Plyny v dynamickém stavu

Jsou-li ve vakuovém systému různé teploty, nebo tlaky dochází k přenosu energie, nebo k proudění plynu.

Difuze plynu

Mechanismus difuze závisí na podminkách:

- **molekulární** $\lambda \gg L$
- **viskózně molekulární** $\lambda \approx L$
- **viskózní** $\lambda \ll L$

Molekulární režim

rychlost přenosu závisí pouze na rychlosti a hmotnosti molekul, molekuly se mezi sebou téměř nesráží

Viskózní režim

vznikne gradient koncentrace

$$\frac{dn_a}{dt} = \nu_1' = -D_{ab}\frac{dn_a}{dx}$$

$$\frac{dn_b}{dt} = \nu_2' = -D_{ba}\frac{dn_b}{dx}$$

$$p = p1 + p2 = konst \Rightarrow n = n_a + n_b = konst \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{dn_a}{dx} = \frac{dn_b}{dx} \Rightarrow D_{ab} = D_{ba} = D$$

koeficient samodifuze

při difuzi molekul jednoho plynu

koeficient vzájemné difuze

při difuzi dvou různých plynů

koeficient samodifuze

$$D = \frac{1}{3} v_a \lambda \ \left[m^2 s^{-1}\right]$$

kde

$$v_a = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}\ ,\ \ \lambda = \frac{1}{\sqrt{2} n \pi d^2}$$

$$p = nkT \Rightarrow \lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}$$

$$D = \frac{1}{3} v_a \lambda = \frac{kT}{3\sqrt{2}\pi d^2 p}\sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} =$$

$$= \frac{2}{3}\frac{k^{\frac{3}{2}}}{\pi^{\frac{3}{2}}}\frac{T^{\frac{3}{2}}}{d^2 p m_0^{\frac{1}{2}}} \Rightarrow D \sim \frac{T^{\frac{3}{2}}}{d^2 p \sqrt{m_0}}$$

koeficient vzájemné difuze

$$D_{ab} = D_{ba} = D_a \frac{n_a}{n_a + n_b} + D_b \frac{n_b}{n_a + n_b}$$

$$D_a = \frac{1}{3} v_{a(a)} \lambda_a \ , \ \ D_b = \frac{1}{3} v_{a(b)} \lambda_b$$

při stejných počátečních koncentracích

$$n_a = n_b = n \Rightarrow D_{ab} = D_{ba} = D = \frac{1}{6} (\lambda_a v_{a(a)} + \lambda_b v_{a(b)})$$

$$T = 273\,K, p = 10^5\,Pa$$

koeficient samodifuze

plyn	H_2	He	H_2O	N_2	CO_2	Hg	Xe
$D[10^{-4} m^2 s^{-1}]$	1.27	1.25	0.14	0.18	0.1	0.025	0.05

koeficient vzájemné difuze

plyn	$D_{ab}[10^{-4} m^2 s^{-1}]$ ve vzduchu	$D_{ab}[10^{-4} m^2 s^{-1}]$ v H_2
H_2	0.66	1.27
He	0.57	1.25
vzduch	0.18	0.66
CO	0.175	0.64
CO_2	0.135	0.54

Efúze plynu (termomolekulární proudění)

Je-li v různých částech vakuového systému různá teplota, začnou proudit molekuly z části s vyšší teplotou do části s nišší teplotou.

Uzavřený systém rozdělený přepážkou s otvorem, $T_2 > T_1$

$$\nu_1 = \frac{1}{4} n_1 v_{a1} \ , \ \nu_2 = \frac{1}{4} n_2 v_{a2}$$

$$\nu_{2-1} = \frac{1}{4}(n_2 v_{a2} - n_1 v_{a1})$$

proudění ustane, když $n_2 v_{a2} = n_1 v_{a1}$

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

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_{a1}}{v_{a2}} \Rightarrow \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{p_2}{p_1} = \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}$$

spoj s velkou vodivostí a viskózní podmínky

$$p \approx p_1 \approx p_2$$

$$p \approx kn_1T_1 \approx kn_2T_2$$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{T_2}{T_1}$$

spoj s velkou vodivostí a molekulární podmínky $n_1 \approx n_2$

Koeficient akomodace

Sdílení energie při dopadu molekuly na povrch je závislé na určitých podminkách, které vyjadřuje koeficient akomodace.

$$d = \frac{T_2' - T_1}{T_2 - T_1}$$

kde T_1 je teplota molekuly dopadající na povrch s teplotou T_2 a T_2' je teplota odražené molekuly

Koeficient akomodace závisí na druhu plynu, na stavu a druhu povrchu a na teplotě. Změna koeficientu v závislosti na teplotě v mezích 100-500K pro různé plyny nepřekračuje 50%.

