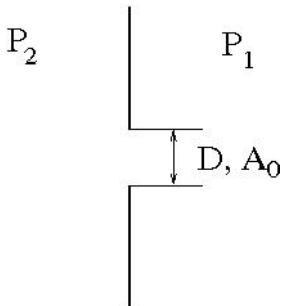


Vodivost vakuových spojů

Vodivost otvorů

$$P_2 > P_1$$



Molekulární proudění

$$\lambda > D$$

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

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

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

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

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

$$G = \frac{1}{4}v_a A_0$$

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

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

Vakuová vodivost kruhového otvoru při $T = 293 \text{ K}$, v molekulárním režimu proudění pro vzduch:

Průměr [mm]	G [l/s]
16	23.2
25	56.7
40	145.3
63	360
100	908
160	2324
200	3622

Otvor ve stěně konečných rozměrů

Plocha stěny: A

Plocha otvoru: A_0

Plochu A_0 nahradíme efektivní plochou

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

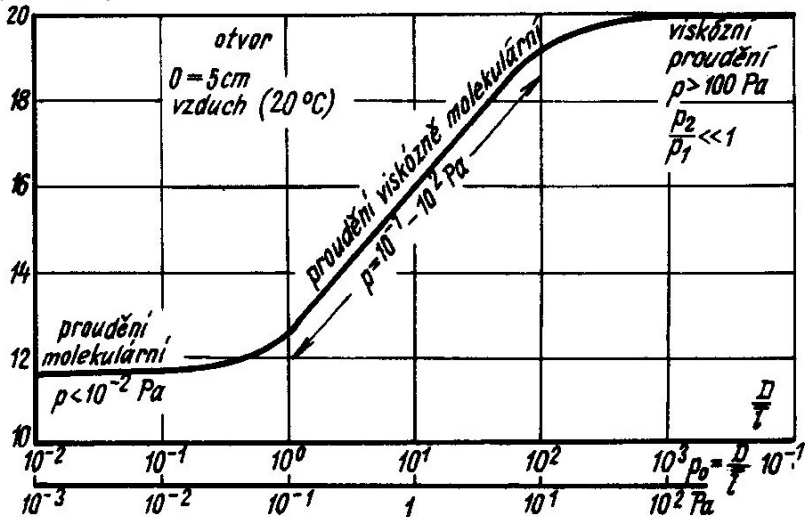
$$G'_0 = \frac{1}{4} v_a A_0 \frac{1}{1 - \frac{A_0}{A}}$$

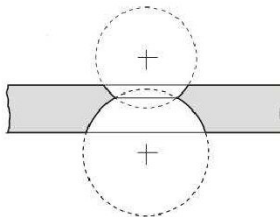
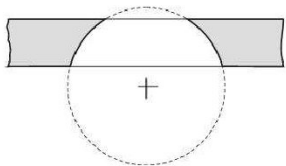
Laminární proudění

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

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

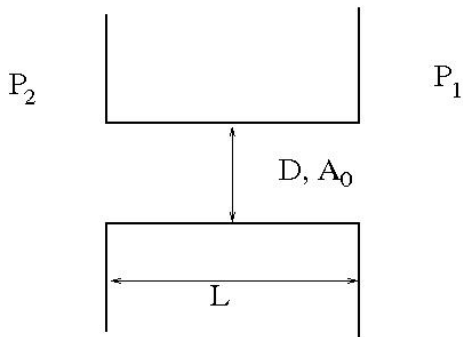
$G_{01} (\text{l s}^{-1} \text{ cm}^{-2})$





Speciální clony NPL (vyrábí National Physical Laboratory)
Dynamická expanze - kalibrace manometrů

