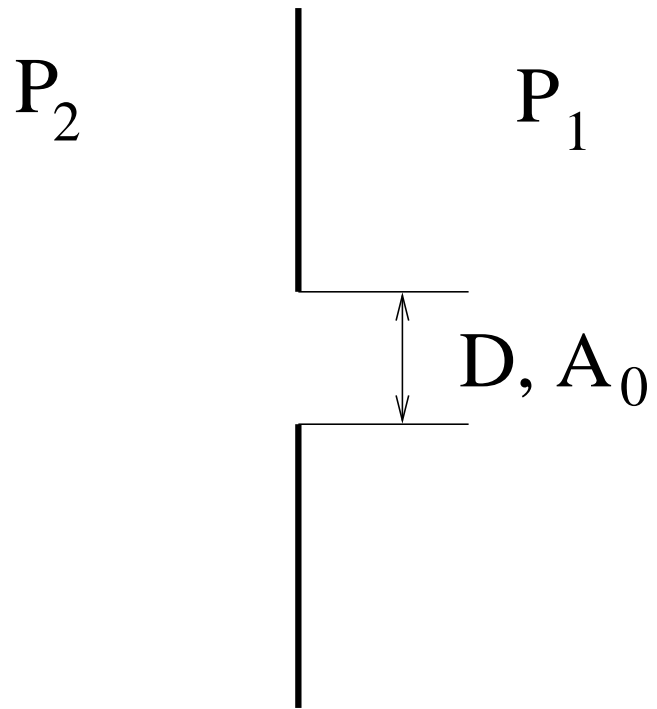


Vodivost vakuových spojů

Vodivost otvorů



Molekulární proudění

$$\lambda > D$$

$$\nu_{2-1} = \frac{1}{4} n_2 v_a = \frac{1}{4} \frac{P_2}{kT} v_a$$

$$\nu_{1-2} = \frac{1}{4} n_1 v_a = \frac{1}{4} \frac{P_1}{kT} v_a$$

$$\nu'_1 = \nu_{2-1} - \nu_{1-2} = \frac{1}{4} \frac{v_a}{kT} (P_2 - P_1)$$

$$I = kT\nu' = \frac{1}{4}v_a A_0 (P_2 - P_1)$$

$$G = \frac{I}{P_2 - P_1} = \frac{1}{4}v_a A_0$$

$$T = 293 \text{ K}, M_0 = 29(\text{vzduch})$$

$$G = 115.6 A_0 \text{ [m}^3 \text{s}^{-1}\text{]}$$

Otvor ve stěně konečných rozměrů

Plocha stěny: A

Plocha otvoru: A_0

Plochu A_0 nahradíme efektivní plochou

$$A'_0 = \frac{1}{1 - \frac{A_0}{A}} A_0$$

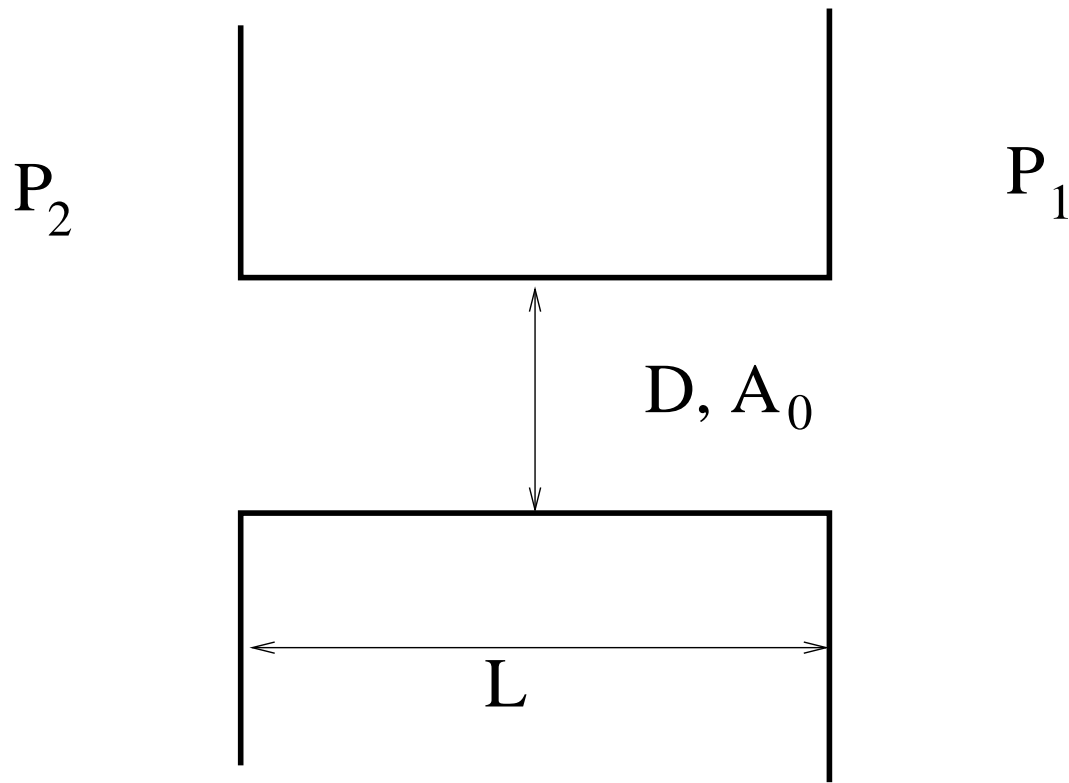
$$G'_0 = \frac{1}{4} v_a A_0 \frac{1}{1 - \frac{A_0}{A}}$$

