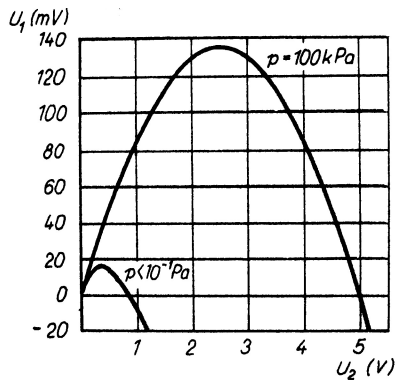
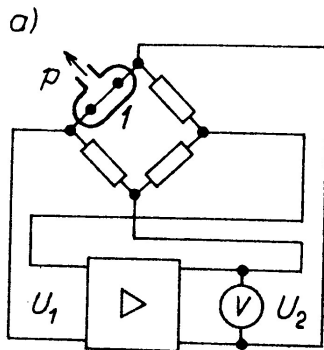
Metoda konstantní teploty (odporu)



J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

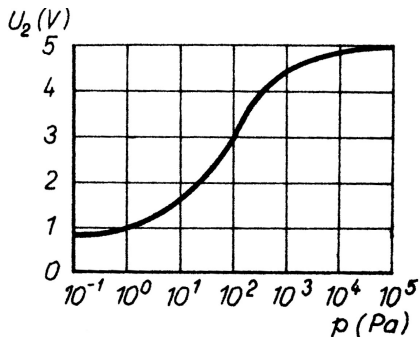


Obr. 5.18. Závislost $\frac{U^2}{U_{\min}^2} - 1 = f(p)$.
 Při nízkých tlacích je lineární



Tepelný vakuometr s konstantním odporem

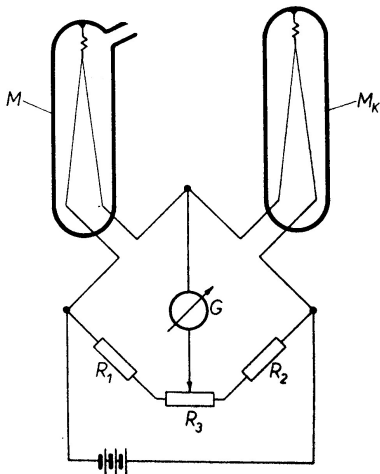
J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981



Vlákno $d = 50 \mu\text{m}$, $L = 50 \text{ mm}$, teplota $T = 470 \text{ K}$,
 měřící obor $10 - 5000 \text{ Pa}$

J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

Kompenzace teploty



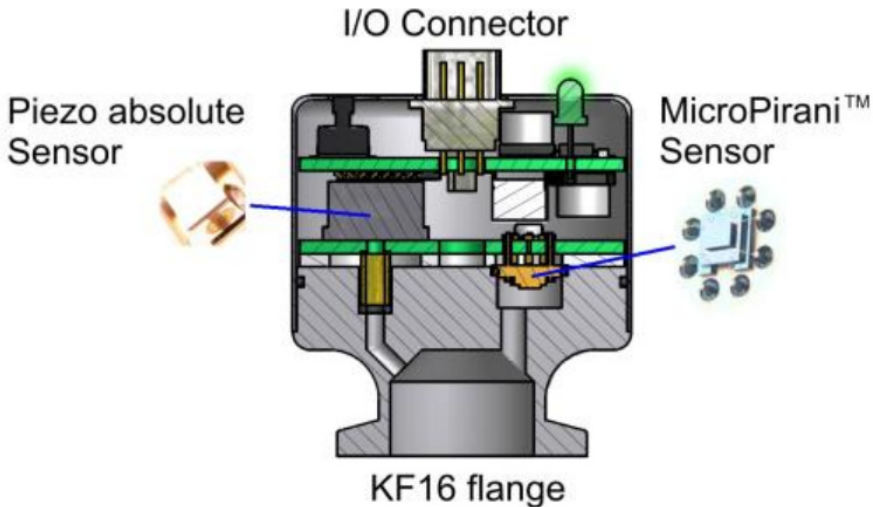
Stará metoda kompenzace teploty, dnes se používají teplotní čidla - termistor, Pt1000,...