Vodivost trubic



Obecně platí

$$R = R_T + R_O = \frac{1}{G_T} + \frac{1}{G_O}$$

speciální případy:

$$L \rightarrow 0 \Rightarrow R_T \rightarrow 0 \Rightarrow R \rightarrow R_O$$

$$L \gg D \Rightarrow R_T \gg R_O \Rightarrow R \rightarrow R_T$$

Molekulární proudění

Dlouhá trubice s kruhovým průřezem

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

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

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

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

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

$$I = kT\nu A_0, \quad G = \frac{I}{P_2 - P_1}$$

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

Pro vzduch, $T = 293 \text{ K}$ a kruhový průřez trubice:

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

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

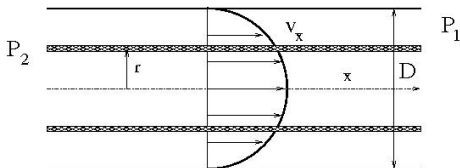
$$G_X = \sqrt{\frac{M_{0(vz)}}{M_{0(X)}}} G_{vz}$$

Pro $L = 1$ m, $D = 40$ mm, $T = 293$ K:

Plyn	G [l/s]
vzduch	7.7
H_2	29.3
He	20.7
Ar	6.5
Xe (M=131)	3.6
dif.olej (M~ 500)	1.8

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

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

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

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

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

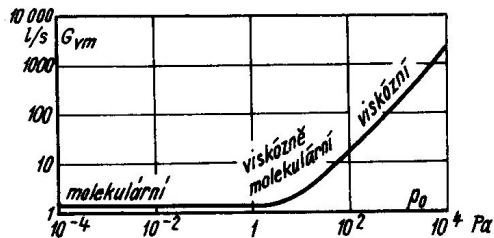
$$G = \frac{\pi}{128\eta} P_s \frac{D^4}{L}$$

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 $T = 293 \text{ K}$

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

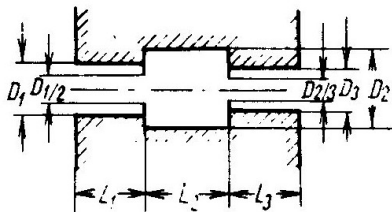


Obr. 2.39. Vodivost potrubí G jako funkce tlaku p_0 v širokém oboru tlaků. Vzduch o teplotě 20 °C , potrubí o $L = 10\text{ cm}$ a $D = 1\text{ cm}$

Vakuová vodivost ohybu (kolena)

V prvním přiblížení použijeme aproximaci trubici s délkou rovnou osově délce oblouku (kolena).

$$L_{os} < L_{ef} < L_{os} + 1.33 \times D$$



$$R = R_{D1} + R_{L1} + R_{D1/2} + R_{L2} + R_{D2/3} + R_{L3}$$

Určení vodivosti vakuového prvku

- výpočtem
- simulací - metoda Monte-Carlo
- měřením

Výpočtem

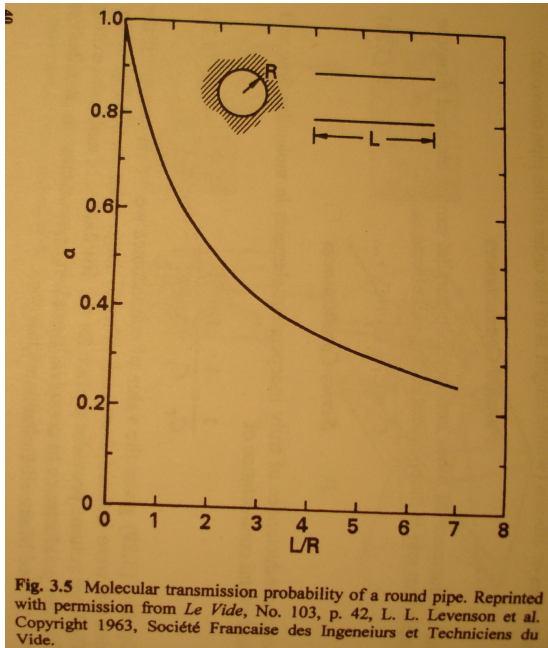
pro molekulární proudění:

$$G = a \frac{v_a}{4} A$$

- a - pravděpodobnost
- A - plocha otvoru

Table 3.1 Transmission Probability a for Round Pipes

l/d	a	l/d	a
0.00	1.00000	1.6	0.40548
0.05	0.95240	1.7	0.39195
0.10	0.90922	1.8	0.37935
0.15	0.86993	1.9	0.36759
0.20	0.83408	2.0	0.35658
0.25	0.80127	2.5	0.31054
0.30	0.77115	3.0	0.27546
0.35	0.74341	3.5	0.24776
0.40	0.71779	4.0	0.22530
0.45	0.69404	4.5	0.20669
0.50	0.67198	5.0	0.19099
0.55	0.65143	6.0	0.16596
0.60	0.63223	7.0	0.14684
0.65	0.61425	8.0	0.13175
0.70	0.59737	9.0	0.11951
0.75	0.58148	10.0	0.10938
0.80	0.56655	15.0	0.07699
0.85	0.55236	20.0	0.05949
0.90	0.53898	25.0	0.04851
0.95	0.52625	30.0	0.04097
1.0	0.51423	35.0	0.03546
1.1	0.49185	40.0	0.03127
1.2	0.47149	50.0	0.02529
1.3	0.45289	500.0	0.26479×10^{-2}
1.4	0.43581	5000.0	0.26643×10^{-3}
1.5	0.42006	∞	$4d/3l$



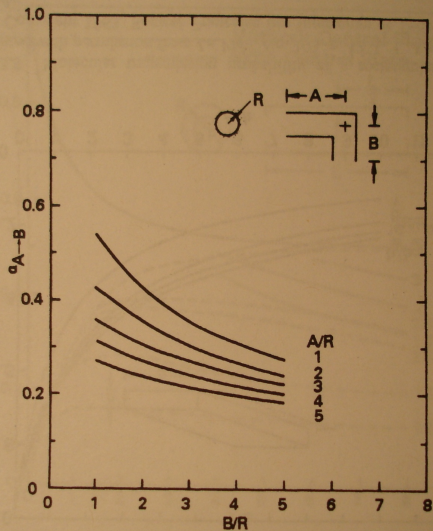


Fig. 3.10 Molecular transmission probability of an elbow. Reprinted with permission from *J. Appl. Phys.*, 31, p. 1169, D. H. Davis. Copyright 1960, The American Institute of Physics.

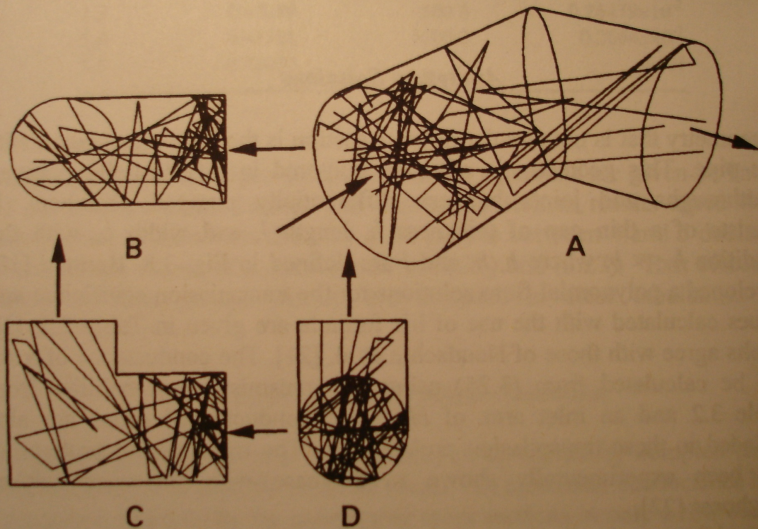
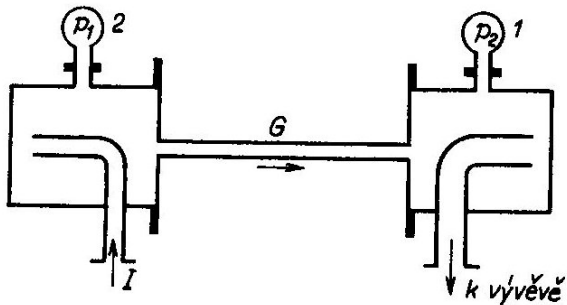


Fig. 3.4 A computer graphical display of the trajectories of 15 molecules entering an elbow in free molecular flow. Courtesy of A. Appel, IBM T. J. Watson Research Center.

