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

Počet částic dopadajících na jednotku plochy za jednotku času

Sférické souřednice r, φ, ϑ

$$dS = r^2 sin\vartheta d\vartheta d\varphi$$

Počet částic s rychlostí v_1 dopadajících na element dS

$$\nu_1 = \frac{n_{v1} dS}{4\pi r^2} = \frac{n_{v1} r^2 sin\vartheta d\vartheta d\varphi}{4\pi r^2}$$

Počet částic dopadajících na plochu kolmou na osu z

$$d\nu_2 = \nu_1 v_1 cos\vartheta = \frac{n_{v1} sin\vartheta d\vartheta d\varphi}{4\pi} v_1 cos\vartheta$$

$$\nu_2 = \frac{n_{v1} v_1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} sin\vartheta cos\vartheta d\vartheta d\varphi =$$

$$= \frac{n_{v1} v_1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} sin\vartheta cos\vartheta d\vartheta = \frac{n_{v1} v_1}{2} \left[\frac{sin^2\vartheta}{2} \right]_0^{\frac{\pi}{2}} = \frac{n_{v1} v_1}{4}$$

$$\nu_2 = \frac{1}{4} n_{v1} v_1$$

$$\nu = \frac{1}{4} n v_a$$

Tlak jako kinetické působení plynu

částice s rychlostí v_1

$$I = 2m_0 v_1 cos\vartheta$$

$$dp_1 = d\nu_2 I = d\nu_2 2m_0 v_1 cos\vartheta$$

$$p_1 = \frac{n_{v1}}{4\pi} 2m_0 v_1^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} cos^2\vartheta sin\vartheta d\vartheta d\varphi =$$

$$p_1 = n_{v1} m_0 v_1^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} cos^2\vartheta sin\vartheta d\vartheta =$$

$$= n_{v1} m_0 v_1^2 \left[\frac{cos^3\vartheta}{3} \right]_0^{\frac{\pi}{2}}$$

$$p_1 = \frac{1}{3} n_{v1} m_0 v_1^2$$

$$p = \frac{1}{3} n m_0 v_e^2$$

Vztah mezi koncentrací tlakem a teplotou

Ze stavové rovnice plynu

$$\frac{pV}{T} = n_0 R = \frac{m}{M} R = \frac{m}{M} k N_A$$

$$n = \frac{m N_A}{M V}$$

$$p = nkT$$

$$p = nkT$$

$$p = \frac{1}{3} n m_0 v_e^2$$

$$nkT = \frac{1}{3} n m_0 v_e^2$$

$$v_e^2 = \frac{3kT}{m_0} \Rightarrow v_e = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

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 podmínkách:

- **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

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

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

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

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

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

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

koeficient samodifuze

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

koeficient vzájemné difuze

plyn	$D_{ab}[10^{-4}m^2s^{-1}]$ ve vzduchu	$D_{ab}[10^{-4}m^2s^{-1}]$ 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

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 $T_2 > T_1$

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

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

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 viskócní podmínky

$$p \approx p_1 \approx p_2$$

$$p \approx k n_1 T_1 \approx k n_2 T_2$$

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

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

Koeficient akomodace

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

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.

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

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

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