L. Pátý: Fyzika nízkých tlaků, Academia, Praha 1968

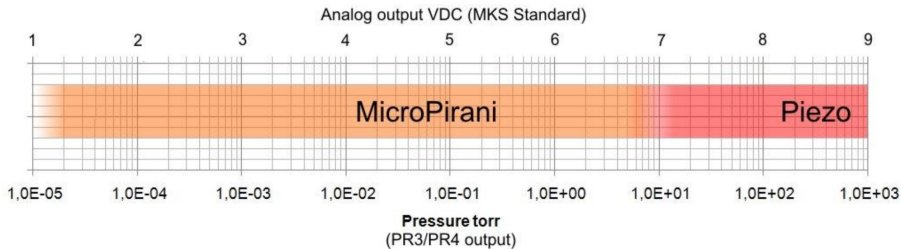
Pirani manometr

- velmi jednoduchá konstrukce
- měřicí rozsah $10^{-2} - 10^5$ Pa, v rozsahu $10^4 - 10^5$ Pa měří s velkou chybou
- chyba měření asi $\sim 15\%$, typicky v rozsahu $10^{-2} - 10^4$ Pa
- závisí na druhu plynu a na okolní teplotě

MicroPirani - MKS 910



MKS 910



manuál MKS - 910

MKS 910

Specifications

Measuring range (N₂ and Air): 1×10^{-5} to 1500 Torr

MicroPirani

| | | |
|---|--|------------------|
| Accuracy ⁽¹⁾ (N ₂) | 5×10^{-4} to 1×10^{-3} Torr: | ±10% of reading |
| | 1×10^{-3} to 100 Torr: | ± 5% of reading |
| | 100 Torr to Atm.: | ± 25% of reading |
| Repeatability ⁽¹⁾ (N ₂): | 1×10^{-3} to 100 Torr: | ± 2% of reading |

Piezo absolute

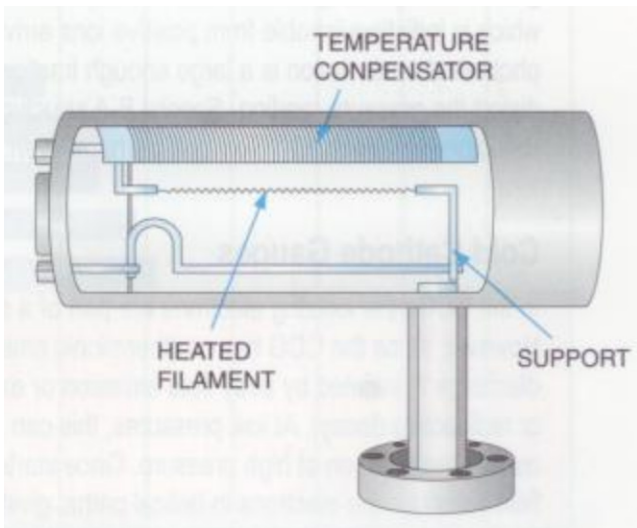
| | | |
|---|--------------------|--------------------|
| Accuracy Piezo ⁽¹⁾ | 0.1 to 10 Torr: | ±1% of reading |
| | 10 to 1000 Torr: | ± 0.75% of reading |
| | 1000 to 1500 Torr: | ± 2% of reading |
| Repeatability ⁽¹⁾ (N ₂): | 10 to 800 Torr | ± 0.2% of reading |