Laminární proudění

$$G = A_0 \frac{1}{1 - \beta} \beta^{\frac{1}{\kappa}} \left(1 - \beta^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2\kappa}{\kappa-1} \frac{m_0}{kT}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\beta = \frac{P_1}{P_2}, \quad \kappa = \frac{C_P}{C_V}$$

Vodivost trubic



Obecně platí

$$R = R_T + R_O = \frac{1}{G_T} + \frac{1}{G_O}$$
$$L \rightarrow 0 \Rightarrow R_T \rightarrow 0 \Rightarrow R \rightarrow R_O$$

Molekulární proudění

Dlouhá trubice s kruhovým průřezem

$$L \gg D, \lambda \gg L$$

$$v_a = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}, \quad P = nkT$$

$$\nu_1 = \frac{1}{4} n_1 v_a = \frac{P_1}{\sqrt{2\pi m_0 kT}}$$

$$\nu_2 = \frac{1}{4} n_2 v_a = \frac{P_2}{\sqrt{2\pi m_0 kT}}$$

$$\omega = \nu_2 - \nu_1 = \frac{P_2 - P_1}{\sqrt{2\pi m_0 k T}}$$

$$I = k T \nu, \quad G = \frac{I}{P_2 - P_1}$$

$$I = C k T \omega \Rightarrow G = \frac{C k T}{\sqrt{2\pi m_0 k T}} = C \sqrt{\frac{k T}{2\pi m_0}}$$

Pro vzduch, $T = 293 \text{ K}$

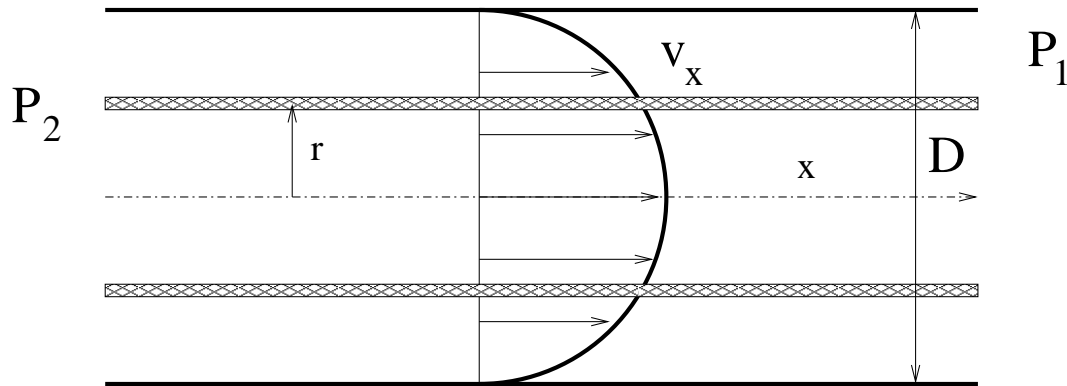
$$G = 121 \frac{D^3}{L} [\text{m}^3 \text{s}^{-1}]$$

