

# Získávání nízkých tlaků

- vytvořit dostatečně nízký tlak
- udržet nízký tlak po dostatečně dlouhou dobu

Vývěva - zařízení snižující tlak plynu v uzavřeném objemu.

# Typy vývěv

- Vývěvy s transportem molekul z čerpaného prostoru
  - vývěvy s pracovní kapalinou
  - suché vývěvy
- Vývěvy bez transportu molekul z čerpaného prostoru

# Vývěvy s transportem molekul z čerpaného prostoru

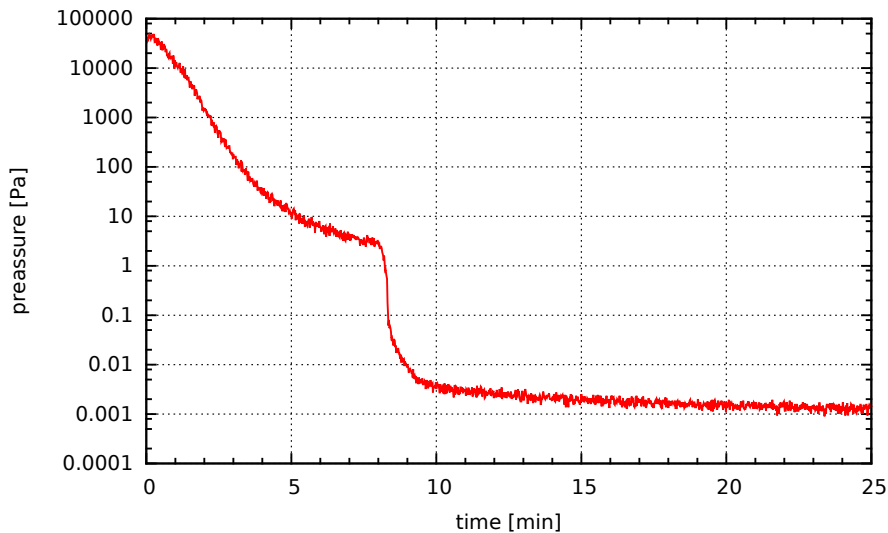
- Mechanické vývěvy
  - Vývěvy s periodicky se měnícím pracovním prostorem
    - Pístové vývěvy
    - Rotační olejové vývěvy
    - Membránové vývěvy
    - Scroll vývěvy
  - Vývěvy s neproměnným pracovním prostorem
    - Rootsovy vývěvy
    - Molekulární vývěvy
    - Turbomolekulární vývěvy
- Paroproudové vývěvy
  - Vodní vývěvy
  - Ejektorové a difúzní vývěvy
- Vývěvy založené na tepelné rychlosti molekul, nebo ionizaci molekul

# Vývěvy bez transportu molekul z čerpaného prostoru

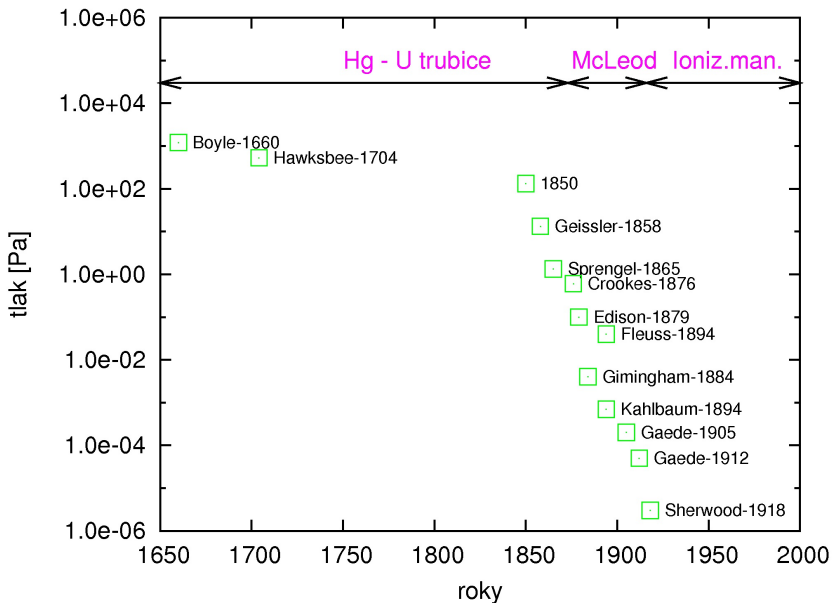
- Zeolitové vývěvy
- Kryosorpční vývěvy
- Sublimační vývěvy
- Iontové vývěvy
- Getrové vývěvy

# Charakteristické parametry vývěv

- výstupní tlak vývěvy
- mezní tlak vývěvy
- čerpací rychlost vývěvy
- jestli používá nějakou pracovní kapalinu
- provozní vlastnosti - vibrace, teplota, hluk, ...