Supply Voltage: 9 – 30 VDC

Power consumption: < 1.2 Watt

Fuse (thermal recoverable): 200 mA

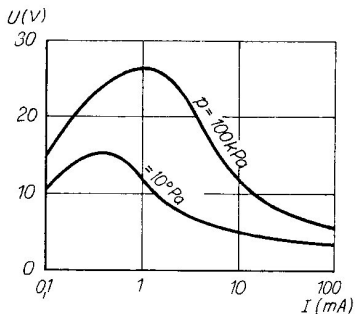
Convectron



firemní materiály firmy Kurt J. Lesker

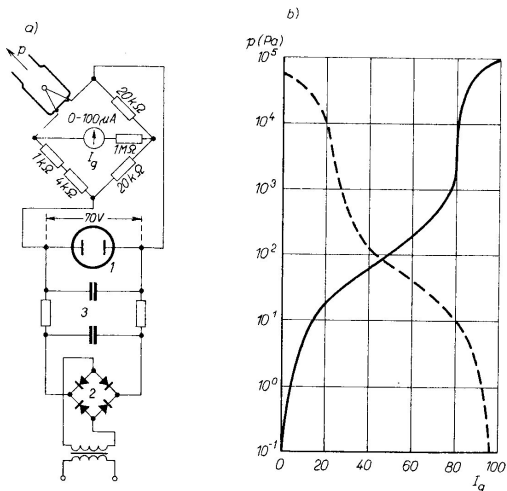
- využívá i tepelnou konvekci plynu
- předepsaná orientace
- měřicí rozsah $10^{-2} - 10^5$ Pa
- chyba měření asi $\sim 15\%$

Termistorový manometr



Obr. 5.22. Voltampérová charakteristika termistorového měřicího elementu

J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

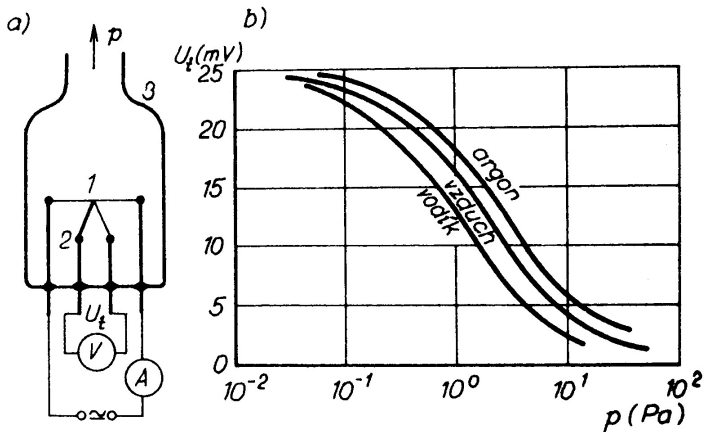


Obr. 5.23. Termistorový vakuometr (podle Pytkowského, 1955)

a) elektrické schéma: 1 – výbojový stabilizátor napětí; 2 – usměrňovač proudu; 3 – filtr;

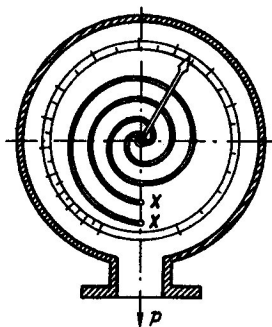
b) kalibrační křivky pro vzduch při můstku v rovnováze: můstek vyrovnán při tlaku $p \ll 10^{-1}$ Pa (plně); můstek vyrovnán při atmosférickém tlaku (čárkovaně)

Termočlánkový-manometr



J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

Dilatační manometr

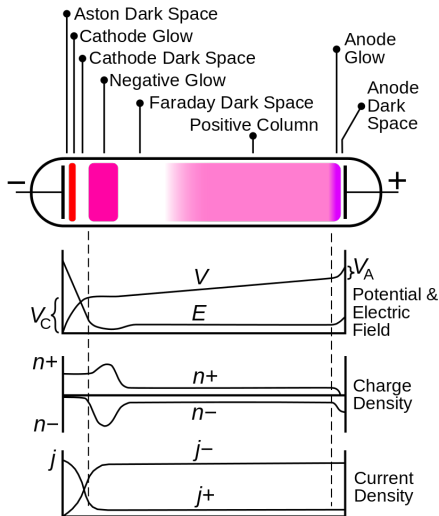


Obr. 5.26. Dvojkovový dilatační vakuometr (dle Klumba a Haase, 1936). Dvě dvojkovové (bimetalové) spirály jsou upevněny na svých koncích xx a jejich druhé konce jsou spojeny s ručičkou. Spirálami prochází proud, který je zahřívá. Ručička se otáčí v závislosti na tlaku

5W; 0,1-100 Pa

J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

Indikace tlaku podle výboje



Pouze přibližná metoda.