Známe-li vodivost trubice pro vzduch, pak vodivost pro molekulární proudění pro plyn X je dána vztahem:

$$G_X = \sqrt{\frac{M_{0(vz)}}{M_{0(X)}}} G_{vz}$$

Laminární proudění

rozdělení rychlostí má osovou symetrii, sloupec plynu ve válci s poloměrem r se pohybuje působením síly $F_+ = \pi r^2 (P_2 - P_1)$
třecí síla působí na ploše $2\pi r L$ a je rovna $F_- = -\eta 2\pi r L \frac{dv_x}{dr}$



$$F_+ = F_- \Rightarrow \pi r^2 (P_2 - P_1) = -\eta 2\pi r L \frac{dv_x}{dr}$$

$$dv_x = -\frac{P_2 - P_1}{2\eta L} r dr$$

$$v_x = -\frac{P_2 - P_1}{4\eta L} r^2 + \textit{konst.}$$

$$\textit{pro } r = \frac{D}{2} \textit{ je } v_x = 0 \Rightarrow \textit{konst.} = \frac{P_2 - P_1}{4\eta L} \frac{D^2}{4}$$

$$v_x = \frac{P_2 - P_1}{4\eta L} \left(\frac{D^2}{4} - r^2 \right)$$

označme $P_s = \frac{1}{2}(P_2 + P_1)$

$$dI = P_s d \left(\frac{dV}{dt} \right)_{P_s} = P_s v_x dA_r = 2P_s \pi v_x r dr$$

$$dI = P_s \frac{\pi(P_2 - P_1)}{2\eta L} \left(\frac{D^2}{4} - r^2 \right) r dr$$

$$I = P_s \frac{\pi(P_2 - P_1)}{2\eta L} \int_0^{\frac{D}{2}} \left(\frac{D^2}{4} - r^2 \right) r dr$$

$$I = P_s \frac{\pi}{128\eta} \frac{D^4}{L} (P_2 - P_1) \Rightarrow G = \frac{\pi}{128\eta} P_s \frac{D^4}{L}$$

Pro vzduch, $T = 293 \text{ K}$, $M_0 = 29$

$$G = 1358 P_s \frac{D^4}{L} [m^3 s^{-1}]$$

pro jiný plyn a teplotu $T = 293 \text{ K}$

$$G_x = G_{vz} \frac{d_{0(x)}^2}{d_{0(vz)}^2} \sqrt{\frac{M_{0(vz)}}{M_{0(x)}}}$$

Molekulárně-laminární(Knudsenovo) proudění

$$G_{ML} = G_L + a \cdot G_M$$

kde a je koeficient pro vzduch určený empirickým vztahem

$$a = \frac{1 + 1.88P_s D}{1 + 2.33P_s D} \quad [Pa; cm]$$

$$a \in \langle 0.8, 1 \rangle ; \quad a \approx 0.9$$

$$G_{ML} = 1358P_s \frac{D^4}{L} + 109 \frac{D^3}{L}$$

Proudění plynu kapilárou

$P_1 = 0 \text{ Pa}$, $P_2 = 10^5 \text{ Pa}$, element dL má tlakový spád dP a odpor dR ,
překládáme Knudsenovo proudění

$$I = \frac{dP}{dR}, \quad R = \frac{1}{G} \Rightarrow dR = \frac{1}{D^3} \frac{dL}{109 + 1358PD}$$