Úhlové rozdělení molekul plynu odražených, nebo startujících z povrchu

Molekuly plynu dopadající na povrch se nemusí odrážet podle zákona zrcadlového odrazu.

Doba pobytu není nekonečně krátká,

povrch vzhledem k velikosti molekuly není dokonale hladká plocha.

Rozdělení pravděpodobností se řídí kosinovým zákonem (Knudsenovým)

$$P(\vartheta) = P_0 cos\vartheta$$

Viskozita plynu (vnitřní tření)

viskózní podmínky $\lambda \ll L$, při proudění vzniká gradient rychlosti

$$F_t = -\eta \frac{du}{dx} \Delta S$$

$$\eta = \frac{1}{3} \varrho \lambda v_a \quad [N s m^{-2}]$$

$$v_a = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} \ , \ \lambda = \frac{1}{\sqrt{2} n \pi d^2} \ , \ \varrho = m_0 n \ , \ p = nkT$$

$$\eta = \frac{2}{3} \frac{1}{d^2} \sqrt{\frac{kT m_0}{\pi^3}} \Rightarrow \eta \approx konst \sqrt{T}$$

$$\frac{\eta_T}{\eta_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1 + \frac{T_\lambda}{T_0}}{1 + \frac{T_\lambda}{T}}$$

kde T_λ je Sutherlandova konstanta

Přenos tepla plynem

Množství tepla procházející za 1 sekundu plochou 1m^2 kolmou ke směru maximálního gradientu teploty lze vyjádřit

$$W = -\Lambda \frac{dT}{dx}$$

viskózní podmínky

$$\Lambda = \frac{1}{3} \varrho v_a \lambda c_v \quad [W m^{-1} K^{-1}]$$

$$\Lambda = \eta c_v$$

c_v je měrné teplo plynu při stálém objemu

při molekulárních podmínkách se všechny molekuly podílejí na přenosu tepla,

přenos tepla je úměrný koncentraci a tím i tlaku

Proudění plynu

Proudění vzniká při rozdílu tlaků(koncentrací).

Typy proudění:

- **turbulentní (vířivé)**
- **laminární (viskozní)**
- **molekulární**

Turbulentní proudění

Nastává při velkých rychlostech, tj. při velkém rozdílu tlaků a velkých objemech. Proudnice vytváří víry.

Laminární proudění

Plyn proudí v rovnoběžných vrstvách s rozdílnou rychlostí jednotlivých vrstev - u stěn má nulovou rychlost. plyn se pohybuje unášivou rychlostí na kterou je superponován tepelný pohyb molekul.

Molekulární proudění

Plyn neproudí jako celek, molekuly se pohybují nezávisle na sobě.

Rozdělení vakua

vakuum	nízké	střední	vysoké	extrémně vysoké
tlak $[Pa]$	$10^5 - 10^2$	$10^2 - 10^{-1}$	$10^{-1} - 10^{-5}$	$< 10^{-5}$
koncentrace $[cm^{-3}]$	$10^{19} - 10^{16}$	$10^{16} - 10^{13}$	$10^{13} - 10^9$	$< 10^9$
střední dráha $\lambda[cm]$	$< 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^1$	$10^1 - 10^5$	$> 10^5$
monovrstva $\tau[s]$	$< 10^{-5}$	$10^{-5} - 10^{-2}$	$10^{-2} - 10^2$	$> 10^2$
typ proudění	viskózní	Knudsenovo	molekulární	molekulární