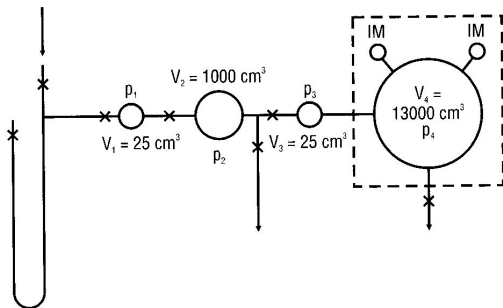
| P[Pa] | Tvar výboje |
|------------------------|--|
| $5 \times 10^3 - 10^3$ | hadovitý výboj |
| $10^3 - 5 \times 10^2$ | elektrody se pokryjí doutnavým světlem |
| 10^2 | kladný sloupec vyplní 2/3 trubice |
| 5×10^1 | vrstvy v kladném sloupci |
| 10 | vrstvy mizí, záporné světlo 1/2 trubice |
| 5 | záporné světlo v celé trubici, fluorescence skla |
| 1 | fluorescence mizí |

Kalibrace manometrů

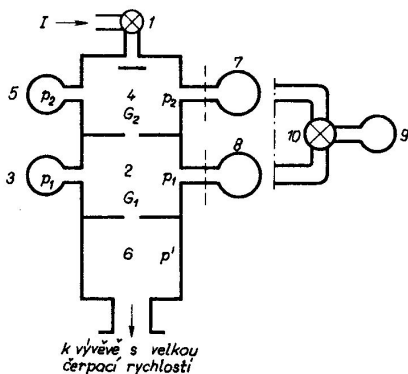
- Přímé porovnání
- Redukce tlaku
 - metody statické
 - metody dynamické
- Pomalý nárůst
- Molekulární proud

Statická expanze

$$p_n = p_1 \cdot \frac{V_1}{V_1 + V_2} \cdot \frac{V_2}{V_2 + V_3} \cdots \frac{V_{n-1}}{V_{n-1} + V_n}$$



Dynamická expanze



Obr. 5.92. Aparatura pro kalibraci vakuometrů metodou s konstantním proudem. Místo dvou vakuometrů (7, 8) je možno použít jen jeden (9) s dvoucestným kohoutem (10);
1, 10 – kohouty; 2, 4, 6 – komory;
3, 5, 7, 8, 9 – vakuometry;
 G_1 , G_2 – vodivosti otvorů mezi příslušnými komorami

J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

$$I = G_2(p_2 - p_1) = G_1(p_1 - p')$$

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{G_1}{G_2} \left(1 - \frac{p'}{p_1}\right)$$

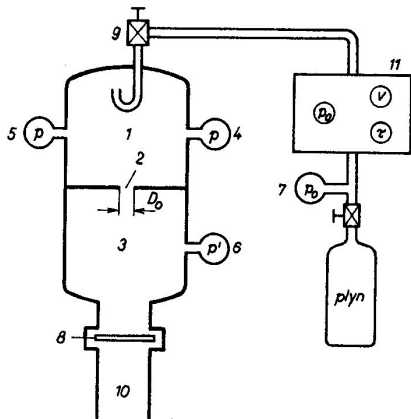
pro velkou čerpací rychlost $p' \ll p_1$

$$p_1 = \frac{1}{1 + \frac{G_1}{G_2}} p_2$$

pro $G_2 \ll G_1$

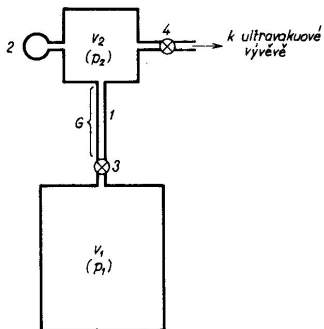
$$p_1 = \frac{G_2}{G_1} p_2$$

$$p = \frac{I}{S}$$



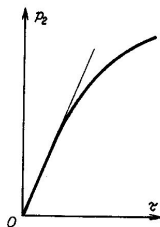
Obr. 5.93. Standardní metoda
cejkování vakuometrů v oboru
tlaků 10^{-1} až 10^{-5} Pa
1, 3 – komory; 2 – kalibrovaný
otvor; 4 – kalibrační (přesný)
vakuometr; 5, 6, 7 – vakuometry;
8 – regulační ventil (záklopka);
9 – vpuštěcí ventil; 10 – difúzní
vývěva; 11 – volumetrické zařízení

