

Vývěvy pracující na základě přenosu impulsu

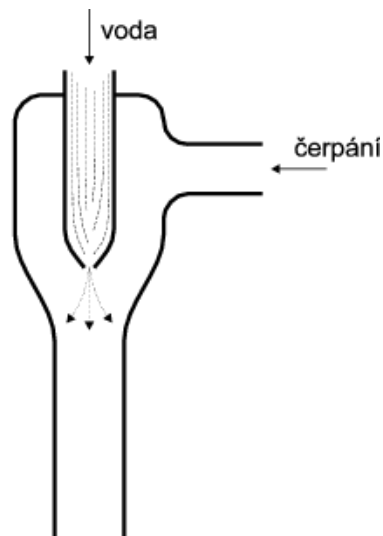
Na molekuly čerpaného plynu se různými způsoby přenáší impuls (hybnost) – v požadovaném směru čerpání - od vstupního hrdla vývěvy k výstupnímu.

Molekuly plynu mají samozřejmě stále své neuspořádané „tepelné“ rychlosti (v termodynamické rovnováze podle Maxwellova rozdělení) - převzatý impuls se tedy projevuje jako přídavná, driftová rychlost (složka rychlosti) ve směru čerpání.

1. Tryskové vývěvy

Přenosu impulsu je dosaženo při srážkách s jinými molekulami, rychle se pohybujícími daným směrem. Aby efekt přídavné rychlosti nebyl zanedbatelný, musí se „pracovní“ molekuly pohybovat rychlostí srovnatelnou se střední rychlostí plynu a jejich hmotnost by měla být co největší (při srážkách se předává hybnost, ne rychlost).

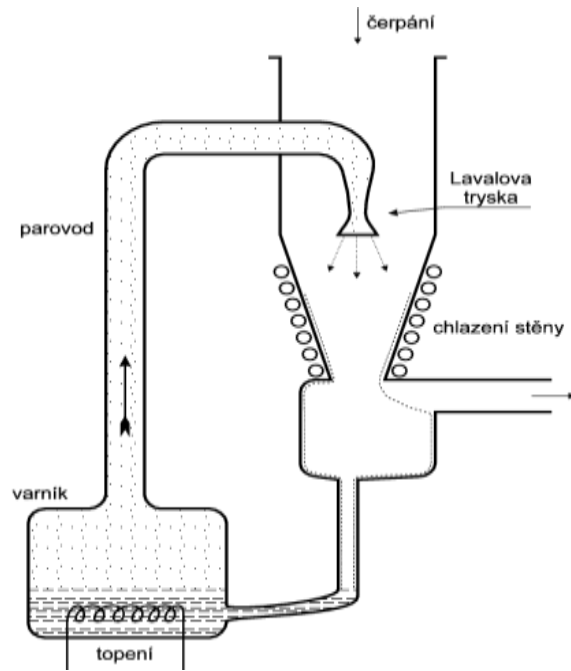
Vodní vývěva



Do těla vývěvy je tryskou rozstříkována voda pod tlakem několika atmosfér. Vnikají ale vlastně ne molekuly, ale malé kapičky, které pak „pohánějí“ molekuly čerpaného plynu směrem k výstupnímu hrdlu vývěvy. Výhodou této vývěvy je její konstrukční jednoduchost, nevýhodou pak poměrně malá čerpací rychlost (asi 10 l/s) a velká spotřeba vody. Tento typ vývěv se používal v lékařství.

Skutečné srážky molekul probíhají až u následující vývěvy:

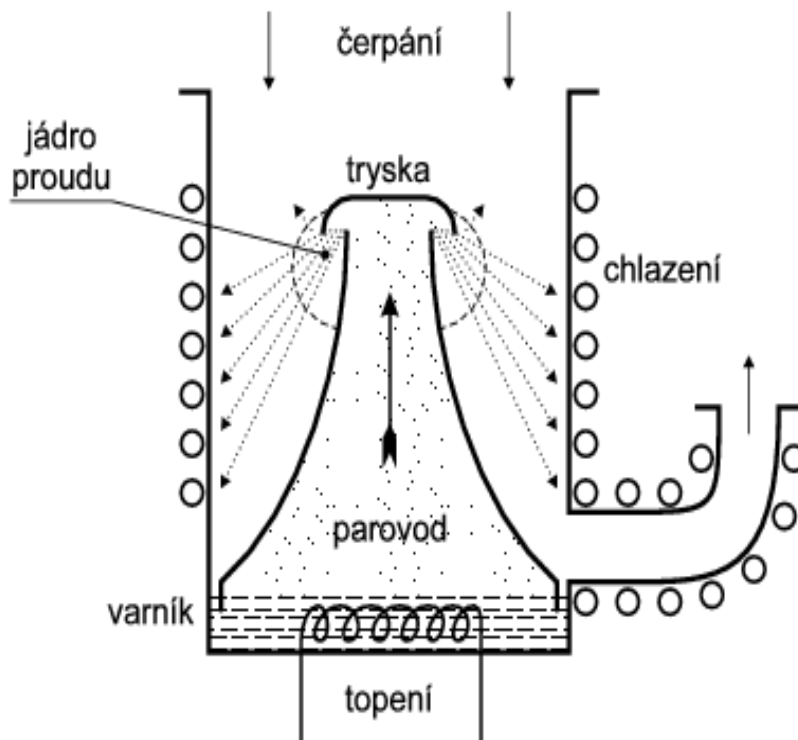
Ejektorová vývěva



Místo rozstříkované kapaliny je zde použito olejových par. Pomocí Lavalovy trysky dosáhneme nadzvukové rychlosti páry při vstupu do těla vývěvy a urychlené molekuly olejových par vytvářejí proud směrem k výstupnímu hrdlu. Výhodou vývěvy je vysoká čerpací rychlost (desetitisíce l/s), ta je však kompenzována značným zpětným tokem plynu. Vývěva se využívá v metalurgii nebo pro předčerpání velkých difúzních vývěv.