Scroll vývěva + turbomolekulární vývěva, objem 210 l



# Vývěvy s transportem molekul plynu

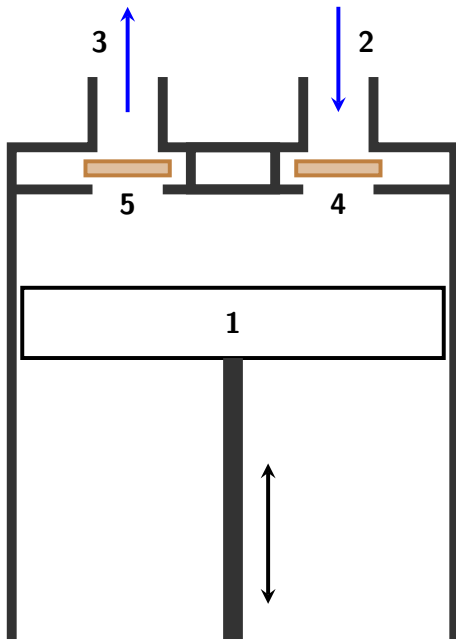
## Mechanické vývěvy

## Vývěvy s periodicky se měnícím pracovním prostorem

## Pístové vývěvy

Tyto vývěvy pracují na základě Boyle-Mariottova zákona, při zvětšení objemu se sníží tlak. Proces zaplňování, proces vytlačování plynu.







materiály firmy Edwards

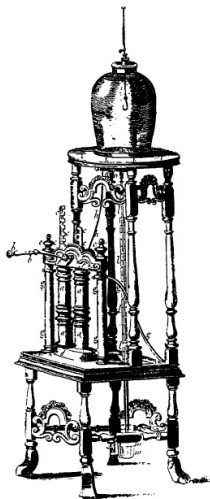


Fig. 5 The double-piston pump of Hawksbee (1704).

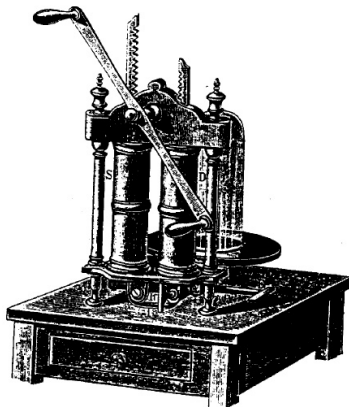
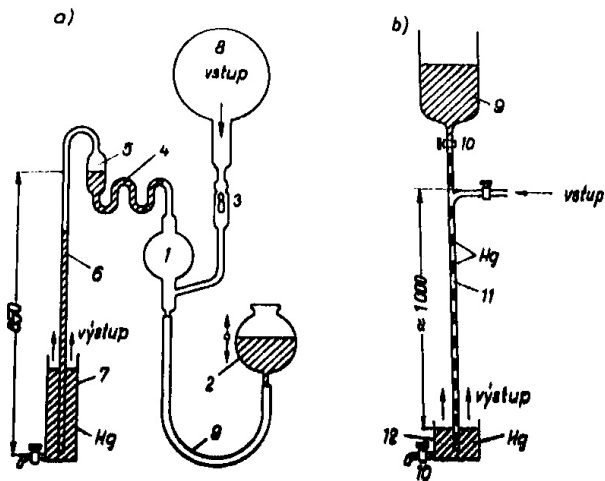


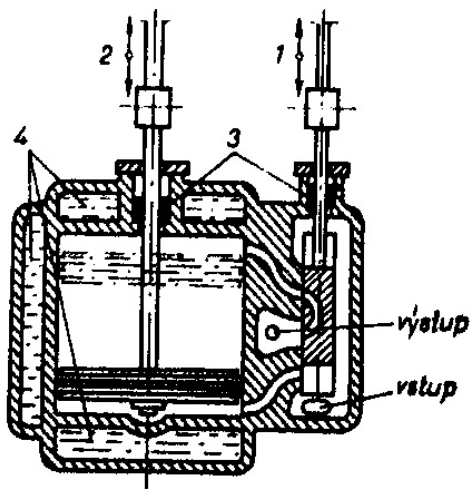
Fig. 6 A commercial double-piston pump from about 1850.