$$I = D^3(109 + 1358PD) \frac{dP}{dL}$$

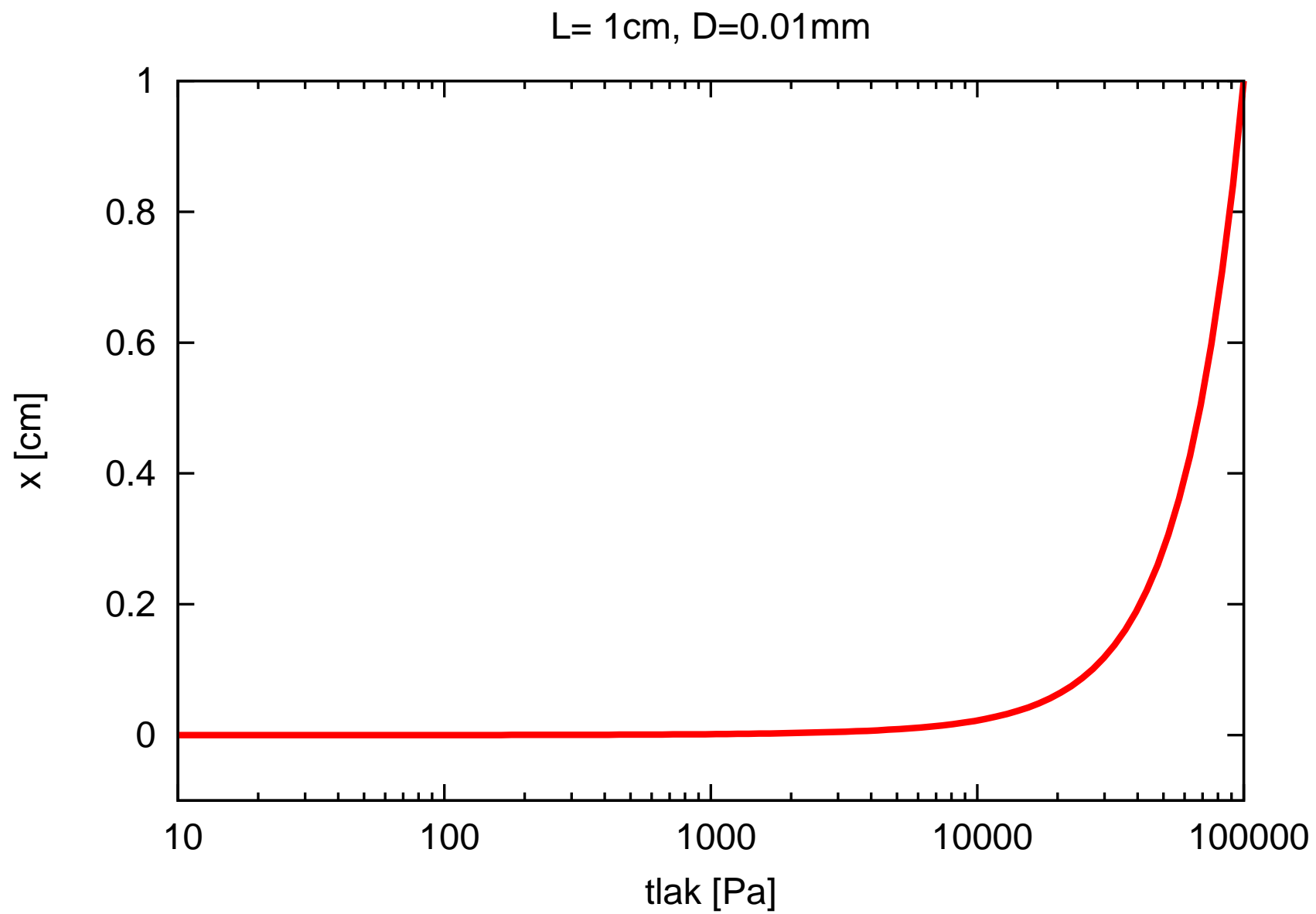
$$I \int_0^L dL = IL = D^3 \int_0^{P_2} (109 + 1358PD) dP$$

$$I = P_2 \frac{D^3}{L} (109 + 679P_2D)$$

tlak ve vzdálenosti x od konce s tlakem P_1

$$I \int_0^x dL = Ix = D^3 \int_0^{P_x} (109 + 1358PD) dP$$

$$x = \frac{D^3}{I} P_x (109 + 679P_xD)$$



Čerpací rychlost

Čerpací rychlostí se rozumí množství plynu, odčerpaného vývěvou z daného prostoru za jednotku času při daném tlaku.

$$S = -\frac{dV}{dt}$$

$$pV = (p - dp)(V + dV) \Rightarrow p \frac{dV}{dt} = V \frac{dp}{dt}$$

$$S = -\frac{dV}{dt} = -\frac{V}{p} \frac{dp}{dt}$$

$$-\frac{dp}{dt} = \frac{S}{V}p$$

označme p_0 mezní tlak

$$-\frac{dp}{dt} = \frac{S}{V}(p - p_0)$$

$$\ln(p - p_0) = -\frac{S}{V}t + konst, \text{ pro } t = 0 \text{ s, } p = p_1$$

$$konst = \ln(p_1 - p_0) \Rightarrow \ln\left(\frac{p - p_0}{p_1 - p_0}\right) = -\frac{S}{V}t$$

$$p - p_0 = (p_1 - p_0)e\left(-\frac{S}{V}t\right)$$

pro $p_0 \ll p_1$

$$p = p_0 + p_1 e\left(-\frac{S}{v}t\right)$$

tento vztah udává hodnotu tlaku v čase t pro S=konst

Průměrná čerpací rychlost

v čase od t_1 do t_2

$$\ln \left(\frac{p - p_0}{p_1 - p_0} \right) = -\frac{S}{V}t$$

$$S_{t_2-t_1} = \frac{V}{t_2 - t_1} \ln \left(\frac{p_{t_1} - p_0}{p_{t_2} - p_0} \right)$$

$$\text{pro } p_0 \ll p_{t_1} \text{ a } p_0 \ll p_{t_2} \Rightarrow S_{t_2-t_1} = \frac{V}{t_2 - t_1} \ln \left(\frac{p_{t_1}}{p_{t_2}} \right)$$

doba potřebná k snížení tlaku z p_{t_1} na p_{t_2} , při konstantní čerpací rychlosti S

$$t = t_2 - t_1 = \frac{V}{S} \ln \left(\frac{p_{t_1}}{p_{t_2}} \right)$$

Okamžitá čerpací rychlost

$$-\frac{dp}{dt} = \frac{S}{V}(p - p_0)$$

$$-\frac{dp}{dt} = \frac{S}{V} \left(1 - \frac{p_0}{p}\right) p = \frac{S_p}{V} p$$

$$S_p = S \left(1 - \frac{p_0}{p}\right)$$

je okamžitá čerpací rychlost při tlaku p .