Nejdůležitější konstrukcí tryskových vývěv je:

Difúzní vývěva



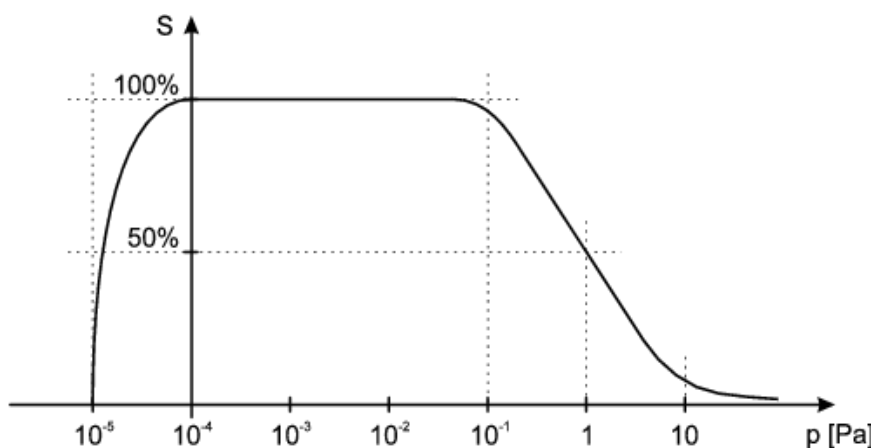
Tato vývěva vznikla úpravou konstrukce ejektorové vývěvy, spojením varníku s komorou. Speciální uspořádání trysky do tvaru kloboučku podstatně zmenšilo zpětný tok. Jako pracovní kapalina byla dříve používána rtuť, dnes se však používají syntetické (např. silikonové) oleje. Jejich výhodou je odolnost proti okysličení a mnohem menší tenze par než u rtuti.

Činnost difúzní vývěvy:

Olejoyé páry mají po průchodu tryskou nadzvukovou rychlost. Molekuly čerpaného plynu se **difúzí** dostanou do proudu olejových par a ve srážkách obdrží impuls ve směru čerpání. Olejoyé páry po dopadu na chlazenou stěnu vývěvy **kapalní a stékají** zpět do varníku.

Aby byla difúze účinná, nesmí být tlak uvnitř vývěvy příliš vysoký. Difúzní vývěva tedy vyžaduje **předčerpání** asi na 10 Pa . Vzhledem k tomu, že blízko kloboučku trysky je i přesto vysoká hustota (tlak) olejových par (tzv. **jádro proudu**), oblast čerpání je mezi tímto jádrem a stěnou vývěvy.

Čerpací rychlost vývěvy je v rozmezí desítek l/s až několika desítek tisíc l/s , **mezní tlak** závisí na počtu stupňů difúzní vývěvy. Byly zkonstruovány speciální více-**stupňové** vývěvy se rtutí, dosahující mezního tlaku až 10^{-11} Pa . Běžně se vyrábějí **třístupňové vývěvy**. U nich je mezní tlak asi o pět řádů nižší než tlak na výstupním hrdle vývěvy. Graf skutečné čerpací rychlosti pro tlak 1 Pa na výstupu vývěvy:



Praktické poznámky k provozu difúzní vývěvy:

- 1) Je nutné nastavit a udržovat **optimální teplotu oleje** (příkon varníku) a teplotu chlazené stěny. Je-li teplota výrazně vyšší, všechnen olej se vypaří a vývěva přestane pracovat. Jsou-li naopak stěny vývěvy příliš chlazeny, olej tuhne a nestéká zpět do varníku.
- 2) Velmi nebezpečné je, když **chlazení nefunguje** vůbec. Olej nekapalní a jeho **páry zaplní celou aparaturu** – proto každá difúzní vývěva má teplotní čidlo na chlazené oblasti stěny. Při zvýšení její teploty je nutno vypnout topení a vývěvu chladit alespoň vzduchem
- 3) Při vyšších tlacích přestává vývěva pracovat (proč?) , proto se jako důležitý parametr udává **maximální výstupní tlak** p_k (tzv. vakuová odolnost vývěvy). Tlak na výstupu difúzní vývěvy je také potřeba stále měřit a při jeho zvýšení ke kritické hodnotě p_k (např. vlivem netěsnosti na výstupním potrubí) se musí přerušit čerpací proces a uzavřít vstup do vakuové komory.
- 4) Problém olejových par: Tenze par pracovní kapaliny, zejména syntetického oleje, je za normální teploty (chlazené stěny vývěvy) velmi malá (10^{-9} až 10^{-11} mbar). Ale tryska prvního stupně difúzní vývěvy je nejbližší vakuovému systému, a má teplotu jen o něco nižší než teplota varníku