Pomalý vzrůst tlaku



Obr. 5.90. Aparatura pro kalibraci vakuometrů v oboru ultravakua metodou pomalého vzrůstu tlaku

1 – trubice se známou vodivostí G ;
2 – kalibrovaný vakuometr; 3, 4 – kohouty



Obr. 5.91. Změna tlaku v systému (o objemu V_2) během času τ

$$I = G(p_1 - p_2)$$

pro $p_2 \ll p_1$

$$I = Gp_1$$

$$I = V_2 \frac{dp_2}{d\tau}$$

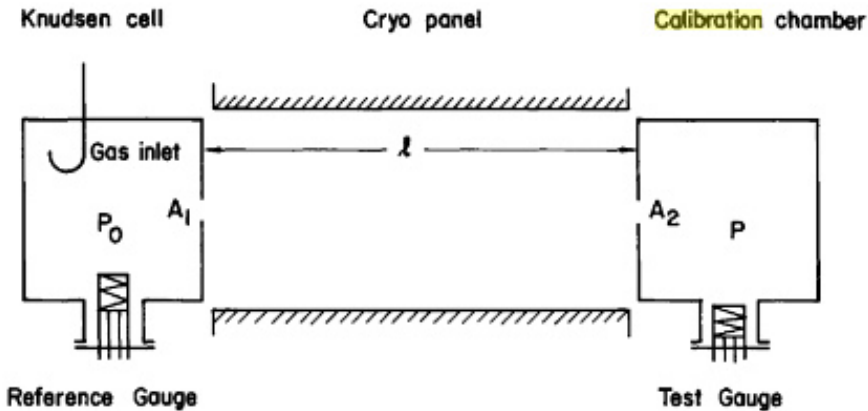
$$\frac{dp_2}{d\tau} = p_1 \frac{G}{V_2} = a$$

$$p_2 = p_0 + a\tau$$

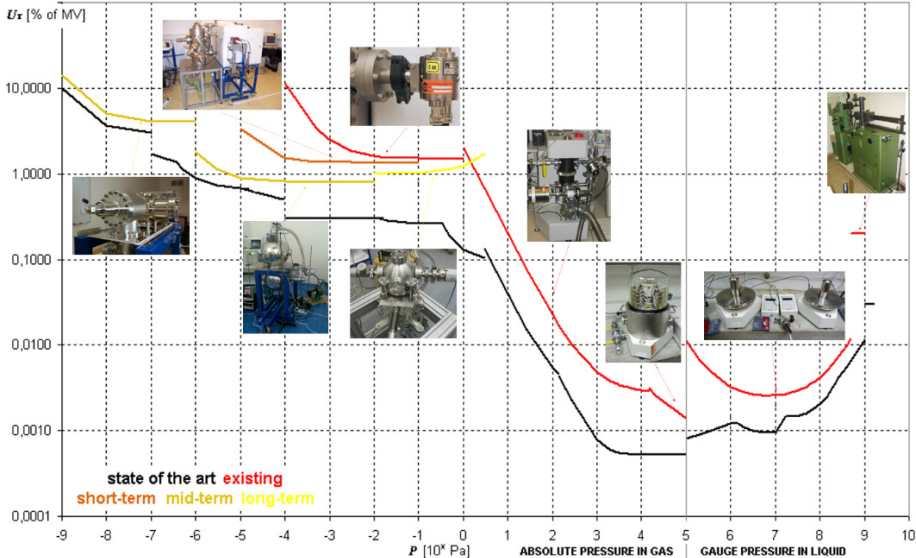
pro $p_0 \sim 0 \text{ Pa}$

$$p_2 = a\tau$$

Molekulární proudění



A. Berman: Total Pressure Measurements in Vacuum Technology, Academic Press Inc. 1985



Přehled etalonů metrologického institutu a jejich nejistot měření v závislosti na tlaku.
materiály ČMI

Cvičení

38) Odvoďte vztah pro molekulární manometr.