V čase $t = 0$ s a při $p \gg p_0$ je $S_p \approx S$

V čase $t \rightarrow \infty$, $p = p_0$ je $S_p = 0$

Měření čerpací rychlosti

- **Metoda stálého objemu**
- **Metoda stálého tlaku**
- **Metoda stálého množství plynu**

Metoda stálého objemu

Je založena na měření závislosti $p = f(t)$ pro $V = konst$

$$S_{t_2-t_1} = \frac{V}{t_2 - t_1} \ln \left(\frac{p_{t_1} - p_0}{p_{t_2} - p_0} \right)$$

Metoda stálého tlaku

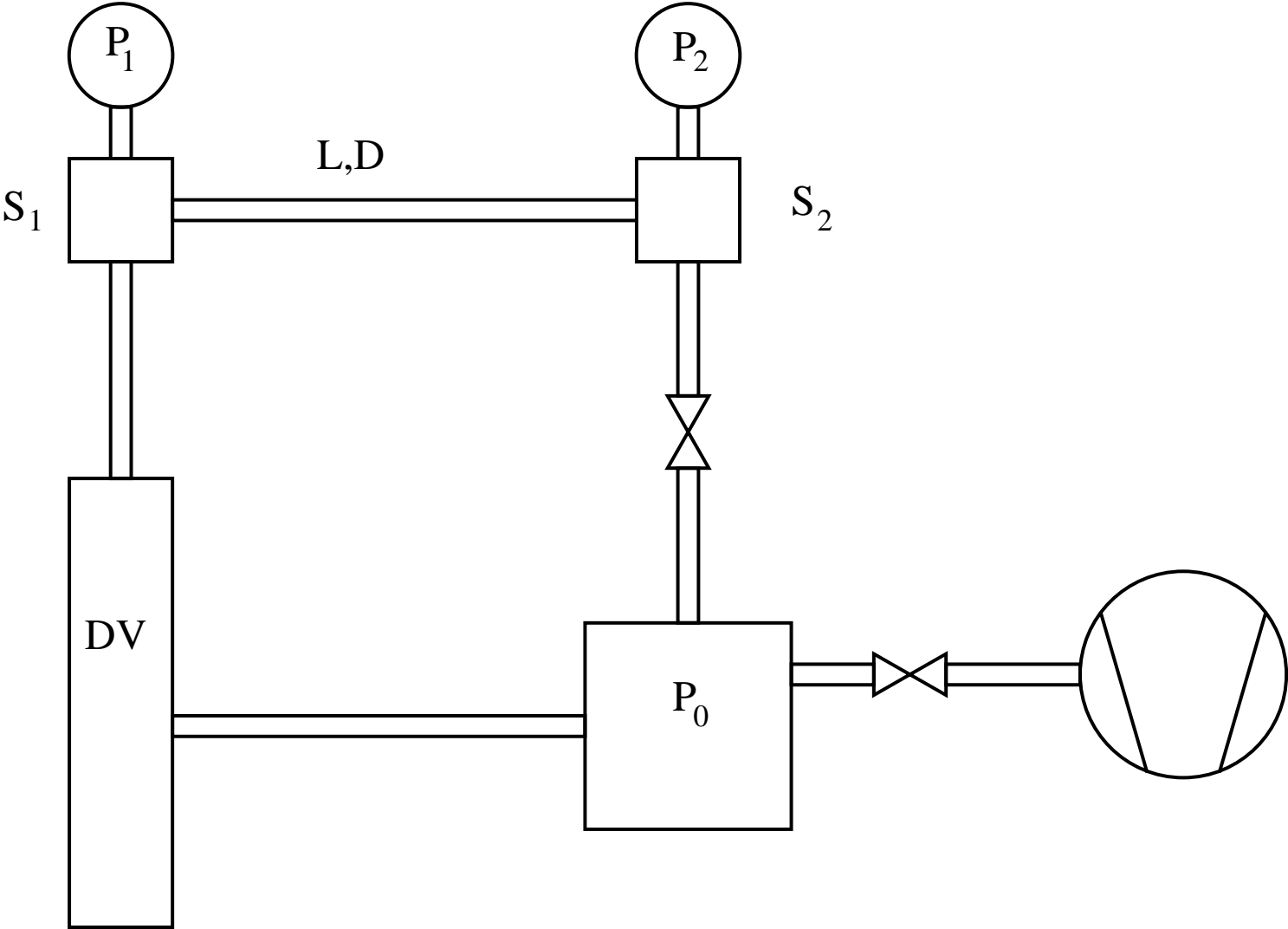
Je založena na měření proudu plynu na vstupu do vývěvy při daném tlaku