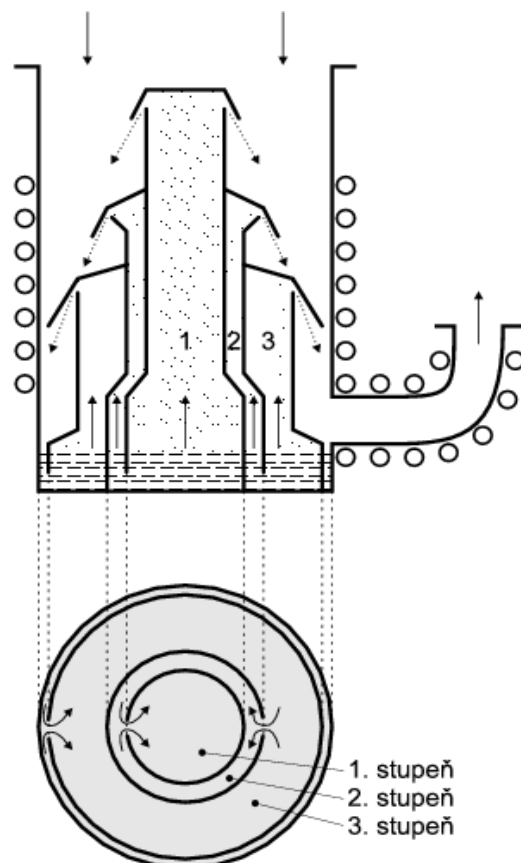
(200 °C). Spodní okraj trysky je proto intenzivním zdrojem **zpětného proudu olejových par** (několik $mg.hod^{-1}.cm^{-2}$ vstupního průřezu). Je proto nutné zajistit jeho omezení :

- (a) například **kloboukovým lapačem**, který zachytí 90 % par a zmenší čerpací rychlost o 10 % ($S_{ef} = 0,9.S_o$),
- (b) nebo vodou chlazeným samostatným **lapačem olejových par**, který zachytí 99 % par, ale zmenší čerpací rychlost i více než na polovinu ($S_{ef} = 0,5.S_o$),
- (c) pro ultravakuové systémy se používají lapače chlazené kapalným dusíkem, popř. lapače se sorpční látkou.

Vysoká pracovní teplota oleje způsobuje (u běžného ropného oleje) pozvolný rozklad jeho molekul. Vznikají lehké složky, které se snadněji odpařují a mají značně vyšší tenzi než původní olej a způsobují vyšší zpětný proud oleje. Těchto složek se olej proto musí během provozu vývěvy zbavovat **odplyňováním oleje** - zkapalněný olej stékající dolů po stěně vývěvy se na části stěny před vstupem do varníku zahřívá asi na 150 °C a vypařující se lehké složky (a absorbovaný plyn) jsou odčerpány spolu s čerpaným plynem primární vývěvou.

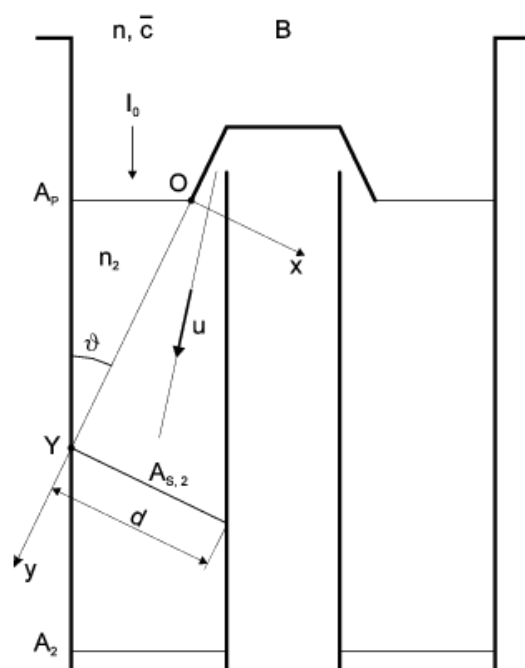
Vliv lehkých složek oleje omezuje **frakční destilace oleje** - olej se ve varníku odpařuje nejprve do třetího stupně (nejlehčí složky) a naposledy do prvního stupně (nejtěžší složky oleje s nejmenší tenzí). Rovněž při náhlém vniku vzduchu dojde ke značnému poškození olejové náplně, zejména oxidací.

Uvedené problémy nemají **syntetické oleje**, které jsou teplotně odolné, i odolné proti oxidaci i působení agresivních plynů.