A. Roth: Vacuum technology, Elsevier, 1990

# Toplerova a Sprenglerova vývěva



J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981



J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

$p_b$  - původní tlak plynu v recipientu,  $V$  - velikost čerpaného objemu,  $v$  - objem komory vývěvy

$$p_1(V + v) = p_b V$$

$$p_1 = \frac{V}{V + v} p_b$$

po  $n$  cyklech

$$p_n = K^n p_b, \quad K = \frac{V}{V + v}$$

teoreticky  $n \rightarrow \infty \Rightarrow p \rightarrow 0$

Prakticky existuje mezní tlak  $p_0 > 0$  (zpětné proudění plynu, škodlivý prostor  $v'$ )

# Čerpací rychlost

## Konstrukční čerpací rychlost

$$S_k = n(v - v') = nv\left(1 - \frac{v'}{v}\right)$$

$$S_k = nv\left(1 - \frac{v'}{v}\right)$$

$n$  je počet zdvihů za 1 s,  $v$  je objem pracovní komory,  $v'$  je škodlivý prostor  
 $n$  je limitováno dobou naplnění komory

## Teoretická čerpací rychlost

$$I_+ = pS_k = npv\left(1 - \frac{v'}{v}\right)$$

Zpětný proud,  $p_v$  výstupní tlak

$$I_- = \beta n p_v v'$$

$$I = I_+ - I_- = nv\left(1 - \frac{v'}{v}\right)p \left[ 1 - \frac{\beta p_v \frac{v'}{v}}{\left(1 - \frac{v'}{v}\right)p} \right]$$



Uvážíme-li, že  $\frac{v'}{v} \ll 1 \Rightarrow 1 - \frac{v'}{v} \approx 1$

$$S_T = \frac{I}{p} = S_k \left(1 - \beta \frac{v' p_v}{vp}\right)$$

mezní tlak

$$p_0 = \beta \frac{v'}{v} p_v$$

$$S_T = S_k \left(1 - \frac{p_0}{p}\right)$$

Pro  $p \gg p_0 \Rightarrow S_T = S_k$

Pro  $p \rightarrow p_0 \Rightarrow S_T \rightarrow 0$

## Snížení mezního tlaku

- zmenšení  $v'$  (vhodnou konstrukcí)
- zmenšení  $\beta$  (např. zaplněním  $v'$  olejem)
- snížení výstupního tlaku  $p_v$  (předčerpání)

$p_0$  přispívá i tenze par pracovní kapaliny

$$p'_0 = p_0 + P_p$$

## Skutečná čerpací rychlost

Komora se nenaplní na tlak čerpaného prostoru (vakuový odpor spojů), proto je skutečná čerpací rychlost menší než teoretická čerpací rychlost

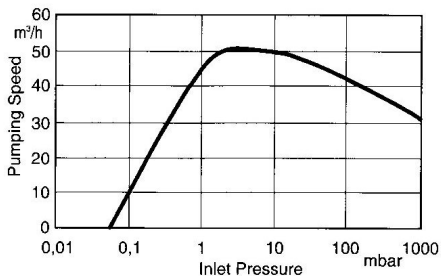
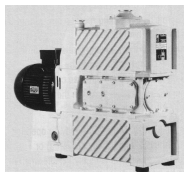
$$S_E = \beta' S_T$$

$\beta' = f(p, n) \leq 1$  - koeficient naplnění

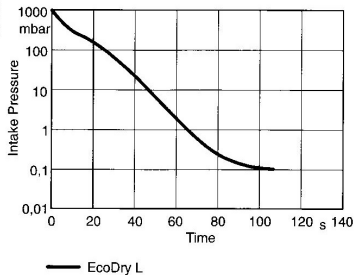
# Moderní pístové vývěvy

- pracují od atmosférického tlaku na vstupu
- tlak na výstupu - atmosférický
- mezní tlak  $\sim 10$  Pa (podle počtu stupňů a konstrukce)
- suchá vývěva bez pracovní kapaliny
- 1 – 4 stupňové provedení

