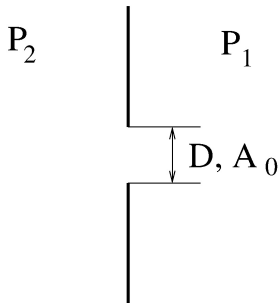


# Vodivost vakuových spojů

## Vodivost otvorů

$$P_2 > P_1$$



## Molekulární proudění

$$\lambda > D$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

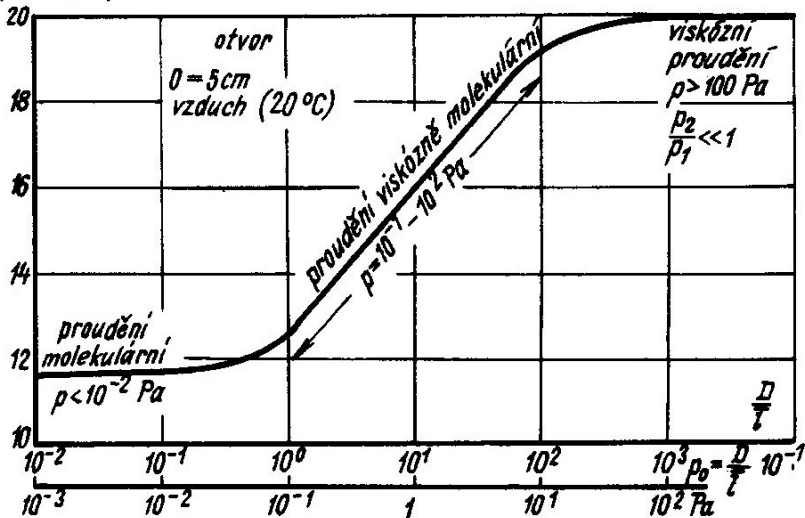
$$G'_0 = \frac{1}{4} v_a A_0 \frac{1}{1 - \frac{A_0}{A}}$$

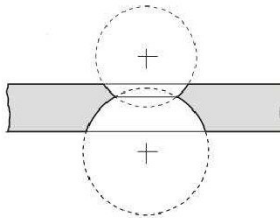
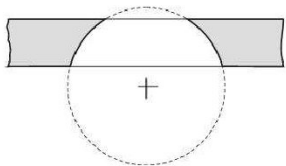
## Laminární proudění

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

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

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

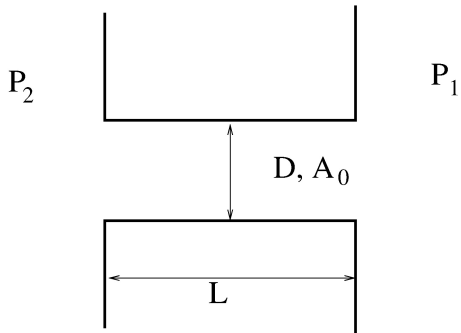




Speciální clony NPL (vyrábí National Physical Laboratory)  
Dynamická expanze - kalibrace manometrů



# 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

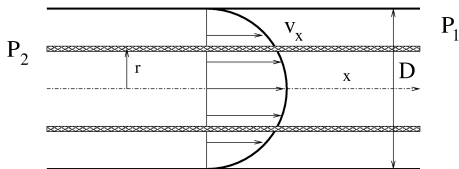
$$G_X = \sqrt{\frac{M_{0(\text{vz})}}{M_{0(X)}}} G_{\text{vz}}$$

Pro  $L = 1 \text{ m}$ ,  $D = 40 \text{ mm}$ ,  $T = 293 \text{ K}$ :

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

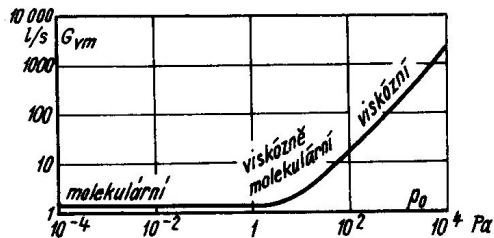


Pro vzduch,  $T = 293 \text{ K}$ ,  $M_0 = 29$

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

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

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

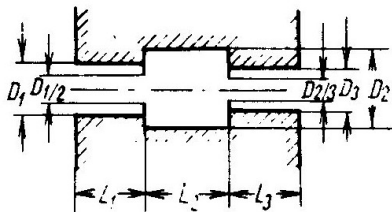


Obr. 2.39. Vodivost potrubí  $G$  jako funkce tlaku  $p_0$  v širokém oboru tlaků. Vzduch o teplotě 20 °C, potrubí o  $L = 10$  cm a  $D = 1$  cm