Měření vodivosti trubice



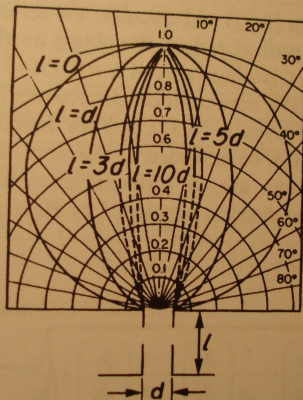
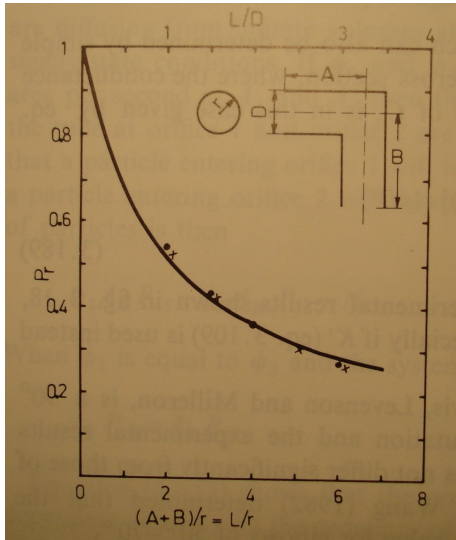


Fig. 3.14 Angular distribution of particles exiting tubes of various ratios of length to diameter. Reproduced with permission from *Atom and Ion Sources*, 1977, p. 86, L. Vályi. Copyright 1977, Akadémiai Kiadó, Budapest.



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 $p_0 \ll p_1$

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

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 $V = konst$

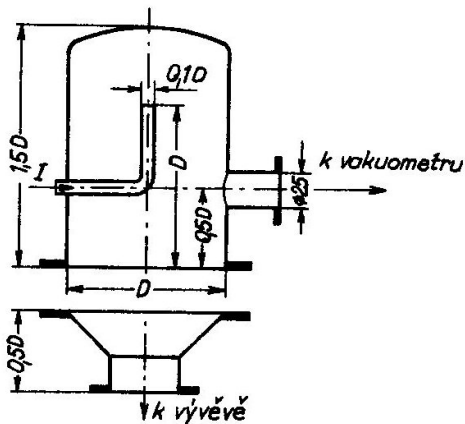
$$S_{t_2-t_1} = \frac{V}{t_2 - t_1} \ln \left(\frac{p_{t_1} - p_0}{p_{t_2} - p_0} \right)$$

platí pokud mohu zanedbat desorbci plynu ze stěn

Metoda stálého tlaku

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

$$S = \frac{I}{p}, \quad S = \frac{I}{p - p_0}$$



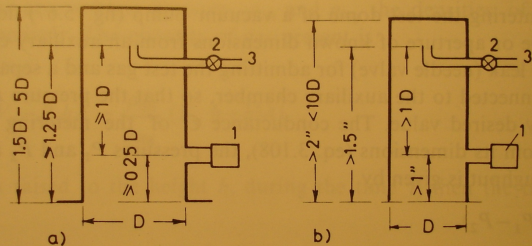


Fig. 5.68 Test domes for measuring the pumping speed of oil sealed mechanical pumps; (a) for inlet larger than 2 inch inside diameter; (b) for inlet smaller than 2 inch inside diameter; D – diameter of pump inlet; 1. Vacuum gauge; 2. Leak valve; 3. Connection to flow meter. After Van Atta (1965).

Metoda stálého množství plynu

Plyn cirkuluje v uzavřeném okruhu

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