Pro Vaše potěšení nyní následuje:

Jednoduchý matematický model difúzní vývěvy



Z vakuové komory B teče do vývěvy plyn o střední rychlosti \bar{c} s koncentrací částic n . Částicový proud přes prstencovou vstupní plochu A_p je (neuvažujeme omezení jádrem proudu) :

$$I_o = \frac{1}{4} n \bar{c} \cdot A_p$$

Molekuly plynu vnikají difúzí do proudu olejových par o rychlosti u a získávají přídatnou rychlost prakticky rovnou u , neboť pro hmotnosti molekul platí:

$$m_{(vzduch)} \ll M_{(olej)} \quad (m \approx 30, M \approx 500)$$

Vzniká proud plynu I_2 přes plochu $A_{s,2}$, který směřuje dolů k druhému stupni difúzní vývěvy nebo k primární vývěvě. Označme W_p pravděpodobnost čerpání (tj. že molekula, která vnikne do vývěvy, difunduje do proudu olejových par, získá rychlost u a projde dolů plochou $A_{s,2}$). Pak můžeme psát:

$$I_2 = I_o \cdot W_p = \frac{1}{4} n \bar{c} \cdot A_p \cdot W_p$$

a čerpací rychlost vývěvy – objemový proud - je tedy:

$$S = \frac{1}{n} \cdot I_2 = \frac{1}{n} \cdot I_o \cdot W_p = \frac{1}{4} \bar{c} \cdot A_p \cdot W_p = S_o \cdot W_p$$

kde:

- S_o je čerpací rychlost ideální vývěvy bez zpětného proudu (jmenovitá).

Zpětný proud I_1 je tvořen molekulami, které nepodlehly procesu čerpání. Označme n_2 hustotu plynu za sacím hrdlem vývěvy (za plochou A_p), v prostoru před proudem olejových par. Pak lze tento zpětný proud vyjádřit:

$$I_1 = \frac{1}{4} n_2 \bar{c} \cdot A_p$$

a tedy zřejmě platí:

$$I_o = I_1 + I_2$$

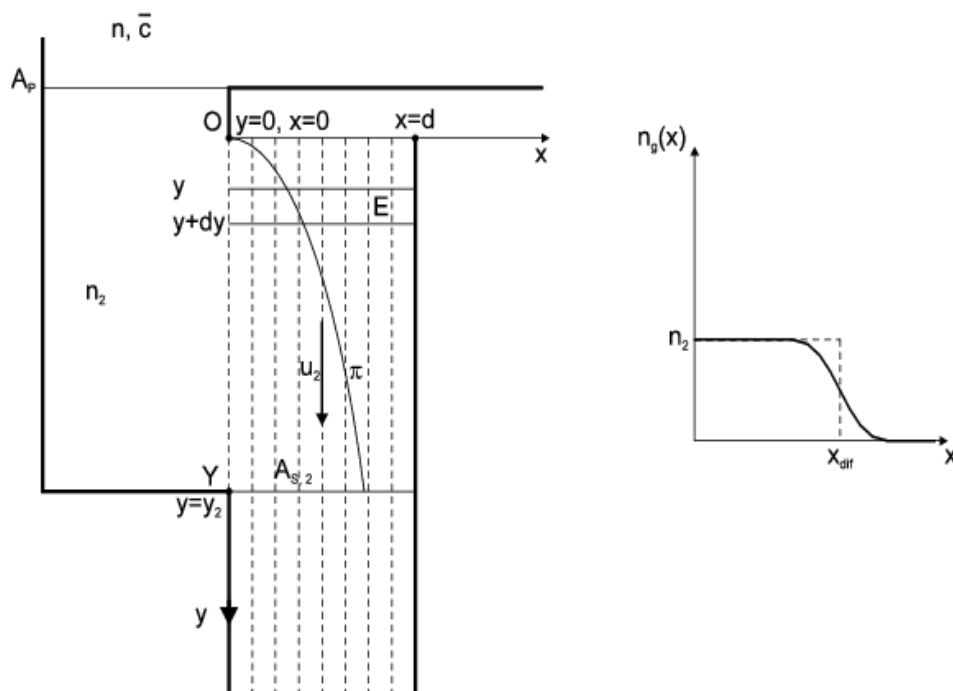
Vyjádříme I_2 a dosadíme za I_o a I_1 z rovnic (14) a (17):

$$I_2 = I_o - I_1 = \frac{1}{4} n \bar{c} \cdot A_p - \frac{1}{4} n_2 \bar{c} \cdot A_p = \frac{1}{4} n \bar{c} \cdot A_p \left(1 - \frac{n_2}{n}\right)$$

Porovnáním vzniklého vztahu (19) s rovnicí (15) dostáváme výraz pro pravděpodobnost čerpání :

$$W_p = \left(1 - \frac{n_2}{n}\right)$$

Pro další výpočty zjednodušíme tvar proudu olejových par na pravoúhlý svazek s konstantní hustotou, jak ukazuje následující obrázek:



Sledujme element E svazku olejových par mezi y a $y+dy$. Na jeho levém okraji je hustota plynu n_2 . Jestliže je element E v čase $t=0$ a v místě $y=0$ bez plynu (pouze molekuly oleje), pak v čase t je zaplněn difundujícími molekulami s hustotou n_g podle obrázku nahoře vpravo. Označíme-li difúzní koeficient plynu ve svazku olejových par jako D , pak výpočet podle difúzní

teorie dává pro souřadnici polovičního poklesu koncentrace x_{dif} vztah:

$$x_{dif} = \sqrt{Dt}$$

Vezměme zjednodušený obdélníkový průběh (čárkovaně). Element E je naplněný plynem s hustotou $n_g = n_2$ do vzdálenosti x_{dif} , dále je prázdný. Protože element E se pohybuje rychlostí u_2 , je v čase t na místě $y = u_2 \cdot t$, je tedy zaplněný až k souřadnici:

$$x_{dif} = \sqrt{D \frac{y}{u_2}}$$

jak znázorňuje parabola π . Vidíme, že proud I_2 neteče celou plochou $A_{S,2}$, ale pouze její částí, kterou můžeme stanovit podílem x_{dif}/d a tedy:

$$I_2 = n_2 \cdot u_2 \cdot A_{S,2} \cdot \frac{x_{dif}}{d} = n_2 \cdot u_2 \cdot \frac{A_2}{\cos(\vartheta)} \cdot \frac{x_{dif}}{d}$$