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

Metoda stálého množství plynu

Plyn cirkuluje v uzavřeném okruhu

$$I = G(P_2 - P_1) = p_1 S \Rightarrow S = G \left(\frac{P_2}{P_1} - 1 \right)$$



Získávání nízkých tlaků

- vytvořit dostatečně nízký tlak
- udržet nízký tlak po dostatečně dlouhou dobu

Vývěva - zařízení snižující tlak plynu v uzavřeném objemu.

Typy vývěv

- 1. Vývěvy s transportem molekul z čerpaného prostoru**
- 2. Vývěvy bez transportu molekul z čerpaného prostoru**

Vývěvy s transportem molekul z čerpaného prostoru

- **Mechanické vývěvy**
 - **Vývěvy s periodicky se měnícím pracovním prostorem**
 - * **Pístové vývěvy**
 - * **Rotační olejové vývěvy**
 - * **Membránové vývěvy**
 - * **Scroll vývěvy**
 - **Vývěvy s neproměnným pracovním prostorem**
 - * **Rootsovy vývěvy**
 - * **Molekulární vývěvy**
 - * **Turbomolekulární vývěvy**
- **Paroproudové vývěvy**
 - **Vodní vývěvy**
 - **Ejektorové a difúzní vývěvy**
- **Vývěvy založené na tepelné rychlosti molekul, nebo ionizaci molekul**