# Ecodry L Leybold



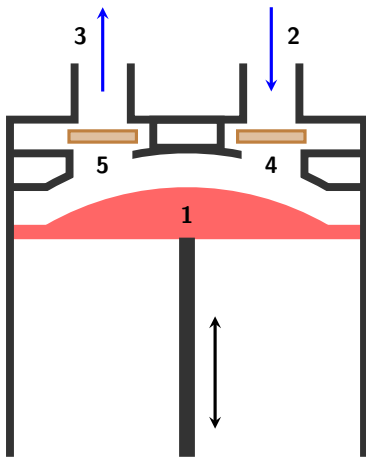
*Pumping speed characteristic for the Ecodry L without gas ballast (50 Hz)*



*Pump down curve of the Ecodry L connected to a 83 l vessel at 60 Hz without gas ballast*

materiály firmy Leybold

# Membránová vývěva





MV 2



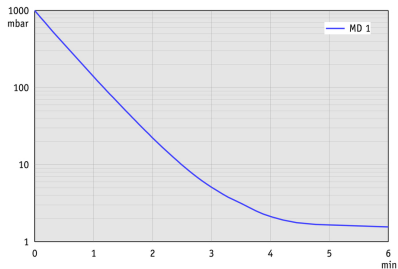
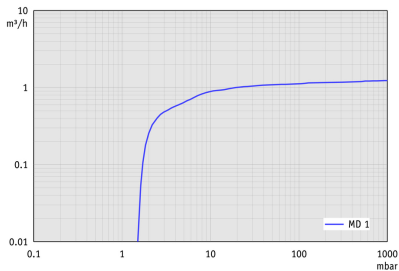
MD 12C

materiály firmy Vacuubrand

# MD-1 Vacuubrand



10 L; 50 Hz



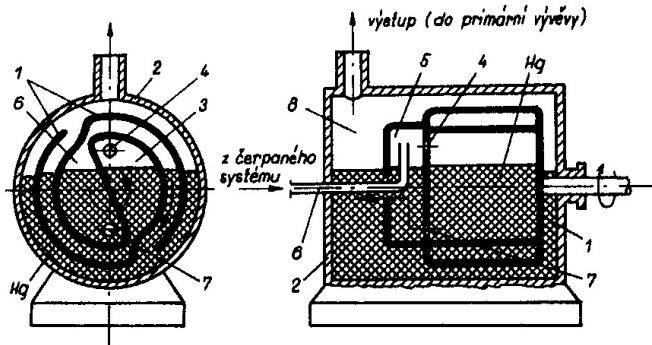
materiály firmy Vacuubrand



# Membránové vývěvy

- pracují od atmosférického tlaku na vstupu
- tlak na výstupu - atmosférický
- mezní tlak  $\sim 10^2$  Pa
- suchá vývěva, bez oleje
- zpravidla více komor
  - řazení sériové - nižší mezní tlak
  - řazení paralelní - větší čerpací rychlost

# Rotační vývěvy

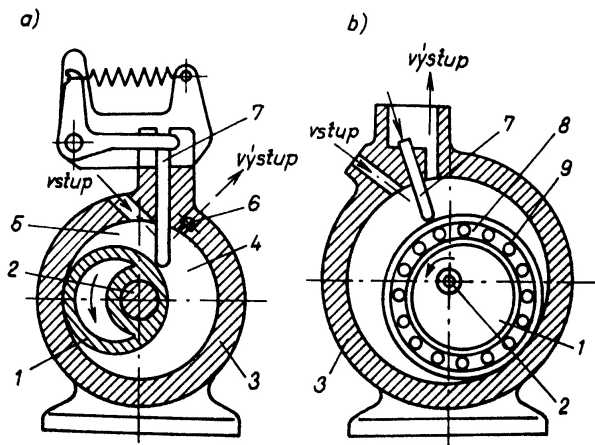


Obr. 4.8. Gaedeho rotační rtuťová vývěva

1 – rotor; 2 – stator; 3, 5, 6, 8 – části komory, 4, 7 – otvory

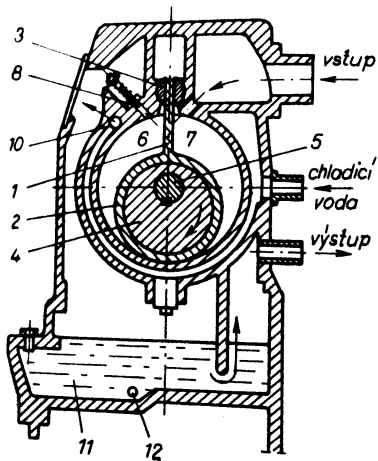
J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