# Vakuová vodivost ohybu (kolena)

V prvním přiblížení použijeme aproximaci trubicí s délkou rovnou osové 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

# Výpočet

pro molekularni 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	$0.26479 \times 10^{-2}$
1.4	0.43581	5000.0	$0.26643 \times 10^{-3}$
1.5	0.42006	$\infty$	$4d/3l$

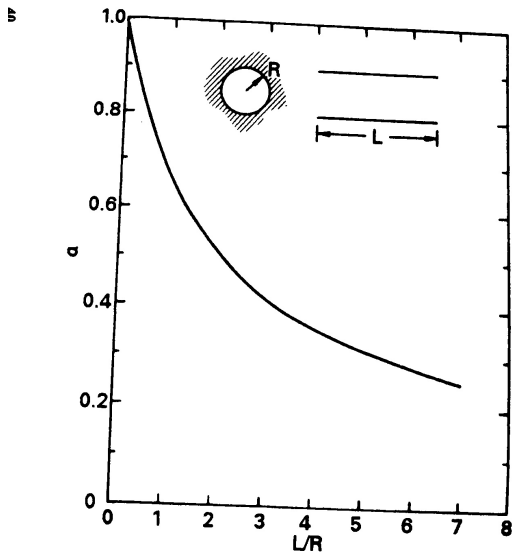
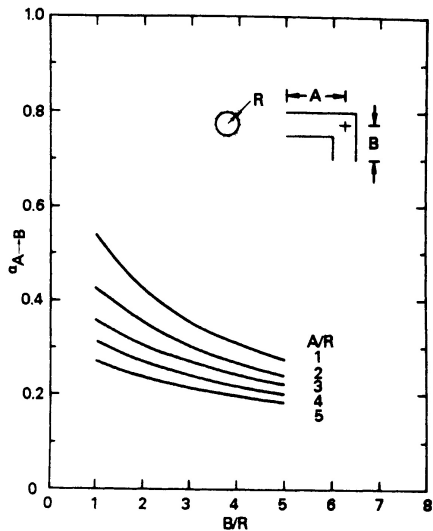


Fig. 3.5 Molecular transmission probability of a round pipe. Reprinted with permission from *Le Vide*, No. 103, p. 42, L. L. Levenson et al. Copyright 1963, Société Française des Ingénieurs et Techniciens du Vide.

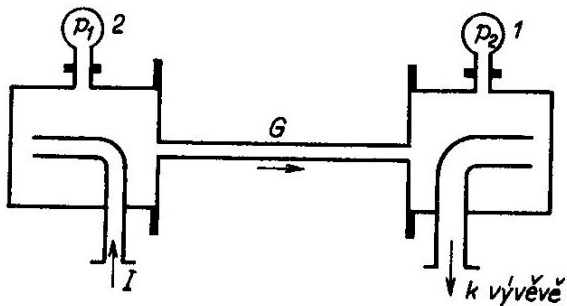


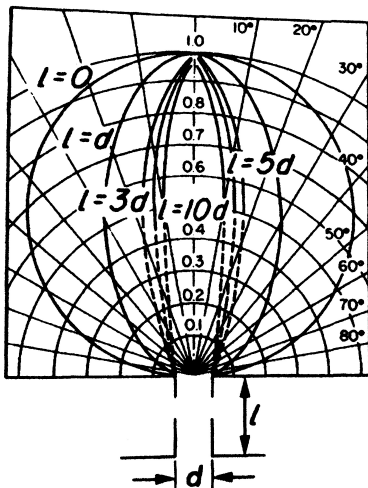


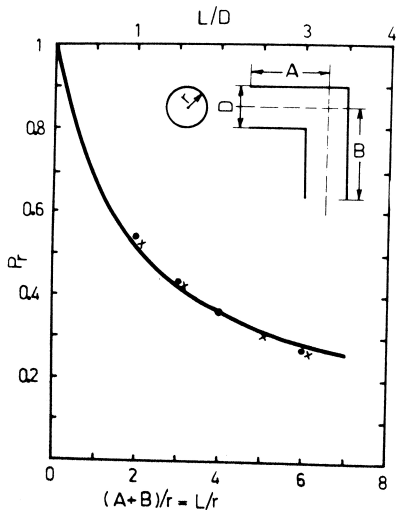
**Fig. 3.10** Molecular transmission probability of an elbow. Reprinted with permission from *J. Appl. Phys.*, 31, p. 1169, D. H. Davis. Copyright 1960, The American Institute of Physics.