Tento proud bude zjevně maximální pro $x_{dif} = d$, čehož lze dosáhnout konstrukčními parametry vývěvy. Můžeme tak napsat vztah pro maximální I_2 :

$$I_{2max} = n_2 \cdot u_2 \cdot \frac{A_2}{\cos(\vartheta)}$$

Se znalostí I_2 nyní vypočítejme pravděpodobnost čerpání difúzní vývěvy. S využitím rovnic (15) a (18), dostaneme:

$$W_p = \frac{I_2}{I_o} = \frac{I_2}{I_2 + I_1} = \frac{I}{1 + \frac{I_1}{I_2}}$$

Dosadíme za I_1 a I_2 z rovnic (17) a (21) a dostáváme:

$$\begin{aligned} W_p &= \frac{I}{1 + \frac{\frac{1}{4} n_2 \bar{c} \cdot A_p}{n_2 \cdot u_2 \cdot \frac{A_2}{\cos(\vartheta)} \cdot \frac{x_{dif}}{d}}} = \frac{I}{1 + \frac{A_p \cos(\vartheta)}{A_2} \cdot \frac{\bar{c}}{4u_2} \cdot \frac{d}{x_{dif}}} = \\ &= \frac{I}{1 + a \frac{\bar{c}}{4u_2}} \end{aligned}$$

kde:

$$\bullet a = \frac{A_p \cos(\vartheta)}{A_2} \cdot \frac{d}{x_{dif}} \text{ je parametr difúzní vývěvy, daný její konstrukcí.}$$

- Chceme u_2 velké, aby $W_p \rightarrow 1$.

Nyní můžeme podle vzorce (16) vypočítat **čerpací rychlost**:

$$S = S_o \cdot W_p = \frac{l}{4} \bar{c} A_p \cdot \frac{l}{l + a \frac{\bar{c}}{4u_2}}$$

Tento vztah pro S dobře vysvětluje rovnou část křivky čerpací rychlosti $S = S(p)$, kde je čerpací rychlost v širokém rozsahu tlaků konstantní. Ze vztahu je také vidět, že čerpací rychlost difúzní vývěvy závisí na druhu čerpaného plynu (\bar{c} a také a neboť obsahuje dif. koeficient). Například $S(\text{H}_2) = 1,5S(\text{N}_2)$, $S(\text{Ar}) = 0,9S(\text{N}_2)$.

Za mezního tlaku sice stále probíhá popsany čerpací proces, ale proud I_0 je vykompenzován zpětným proudem I_1 . Čerpací proud I_2 je tedy podle rovnice (18) nulový. Přesněji řečeno za předpokladu, že čerpací proces stále probíhá, proud I_2 nulový není, ale je kompenzován proudem I'_2 , tj. zpětným difúzním proudem plynu ve svazku olejových par:

$$I_0 = I_1 + I_2 - I'_2$$

Tento zpětný difúzní proud lehce vypočítáme v úseku svazku olejových par od průřezu $A_{s,2}$ ($y = y_2$) do místa zániku tohoto svazku ($y = y_2 + L$) na stěně difúzní vývěvy. V každém místě tohoto úseku je čerpací proud plynu vyrovnán zpětným difúzním proudem a tedy platí:

$$n(y)u_2A(y) = A(y)D \frac{dn(y)}{dy}$$

Provedeme integraci této rovnice v úseku L:

$$\frac{u_2}{D} \int_{y_2}^{y_2+L} dy = \int_{n_2}^{n_L} \frac{dn}{n}$$

$$\frac{u_2 L}{D} = \ln \frac{n_L}{n_2}$$

Můžeme vyjádřit poměr koncentrací n_L/n_2 , což je vlastně poměr tlaků na výstupu ($p_{výst}$) a vstupu (p_{vst}) difúzní vývěvy, tzv. **mezní kompresní poměr** K_0 :

$$K_0 = \frac{p_{výst}}{p_{vst}} = \frac{n_L}{n_2} = e^{\frac{u_2 L}{D}}$$

Veličiny L a u_2 jsou konstantami pro určitou konstrukci difúzní vývěvy, difúzní koeficient D je dán hustotou olejových par:

$$D \approx \frac{l}{n_{olej}}$$

Hustota olejových par je dána rychlostí vypařování oleje, která závisí na příkonu varníku Q :

$$n_{olej} \approx Q$$

Pro kompresní poměr tedy platí:

$$K_o = \frac{p_{výst}}{p_{vst}} = e^{konst \cdot Q}$$

nebo jinak zapsáno:

$$\ln p_{vst} = \ln p_{výst} - konst \cdot Q$$

Z uvedených výpočtů je vidět, že činnost dané konstrukce difúzní vývěvy lze měnit a optimalizovat zejména změnou příkonu jejího varníku.