## Rotační olejová vývěva s šoupátkem ve statoru



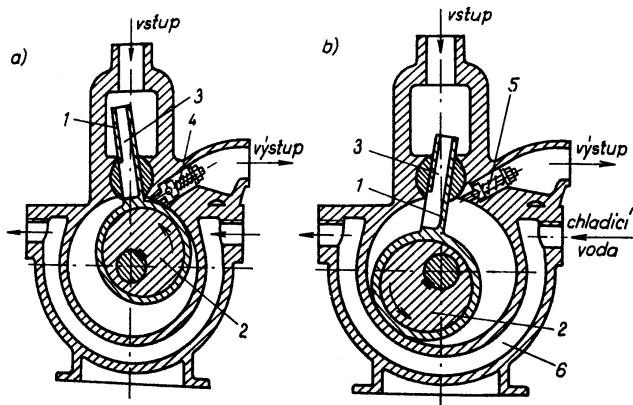
J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

## Rotační olejová vývěva s kolujícím rotorem a přepážkou



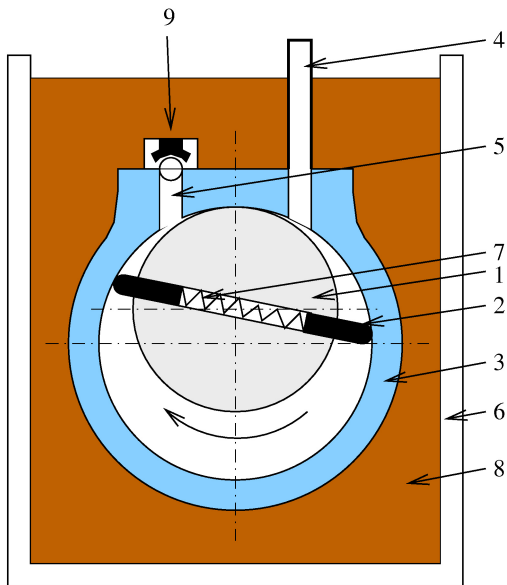
J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

## Rotační olejová vývěva s kolujícím rotorem a čtyřhrannou trubicí

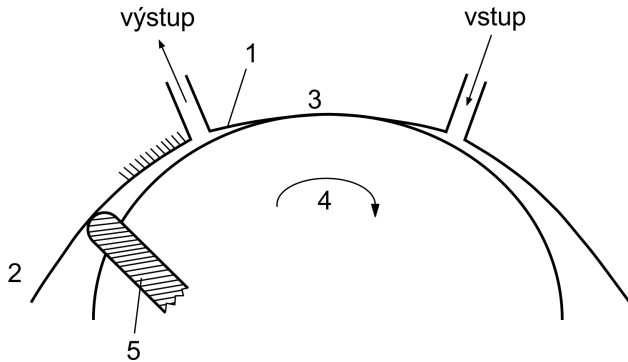


J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

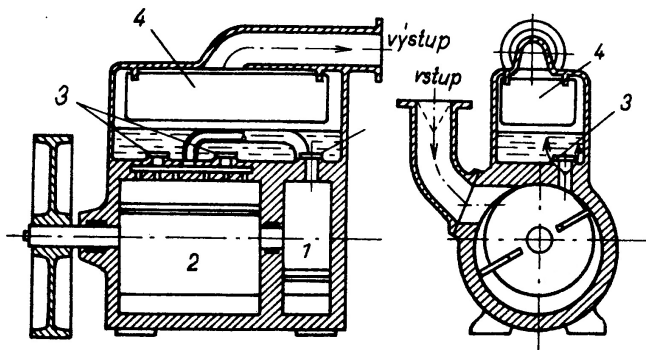
# Rotační olejová lopatková vývěva



# Škodlivý prostor



Dvoustupňové provedení pro dosažení menšího mezního tlaku



J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981



# Gasballast - proplachování

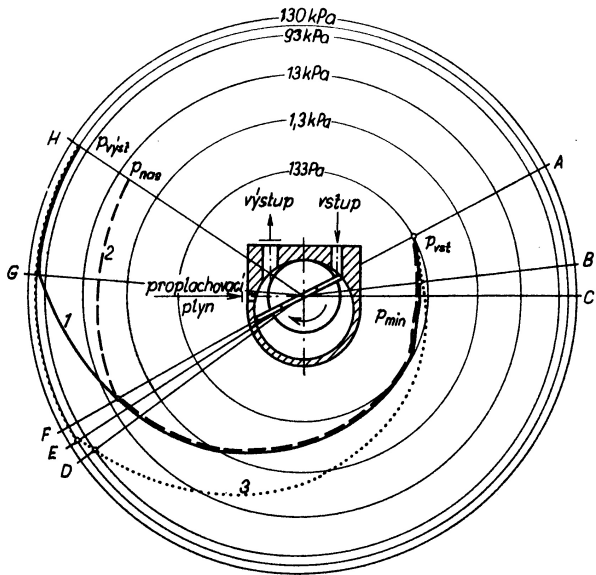
Odčerpávaný plyn může obsahovat složky, které kondenzují při vyšším tlaku, zejména vodní pára.