Hranice mezi turbulentním a laminárním prouděním

Reynoldsovo číslo R_e

$$R_e = \frac{D\varrho u}{\eta}$$

$R_e > 2200$ **nastává turbulentní proudění**

$R_e < 1200$ **nastává laminární proudění**

$1200 \leq R_e \leq 2200$ **přechodová oblast**

Hranice mezi laminárním a molekulárním prouděním

Knudsenovo číslo K_n

$$K_n = \frac{D}{\lambda}$$

$K_n > 100$ **nastává turbulentní, nebo laminární proudění**

$K_n < 1$ **nastává molekulární proudění**

$1 \leq K_N \leq 100$ **přechodová oblast (Knudsenovo proudění)**

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}n\pi d^2} \ , \ p = nkT$$

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p} \Rightarrow K_n = \frac{pD\sqrt{2}\pi d^2}{kT}$$

$$T = 300\,K \ , \ k = 1.38032.10^{-23}\,JK^{-1}$$

$$d = 3.75.10^{-10}\,m(vzduch)$$

$pD > 0.662$ **nastává turbulentní, nebo laminární proudění**

$pD < 6.62.10^{-3}$ **nastává molekulární proudění**

$6.62.10^{-3} \le pD \le 0.662$ **přechodová oblast (Knudsenovo proudění)**

Proud plynu

Hmotnostní proud plynu

$$I_m = \frac{m}{t} = \frac{dm}{dt}$$

Objemový proud plynu

$$I_V = \frac{pV}{t} = \frac{d(pV)}{dt} \ \ [Pam^3 s^{-1} = W]$$

Proud plynu můžeme vyjádřit pomocí počtu molekul ν', které rocházejí daným průřezem za 1s

$$m_0\nu' = \frac{dm}{dt}\ ,\ \ pV = kT\frac{m}{m_0}$$

$$V = k\frac{m}{m_0}\frac{T}{p}$$

$$\left(\frac{dV}{dt}\right)_{p=konst} = k\frac{T}{p}\frac{1}{m_0}\frac{dm}{dt} = k\frac{T}{p}\nu'$$

$$I_V = I = p\left(\frac{dV}{dt}\right)_{p=konst} = kT\nu'$$

Specifický proud plynu

$$I_1 = \frac{I}{A}$$

Objemová rychlost proudění S

$$\left(\frac{dV}{dt}\right)_{p=konst} = S \ [m^3 s^{-1}]$$

$$I = p\left(\frac{dV}{dt}\right)_p = pS$$

Změna tlaku při $V = konst$

Mějme nádobu objemu V s plynem o tlaku p, chceme změnit tlak.