Vývěvy bez transportu molekul z čerpaného prostoru

- Kryosorpční vývěvy
- Getrové vývěvy
- Iontové vývěvy
- Zeolitové vývěvy

Charakteristické parametry vývěv

1. Výstupní tlak vývěvy
2. Pracovní tlak vývěvy
3. Mezní tlak vývěvy
4. Čerpací rychlost vývěvy

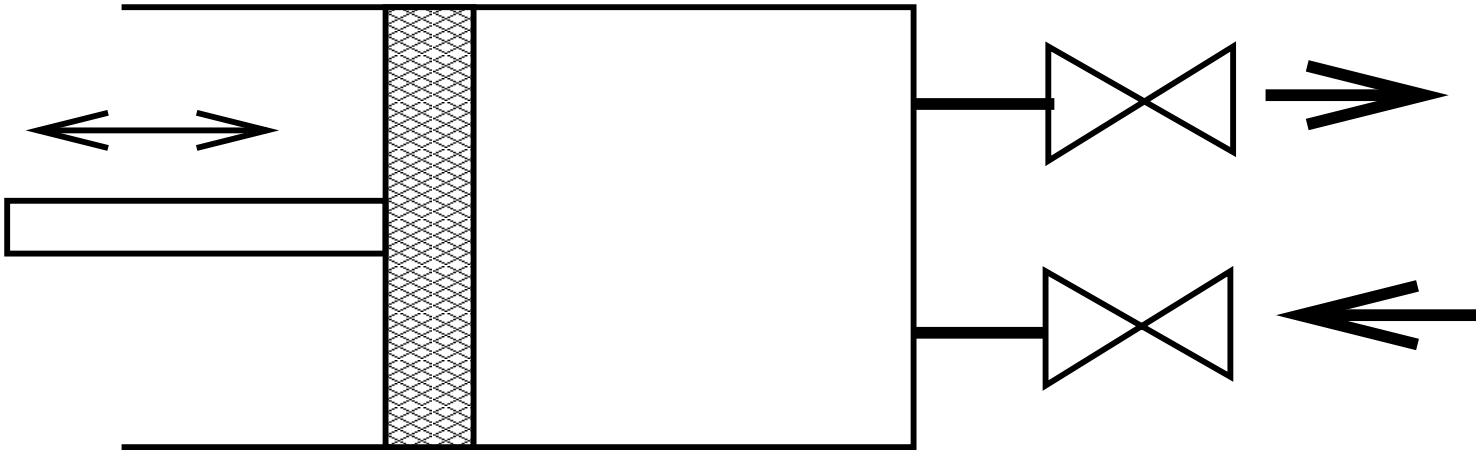
Vývěvy s transportem molekul plynu

Mechanické vývěvy

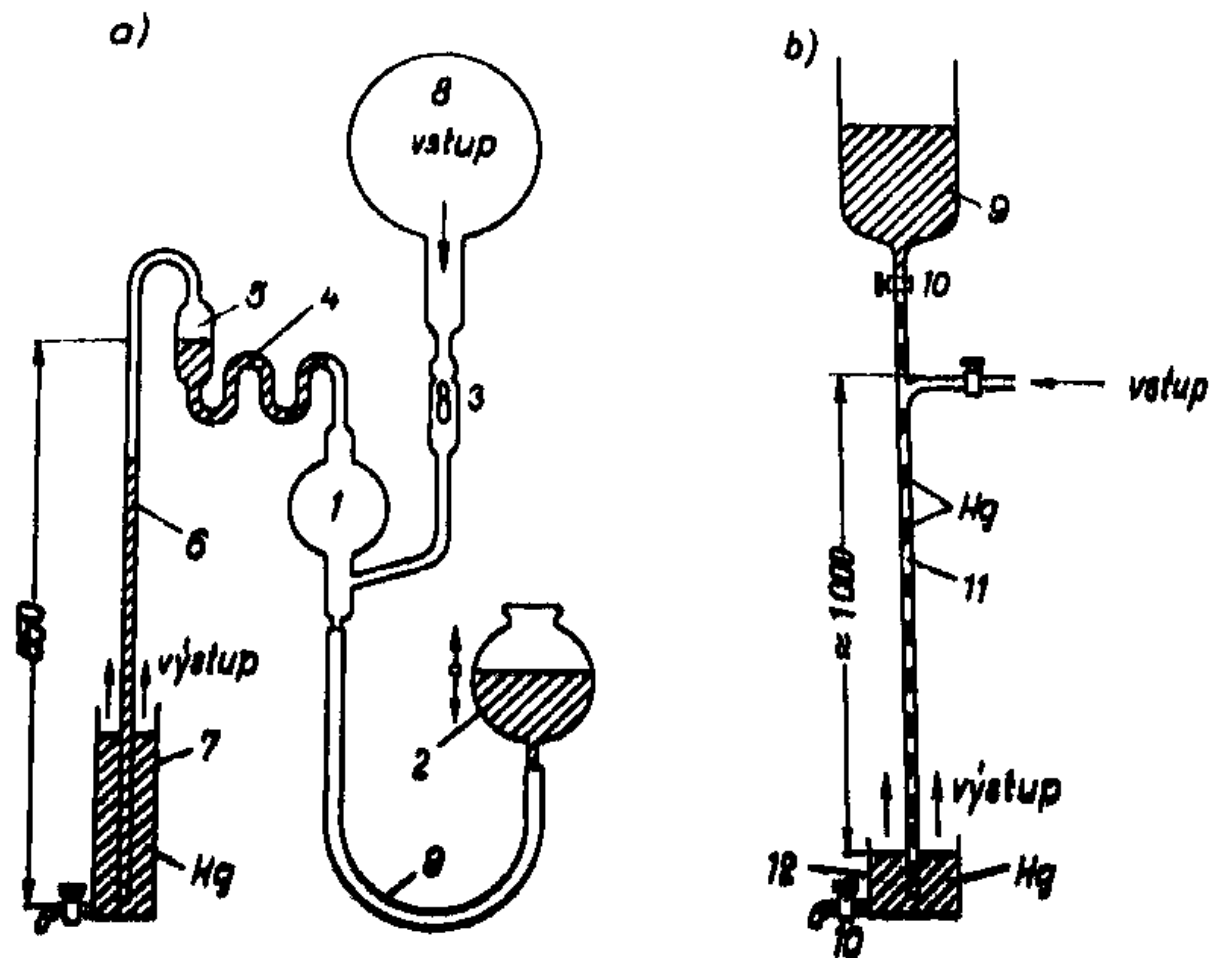
Vývěvy s periodicky se měnícím pracovním prostorem