$$\nu = \frac{1}{4}n v_a ; P = \frac{1}{3}m_o n v_e^2 ; \frac{v_e}{v_a} = \sqrt{\frac{3\pi}{8}} , P = \frac{1}{2}\pi\nu m_o v_{a1}$$

$$P' = \frac{1}{4}\pi\nu m_o v_{a1} + \frac{1}{4}\pi\nu m_o v_{a2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P' = \frac{1}{4}\pi\nu m_o v_{a1} \left(1 + \frac{v_{a2}}{v_{a1}}\right) = \frac{1}{2}P \left(1 + \frac{v_{a2}}{v_{a1}}\right)$$

$$T_1 = T_2 \Rightarrow P' = P , T_1 < T_2 \Rightarrow P' > P$$

$$T_2 > T_1 ; \lambda \gg d$$

$$\Delta P = P' - P = \frac{1}{2}P \left(1 + \frac{v_{a2}}{v_{a1}}\right) - P = \frac{1}{2}P \left(\sqrt{\frac{T_2}{T_1}} - 1\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P = 2\Delta P \frac{\sqrt{T_1}}{\sqrt{T_2} - \sqrt{T_1}}$$

39) Určete relativní chybu měření kapacitního manometru při změně teploty o $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Maximální měřitelný tlak 1000 torr. Chyby měření podle manuálu $0,2\%$ z čtené hodnoty + $0,005\%$ z rozsahu (F.S.) při změně teploty o $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Relativní chybu určete pro měřené tlaky 100 torr a 1 torr.

a) 100 torr: $\Delta P = 0,2\text{ torr} + 0,05\text{ torr}$, chyba $\sim 0,2\%$

b) 1 torr: $\Delta P = 0,002\text{ torr} + 0,05\text{ torr}$, chyba $\sim 5\%$

- 40) Odhadněte čerpací rychlost ionizačního manometru se žhavenou katodou. Konstanta manometru je $K = 0,075 \text{ Pa}^{-1}$, proud elektronů je $I_e = 1 \text{ mA}$, teplota plynu $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$P = \frac{N}{V}kT, \quad \frac{dP}{dt} = -kT \frac{dN}{dt} \frac{1}{V}$$

$$I_p = e \frac{dN}{dt}, \quad I_p = KI_e P$$

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{S}{V}P$$

$$S = kT \frac{I_p}{P_e} = \frac{kT}{e} I_e K \doteq 0,00189 \text{ L/s}$$

- 41) Jak dlouho bude trvat vyčerpání vakuovou komoru z tlaku $P_1 = 10^{-1}$ Pa na tlak $P_2 = 10^{-2}$ Pa? Objem komory je 1 L, čerpací rychlost vývěvy 0,00189 L/s, mezní tlak zanedbejte.

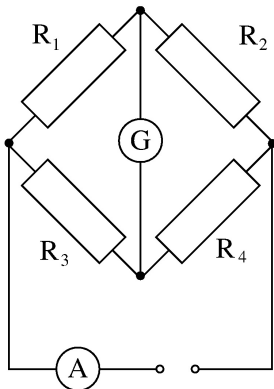
$$\Delta t = \frac{V}{S} \ln \frac{(P_1)}{(P_2)}$$

$$\Delta t \doteq 1220 \text{ s} = 20 \text{ min } 20 \text{ s}$$

- 42) Odhadněte čerpací rychlost ionizačního manometru se studenou katodou. Teplota plynu $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, tlak je $0,02\text{ Pa}$, proud iontu manometrem je $0,1\text{ mA}$.

- 43) Jak dlouho bude trvat vyčerpání vakuové komory z tlaku $P_1 = 10^{-1}$ Pa na tlak $P_2 = 10^{-2}$ Pa pomocí ionizačního manometru se studenou katodou? Objem komory je 1 L, čerpací rychlost viz. příklad 42, mezní tlak zanedbejte.

44) Určete vztah mezi odpory v můstku, který je vyvážený.



- 45) Spočítejte elektrický odpor platinového drátku při teplotách $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $197\text{ }^{\circ}\text{C}$, $187\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rozměry drátku jsou průměr $D = 50\text{ }\mu\text{m}$, délka $L = 50\text{ mm}$.