2. Molekulární vývěvy

Přenos impulsu probíhá při srážkách molekul s pevným tělesem - jeho povrch opouští molekula „tepelnou“ rychlostí (podle Maxwellova rozdělení), jejíž velikost závisí na teplotě povrchu a směr je určen kosinovým zákonem. K této tepelné rychlosti se pak přičítá přídavná rychlost (složka) - rovná rychlosti pohybu tělesa (tzv. „drag“ princip).

Aby tato složka rychlosti byla výrazná, musí být srovnatelná se (střední) rychlostí molekul. Takové rychlosti (stovky m/s) lze dosáhnout jedině při rotaci. Molekuly pak získávají přídavnou složku rychlosti rovnou obvodové rychlosti rotujícího tělesa.

Například, aby malý rotor o poloměru 5 cm měl obvodovou rychlost 300 m/s, musí dosáhnout otáček: $f = v/2\pi r = 300/2\pi \cdot 0,05 = 1\,000 \text{ Hz} = 60\,000 \text{ ot/min}$

U většího rotoru pak postačí menší otáčky.

Dále je potřeba uvážit **vliv tlaku** čerpaného plynu: Aby získaná složka rychlosti molekuly měla za následek nějaký čerpací efekt – tedy přesun molekul ve směru čerpání – musí mít molekula možnost urazit nezanedbatelnou dráhu – musí mít tedy co nejdélší střední volnou dráhu.

Při pohybu (proudění) molekul ve vývěvě by tedy měla platit známá **molekulární podmínka**:

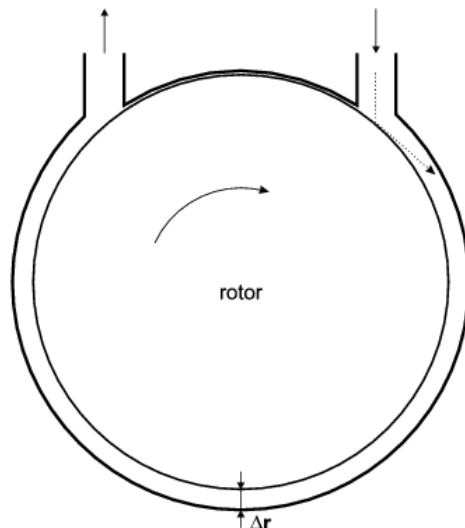
$$\bar{l} > d$$

Molekulární vývěvy musí být proto za provozu předčerpávány další vývěvou - primární vývěvou.

První vývěvou tohoto typu byla:

Gaedeho molekulární vývěva

(W. Gaede, 1912 - 13)



Rotor Gaedeho vývěvy se otáčel rychlostí přibližně $10\,000\text{ ot/min}$. Mezera mezi rotorem a statorem (Δr) byla velká přibližně $0,1\text{ mm}$ (pro splnění molekulární podmínky $\bar{l} > \Delta r$, tj. aby mezera byla užší než střední volná dráha molekul plynu). Kvůli této malé mezeře byla čerpací rychlost vývěvy poměrně nízká, asi 5 l/s .

Dalšími konstrukcemi molekulárních vývěv jsou:

Holweckova vývěva

(F. Holweck, 1922 - 23)

Válcový stator se šroubovou drážkou, válcový rotor.

Siegbahnova vývěva

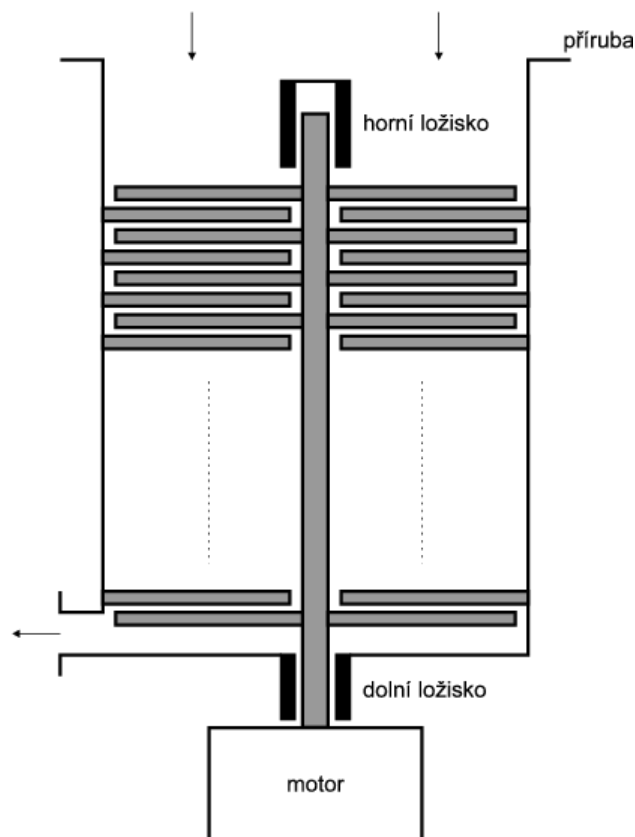
(M. Siegbahn, 1927 - 29)

Stator i rotor ve tvaru kotouče, ve statoru rozvíjející se spirálová drážka.