- $P_p$  parciální tlak vodní páry při pracovní teplotě vývěva
- $P_r$  tenze vodní páry při pracovní teplotě
- $K = \frac{P_{atm}}{P_{vstup}}$  kompresní poměr

ke kondenzaci dochází pokud

$$P_p K > P_r$$

Otevření proplachovacího ventilu (Gasballastu) má zamezit kondenzaci par ve vývěvě.



J. Groszkowski: Technika vysokého vakua, SNTL, Praha 1981

# Rotační olejová vývěva

- pracuje od atmosférického tlaku
- mezní tlak pro dvoustupňové provedení  $\sim 10^{-2}$  Pa
- počet otáček 300 – 1400  $\text{min}^{-1}$  - při zvýšení otáček nadměrné zahřívání
- do čerpaného prostoru se dostávají páry oleje
- vibrace
- funkce oleje
  - utěšňuje a vyrovnává nerovnosti povrchu ve vývěvě, olej vytváří na stěně tenký film
  - zmenšuje tření, zlepšuje chlazení, přispívá k odvodu tepla
  - vyplňuje škodlivý prostor

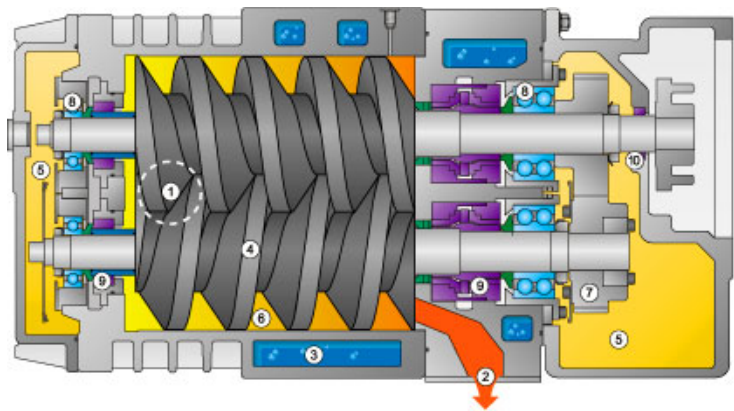
# Požadavky na olej

- nízká tenze par  $\sim 10^{-3}$  Pa
- vhodné mazací vlastnosti
- stálost proti štěpení a oxidaci, při zahřátí může docházet ke štěpení na složky, které mají vyšší tenzi par, rovněž oxidací mohou vzniknout složky s vyšší tenzi par

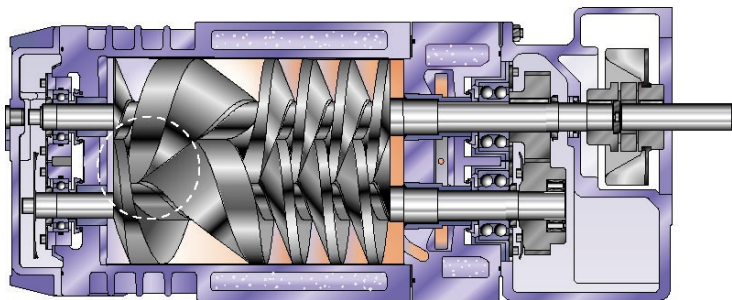
# Poznamky k provozu rotační olejové vývěvy

- zapojení - pořadí fází u třífázových motorů
- zahřátí na provozní teplotu
- zavzdušnění po vypnutí
- výměna oleje