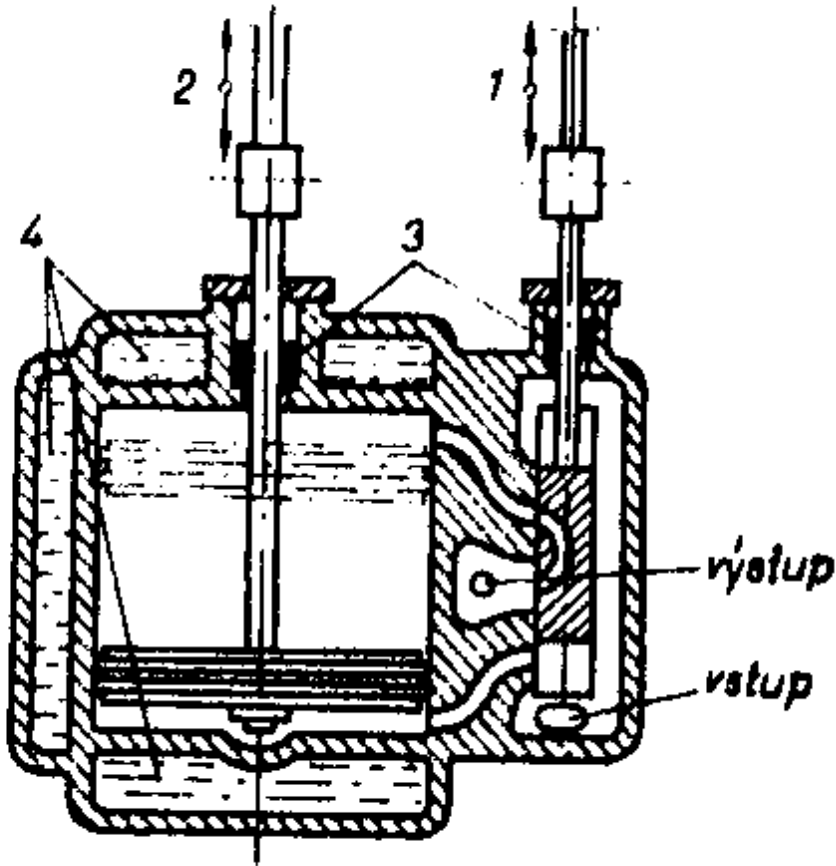
Pístové vývěvy

Tyto vývěvy pracují na základě Boyle-Mariottova zákona, při zvětšení objemu se sníží tlak. Proces zaplňování, proces vytlačování plynu



Toplerova a Sprenglerova vývěva





P_b - původní tlak plynu v recipientu, V - velikost čerpaného objemu, v - objem komory vývěvy

$$p_1(V + v) = p_b V$$

$$p_1 = \frac{V}{V + v} p_b$$

po n cyklech

$$p_n = K^n p_b, \quad K = \frac{V}{V + v}$$

teoreticky $n \rightarrow \infty \Rightarrow p \rightarrow 0$

Prakticky existuje mezní tlak $p_0 > 0$ (zpětné proudění plynu, škodlivý prostor v')

Čerpací rychlost

Konstrukční čerpací rychlost

$$S_k = -\frac{dV}{dt} = n(v - v') = nv\left(1 - \frac{v'}{v}\right)$$

n je počet zdvihů za 1s, v je objem pracovní komory, v' je škodlivý prostor

n je limitováno dobou naplnění komory

Teoretická čerpací rychlost

$$I_+ = pS_k = npv\left(1 - \frac{v'}{v}\right)$$

Zpětný proud, p_v výstupní tlak

$$I_- = \beta np_v v'$$

$$I = I_+ - I_- = nv\left(1 - \frac{v'}{v}\right)p \left[1 - \frac{\beta p_v \frac{v'}{v}}{\left(1 - \frac{v'}{v}\right)p} \right]$$

Uvážíme-li, že $\frac{v'}{v} \ll 1 \Rightarrow 1 - \frac{v'}{v} \approx 1$

$$S_T = \frac{I}{p} = S_k \left(1 - \beta \frac{v' p_v}{vp}\right)$$

mezní tlak $p_0 = \beta \frac{v'}{v} p_v \Rightarrow$

$$\Rightarrow S_T = S_k \left(1 - \frac{p_0}{p}\right)$$

Pro $p \gg p_0 \Rightarrow S_T = S_k$

Pro $p \rightarrow p_0 \Rightarrow S_T \rightarrow 0$

Snížení mezního tlaku

- zmenšení v' (vhodnou konstrukcí)
- zmenšení β (např. zaplněním v' olejem)
- snížení výstupního tlaku p_v (předčerpání)

V olejových vývěvách k p_0 přispívá i tenze par oleje

$$p'_0 = p_0 + P_p$$

Skutečná čerpací rychlost

Komora se nenaplní na tlak čerpaného prostoru (vakuový odpor spojů), proto je skutečná čerpací rychlost meší než teoretická čerpací rychlost

$$S_E = \beta' S_T$$

$\beta' = f(p, n) \leq 1$ - koeficient naplnění