Širokého využití dosáhla až :

Turbomolekulární vývěva

(W. Becker, firma Pfeiffer, 1958)



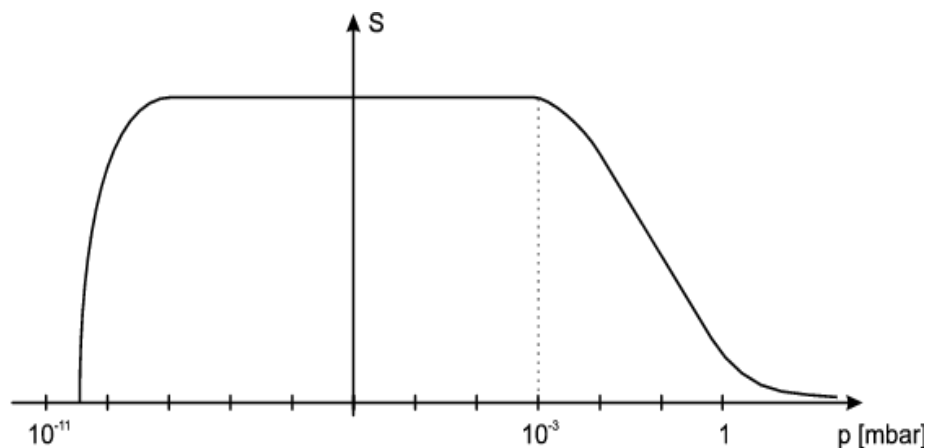
Oproti Gaedeho vývěvě má složitější uspořádání rotoru a statoru. Lopatky, podobné jako u parních turbín, jsou uspořádané na jedné hřídeli v několika stupních. Relativně velké mezery (až 1 mm) mezi lopatkami umožňují použití vysokých otáček rotoru (až 100 000 ot/min). Motor je u nových konstrukcí umístěný ve vakuu (jakou to má výhodu ?)

Molekuly opět po srážce s lopatkami získávají složku rychlosti danou otáčivou rychlostí lopatek a kosinovým zákonem odrazu molekul od plochy lopatek. Pro splnění molekulární podmínky potřebuje turbomolekulární vývěva rovněž předčerpání primární vývěvou.

Stator vývěvy i motoru lze dobře chladit, ovšem teplota rotoru může dosáhnout vysokých hodnot (tření lopatek o plyn, indukovaný proudy v motoru) a mohla by poškodit mazací náplň ložisek.

Obě ložiska (horní a dolní) jsou také velmi namáhaná vysokými otáčkami a jsou proto rizikovou částí vývěvy. U prvních konstrukcí byla použita kuličková ložiska s cirkulací oleje, což se i dnes někdy používá, ale s keramickými kuličkami. Pro menší vývěvy postačí mazání stabilní tukovou náplní. Horní ložisko, které je přímo u čerpaného prostoru (a organické páry z jeho náplně mohou být nežádoucí), se většinou nahrazuje magnetickým závěsem - navíc se sníží tření v ložisku, což umožňuje zvýšit otáčky rotoru a tím i čerpací rychlost vývěvy

Graf čerpací rychlosti ukazuje, že turbomolekulární vývěva může pracovat v širokém oboru tlaků, od středního vakua až po ultravysoké vakuum (jehož dosažení ovšem vyžaduje současné použití speciálních materiálů a postupů) :



Pro využití rovne části s maximální čerpací rychlostí se musí mezní tlak primární vývěvy co nejvíce blížit hodnotě $10^{-3} \text{ mbar} = 0,1 \text{ Pa}$, je tedy nutné předčerpání dvoustupňovou olejovou rotační vývěvou. Z grafu čerpací rychlosti je také vidět, že turbomolekulární vývěva čerpá i při tlaku větším než 1 mbar - ale rotor se třením o plyn příliš zahřívá.

Vnější vzhled a rozměry turbomolekulární vývěvy umožňují jednoduchou náhradu difuzní vývěvy a tím výraznou modernizaci čerpacího systému.

Kompresní poměr závisí exponenciálně na \sqrt{M} , je tedy nejnižší pro vodík a helium:

- aplikace v heliovém hledači s protiproudovým principem
- kompresní poměr pro vodík obvykle určuje mezní tlak vývěvy, který lze reálně dosáhnout – hlavní složkou zbytkové atmosféry je nejčastěji právě vodík, uvolňovaný z nerezové oceli, většinou používané k výrobě vakuových komor
- naopak vysoký kompresní poměr pro těžké olejové molekuly vytváří účinnou bariéru proti zpětné difúzi olejových par z primární vývěvy

Moderní konstrukce turbomolekulárních vývěv jsou většinou typu „hybrid“ („compound“) – jsou tvořeny **kombinací turbomolekulární vývěvy s výstupním molekulárním stupněm**, zejména Holweckova typu :

- Tyto vývěvy mají vysoký kompresní poměr, vyšší výstupní tlak a mohou čerpat velký proud plynu.
- Vysoký výstupní tlak řádu několika mbar pak umožňuje použít k předčerpání např. membránovou vývěvu, nebo jinou **bezolejovou vývěvu**.

Tím i **celý čerpací systém se stane skutečně bezolejovým (suchým) systémem**, velmi vhodným například pro plazmové technologie, analytické systémy, elektroniku,

Pro superčisté aplikace se i dolní ložisko rotoru nahradí ložiskem magnetickým, případně mohou být obě ložiska **elektromagnetická**.