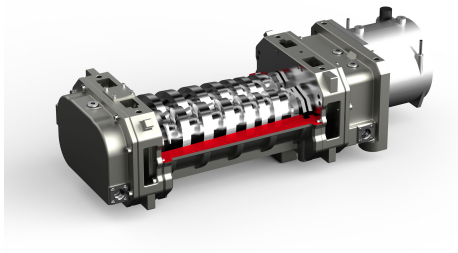
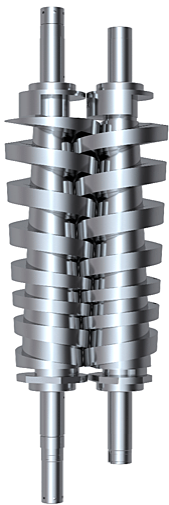
# Šroubové vývěvy



materiály firmy Busch



materiály firmy IPE



materiály firmy Edwards



# Šroubové vývěvy - parametry

- čerpací rychlost 100 – 2500 m<sup>3</sup>/h
- mezní tlak  $\sim 10^0$  Pa
- chemicky odolné
- může čerpat i výbušné plyny

# Šroubové vývěvy - využití

- chemický a farmaceutický průmysl
- vakuová destilace a vakuové sušení
- pokovování, povlakování
- vakuové pece
- laboratoře - výzkum a vývoj

# Cvičení

7) Spočítejte střední volnou dráhu pro vzduch při tlaku 1 Pa. Počítejte bez zpřesnění i se zpřesněním pomocí Sutherlandovi konstanty.

Pro teploty:

a) 273 K

b) 298 K

Výsledky

a) 273 K

a) bez korekce  $\lambda_1 \doteq 6,03$  mm

b) s korekcí  $\lambda_2 \doteq 4,26$  mm

b) 298 K

a) bez korekce  $\lambda_3 \doteq 6,58$  mm

b) s korekcí  $\lambda_4 \doteq 4,77$  mm

- 8) Spočítejte střední volnou dráhu pro He a střední aritmetickou rychlost při tlaku  $10^{-8}$  Pa. Počítejte bez zpřesnění i se zpřesněním (střední volné dráhy) pomocí Sutherlandovi konstanty. Teplota plynu je 4 K.

Výsledky

a) 273 K

a) bez korekce  $\lambda_1 \doteq 2,6 \times 10^4$  m

b) s korekcí  $\lambda_2 \doteq 1,23 \times 10^3$  m

b)  $v_a \doteq 145 \text{ ms}^{-1}$

9) Kolik molekul vzduchu dopadá na  $1 \text{ cm}^2$  za  $1 \text{ s}$ ? Za jak dlouho se vytvoří monomolekulární vrstva na povrchu? Počet volných míst na povrchu je  $0,5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ , předpokládejte, že každá částice co dopadne ulpí na povrchu. Teplota je  $273 \text{ K}$ . Pro tlaky:

a)  $P_1 = 10^2 \text{ Pa}$

b)  $P_2 = 10^{-5} \text{ Pa}$

c)  $P_2 = 10^{-9} \text{ Pa}$

Výsledky

$$\nu = \frac{1}{4} v_a n ; P = nkT ; \tau = \frac{0,5 \times 10^{15}}{\nu}$$

a)  $P_1 = 10^2 \text{ Pa}$ ;  $\nu_1 \doteq 2,95 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ;  $\tau_1 \doteq 0,17 \times 10^{-5} \text{ s}$

b)  $P_2 = 10^{-5} \text{ Pa}$ ;  $\nu_2 \doteq 2,95 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ;  $\tau_2 \doteq 17 \text{ s}$

c)  $P_2 = 10^{-9} \text{ Pa}$ ;  $\nu_3 \doteq 2,95 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ;  $\tau_3 \doteq 0,17 \times 10^6 \text{ s} \doteq 47 \text{ h}$

- 10) Ve výbojce je tlak 80 kPa. Počáteční teplota je 27 °C. Při provozu stoupne teplota na 177 °C. Jaký bude tlak ve výbojce?

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Výsledek  $P_2 \doteq 120$  kPa

- 11) Vakuová komora je zavzdušněna, atmosférický tlak je 99520 Pa. Ke komoře pomocí ventilu připojíme pomocnou komoru o objemu 20 cm<sup>3</sup>, která je vyčerpaná na 0 Pa. Po otevření ventilu se v systému ustálí tlak na hodnotě 96590 Pa. Určete objem vakuové komory.

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} ; V_2 = V_1 + 20 \text{ cm}^3$$

Výsledek  $V_1 \doteq 659 \text{ cm}^3$

- 12) V nádobě o objemu 2 L a teplotě 50 °C je  $10^{15}$  molekul kyslíku a  $10^{-7}$  g molekul dusíku. Určete výsledný tlak v nádobě.