$$I = \frac{d(pV)}{dt} = V\left(\frac{dp}{dt}\right)_V$$

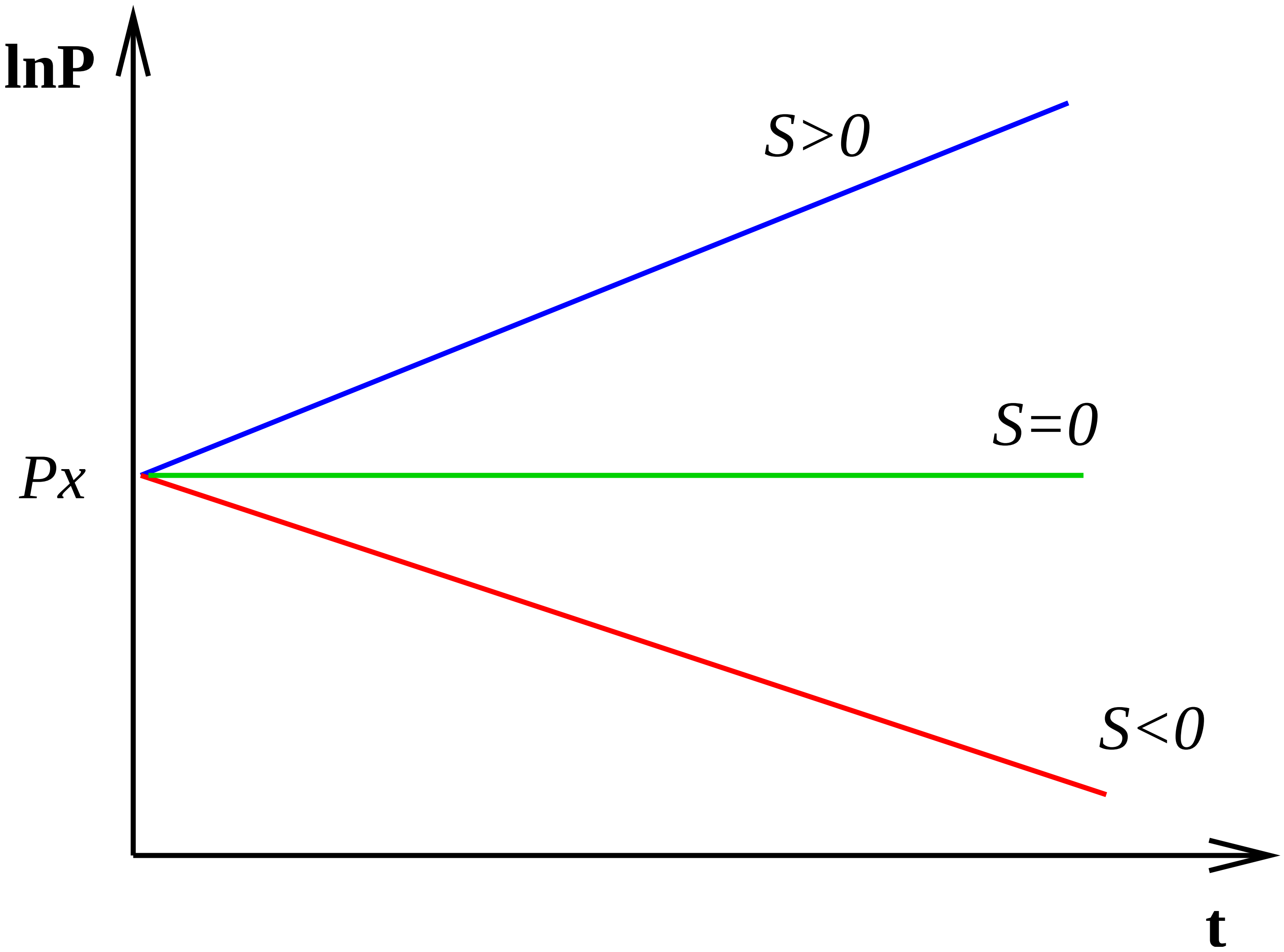
$$V\left(\frac{dp}{dt}\right)_V = pS \Rightarrow$$

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

$$ln(p) = \frac{S}{V}t + konst$$

$$p = p_x e^{\frac{S}{V}t}$$

Závislost tlaku na čase



Vodivost vakuového systému

při rozdílu tlaků $p_2 - p_1$ a proudu plynu I

$$G = \frac{I}{p_2 - p_1} \; [m^3 s^{-1}]$$

Rychlost odčerpávání vak. systému je rovna jeho vodivosti, je-li na jednom konci $p = 0Pa, G = S$

Odpor vakuového systému

$$R = \frac{1}{G} \; [m^{-3} s]$$

Při paralelním spojení vakuových dílů

$$\boldsymbol{G = \sum_i G_i = \sum_i \frac{1}{R_i}}$$

Při seriovém spojení vakuových dílů

$$\boldsymbol{R = \sum_i R_i = \sum_i \frac{1}{G_i}}$$

Objemová rychlost na výstupu z trubice

Mějme trubici s vodivostí G, protékanou plynem. Na koncích trubice mějme tlaky $p_1,\ p_2$ a objemové rychlosti $S_1,\ S_2$.

