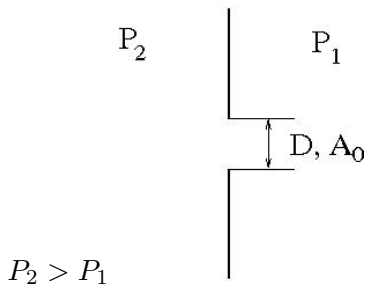


Vodivost vakuových spojů

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

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

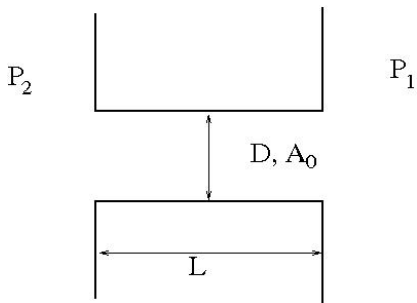
$$G'_0 = \frac{1}{4} v_a A_0 \frac{1}{1 - \frac{A_0}{A}}$$

Laminární proudění

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$I = CkT\omega \Rightarrow G = \frac{CkT}{\sqrt{2\pi m_0 kT}} = C\sqrt{\frac{kT}{2\pi m_0}}$$

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

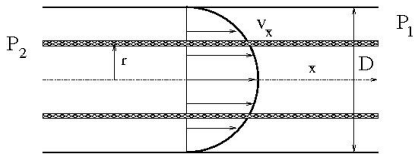
$$G = 121 \frac{D^3}{L} \quad [m^3 s^{-1}]$$

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 $2\pi rL$ a je rovna $F_- = -\eta 2\pi rL \frac{dv_x}{dr}$



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

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

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

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

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

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

$$G_{ML} = G_L + a.G_M$$

kde a je koeficient pro vzduch určený empirickým vztahem

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

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

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

Proudění plynu kapilárou

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

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

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

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

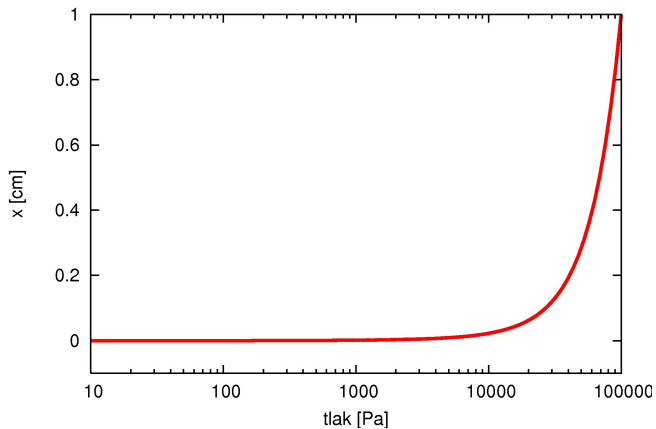
$$I = P_2 \frac{D^3}{L} (109 + 679P_2D)$$

tlak ve vzdálenosti x od konce s tlakem P_1

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

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

L= 1cm, D=0.01mm



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

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

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

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

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

pro $p_0 \ll p_1$

$$p = p_0 + p_1 e^{-\frac{S}{V}t}$$

tento vztah udává hodnotu tlaku v čase t pro $S=\text{konst}$

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

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