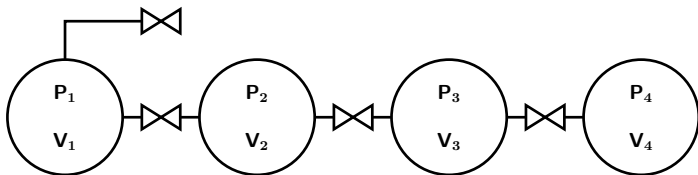
$$P = P_1 + P_2, \quad P = (n_1 + n_2)kT$$

$$n_1 = \frac{10^{15}}{V}; \quad n_2 = \frac{m}{M} \frac{N_A}{V}$$

Výsledek  $P \doteq 7,02 \times 10^{-3}$  Pa



- 13) Statická expanze. Vyčerpáme aparaturu. Do objemu  $V_1$  napustíme vzduch na tlak  $P_1$ , pak necháme plyn expandovat do objemu  $V_2, \dots$



$$P_1 = 10^4 \text{ Pa}, V_1 = 25 \text{ cm}^3, V_2 = 1000 \text{ cm}^3, V_3 = 25 \text{ cm}^3, \\ V_4 = 13000 \text{ cm}^3$$

$$P_1 V_1 = P_2 (V_1 + V_2) ; P_2 V_2 = P_3 (V_2 + V_3) ; P_3 V_3 = P_4 (V_3 + V_4)$$

Výsledek  $P_4 \doteq 0,46 \text{ Pa}$

14) Efúze plynu. Rovnováha nastává když:

$$\frac{1}{4}n_1v_{a1} = \frac{1}{4}n_2v_{a2} \Rightarrow \frac{P_1}{P_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}$$

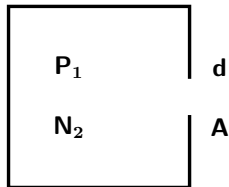
$$T_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}, P_2 = 1 \times 10^{-2} \text{ Pa}$$

$P_1$	$P_2$
$T_1$	$T_2$

a)  $T_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C} : P_1 = 1,13 \times 10^{-2} \text{ Pa}$

b)  $T_1 = 80 \text{ K} : P_1 = 0,52 \times 10^{-2} \text{ Pa}$

- 15) Difuze. V nádobě je  $N_2$  při tlaku  $P_1 = 101 \text{ kPa}$ , vně je vzduch při stejném tlaku. Ve stěně je kruhový otvor s plochou  $A = 1 \text{ cm}^2$  a tloušťka stěny je  $d = 1 \text{ cm}$ , teplota je  $298 \text{ K}$ . Jak rychle bude difundovat kyslík do nádoby?



$$B = -D \frac{dn}{dx} A ; D = \frac{1}{3} v_a \lambda ; v_a = 444 \text{ m s}^{-1} ; \lambda = 6,92 \times 10^{-8} \text{ m}$$

Parciální tlak  $O_2$  ve vzduchu je  $2,12 \times 10^4 \text{ Pa}$ ,  $P = nkT$ ,  $\frac{dn}{dx} = \frac{n}{d}$ .

Výsledek:  **$B = 5,27 \times 10^{17} \text{ molekul/s}$**

- 16) Spočítejte vakuovou vodivost kruhového otvoru v molekulárním režimu proudění. Průměr otvoru je  $D_1 = 4$  cm a je v kruhové stěně s průměrem  $D_2 = 10$  cm. Počítejte i v aproximaci nekonečně velké stěny. Plynem je vzduch při teplotě 293 K.

- 17) Spočítejte vakuovou vodivost trubice s kruhovým průřezem pro vzduch a teplotu 293 K. Průměr trubice je  $D = 40$  mm, délka trubice je  $L = 1$  m. Na koncích trubice jsou tlaky:
- a)  $P_1 = 1$  kPa,  $P_2 = 2$  kPa
  - b)  $P_1 = 0,01$  Pa,  $P_2 = 0,1$  Pa

- 18) Spočítejte vakuovou vodivost trubice s kruhovým průřezem pro vzduch a teplotu 293 K. Průměr trubice je  $D = 0,15$  m, délka trubice je  $L = 0,2$  m, předpokládejte molekulární režim proudění.

- 19) K vakuové komoře připojíme vývěvu s čerpací rychlostí 170 L/s, pomocí trubice s kruhovým průřezem s délkou  $L = 1$  m a průměrem  $D = 100$  mm. Předpokládáme molekulární proudění, pracovní plyn je vzduch s teplotou 293 K. Jakou čerpací rychlostí budeme čerpat vakuovou komoru?