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

$$I = p_1 S_1$$

$$I = p_2 S_2$$

$$p_2 - p_1 = \frac{I}{G} \ , \ p_2 = \frac{I}{S_2} \ , \ p_1 = \frac{I}{S_1}$$

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{S_2} - \frac{1}{S_1}$$

$$S_2 = S_1 \frac{1}{1 + \frac{S_1}{G}} \ \Rightarrow \ S_2 < S_1$$

$$S_1 = S_2 \frac{1}{1 - \frac{S_2}{G}}$$

pouze když $G \rightarrow \infty \Rightarrow S_2 = S_1$

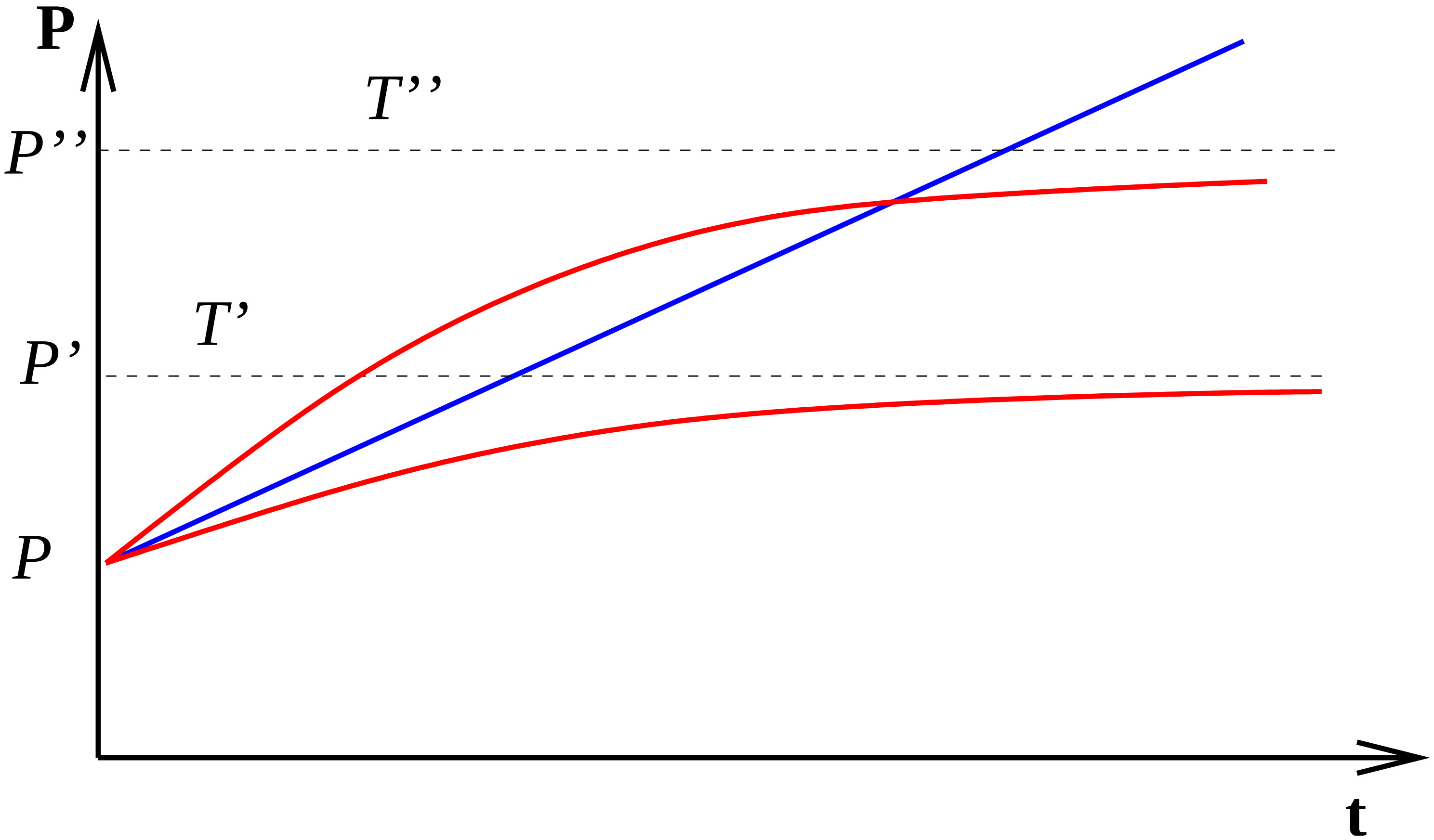
Vliv netěsností

1. skutečné netěsnosti (netěsné spoje, dirky, vady materiálů,...)

$$I_N = V\frac{dp}{dt} = G_N(p_{atm} - p_1) \approx G_N p_{atm}$$

2. zdánlivé netěsnosti (desorpce plynů z povrchu), se vzrůstajícím tlakem se desorpce zmenšuje a je nulová při rovnováze dané tlakem a teplotou

Vliv netěsností



Mezní tlak

Při čerpání, objemová rychlost $S < 0$ by mělo po nekonečně dlouhé době platit, že $p = p_0 = 0\,Pa$. Ve skutečnosti vždy platí $p_0 > 0$ (netěsnosti, zdroje plynu, ...).

$$p_0 = \frac{I_N}{S}$$

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