# Měření vodivosti trubice







Porovnání: simulace - bod, experiment - x, výpočet

# 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  $S=\text{konst}$



## 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  $S_p = 0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

# 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  $V = konst$

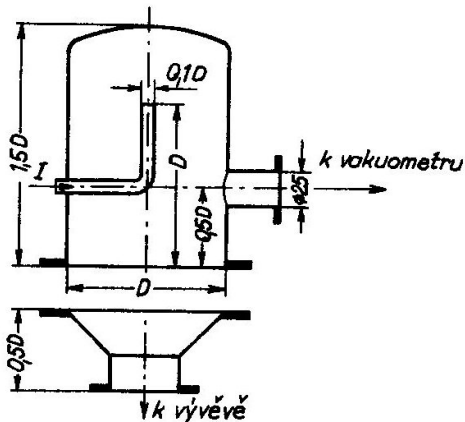
$$S_{t_2-t_1} = \frac{V}{t_2 - t_1} \ln \left( \frac{p_{t_1} - p_0}{p_{t_2} - p_0} \right)$$

platí pokud mohu zanedbat desorbci plynu ze stěn

# Metoda stálého tlaku

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

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



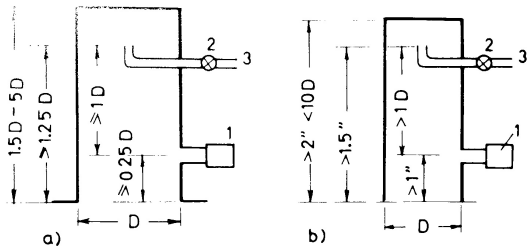


Fig. 5.68 Test domes for measuring the pumping speed of oil sealed mechanical pumps; (a) for inlet larger than 2 inch inside diameter; (b) for inlet smaller than 2 inch inside diameter;  $D$  – diameter of pump inlet; 1. Vacuum gauge; 2. Leak valve; 3. Connection to flow meter. After Van Atta (1965).

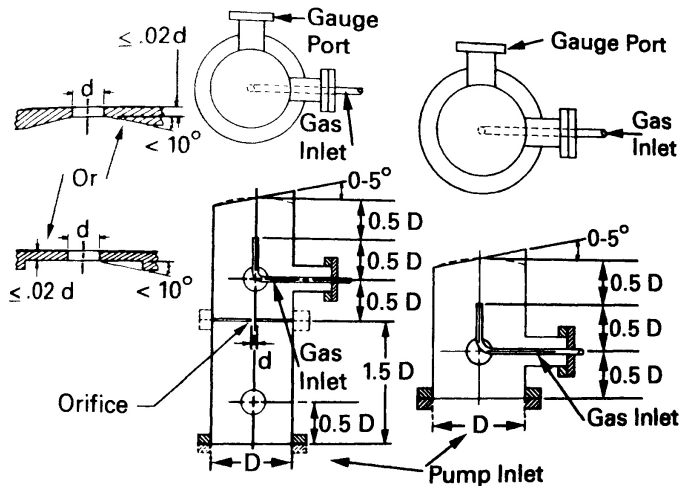


Fig. 7.1 Test domes for the measurement of mechanical and high vacuum pumps. Right: Flowmeter method test dome. This dome is used for speed measurement in pumps with a diameter greater than 50 mm. Left: Conductance (orifice) test dome. This dome is used for speed measurement at low gas flows. Reprinted with permission from *J. Vac. Sci. Technol. A*, 5, p. 2552, M. Hablanian, Copyright 1987, The American Vacuum Society.

# Metoda stálého množství plynu

Plyn cirkuluje v uzavřeném okruhu

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