Pro případ silných vibrací rotoru, mechanického šoku a u elektromagnetických ložisek i vypnutí napájení, jsou tato ložiska doplněna nouzovými suchými keramickými ložisky, která jsou v dotyku s hřídelí rotoru jen v těchto výjimečných situacích.

Praktické poznámky k provozu turbomolekulární vývěvy:

- Vývěva se zahřívá zejména při provozu za vyššího tlaku a při vyšších proudech čerpaného plynu (zejména rotor, ze kterého je teplo špatně odváděno) - pak je nutné intenzivní chlazení (vodní chlazení).
- Vniknutí většího tělíška do roztočeného rotoru bývá pro vývěvu zničující, proto se na vstup vývěvy dává jemné síto.
- Náhlé zastavení rotoru z důvodu zadření či poškození ložisek vede může rovněž vést k poškození vývěvy. U ložisek mazaných olejem je nutno kontrolovat hladinu oleje a všimnout si zvukových projevů, podezřelé ložisko vyměnit, dbát na pravidelnou údržbu.
- Rovněž náhlé vniknutí (atmosférického) vzduchu do vývěvy vede přinejmenším k poškození ložisek

Rootsova vývěva

Základní princip činnosti - dvojice proti sobě rotujících lopatek tvaru osmičky - si registroval George Jones z Birminghamu v Anglii roku 1843 (a vyrobil jako dmyhadlo 1847).

Údajně nezávisle, asi o 10 let později – kolem 1854 – ke stejnému uspořádání rotorů dospěli bratři Philander Higley a Francis Marion **Roots** v Connerville (Indiana, USA) při pokusech o vylepšení vodního motoru (turbíny) v jejich rodinné firmě na zpracování vlny (Woolen Mill, na břehu průplavu Whitewater Canal). Při pokusech na suchu ale zjistili, že jejich „motor“ je silným fukarem vzduchu, proto ho roku 1860 patentovali jako dmyhadlo vzduchu pro vysoké pece..

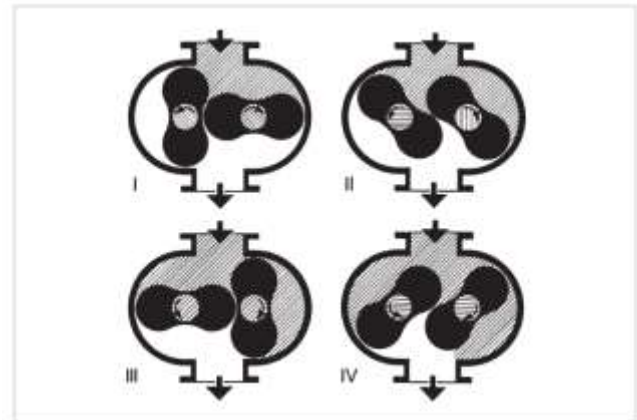
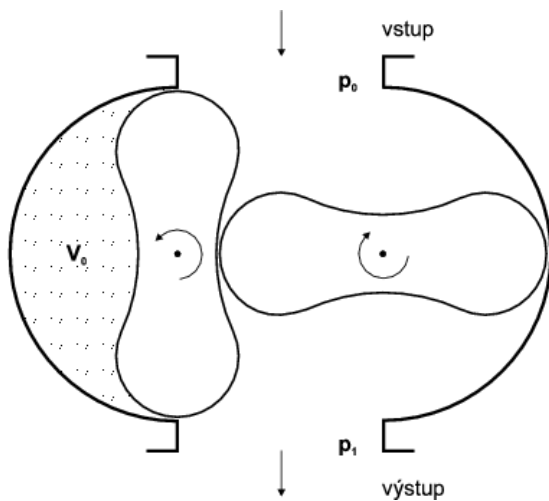
Po dalších patentovaných vylepšeních se toto dmyhadlo ukázalo jako velmi efektivní stroj a rychle se šířilo jako „Roots blower (pump)“ po celém světě, do všech průmyslových odvětvích (hutě, ocelárny, doly, čistírny vody, pneumatická doprava).

Kolem roku 1900 se začalo také používat pro přeplňování (velkých) spalovacích automobilových motorů, zejména naftových, také leteckých...

První použití Rootsova dmyhadla jako vývěvy se objevilo v Německu v roce 1944 – bylo nasazeno jako čerpadlo pro vakuové tavení kovů, kde bylo zapotřebí rychle odčerpávat velké objemy plynů. Širší uplatnění ve vakuové technice pak nastalo až od roku 1954.

Tento trend širokého využití Rootsova principu existuje i v současnosti - více než polovina vzduchových a plynových čerpadel v průmyslu je Rootsovy konstrukce (kromě dvou, také 3 a 4 lalokové rotory), s výkony i přesahujícími 100 000 m³/hod.

Popis činnosti Rootsovy vývěvy:



Dva rotory ve tvaru osmičky (piškotu) se synchronně otáčejí rychlostí až několik tisíc ot/min, přičemž se nedotýkají stěn statoru a ani sebe vzájemně.

Mezery jsou široké pouze několik desetin *mm*, aby jimi pronikalo co nejméně čerpaného plynu. Během každé otáčky se mezi každým rotorem a stěnou statoru uzavírá určitý objem plynu V_0 a **bez stlačení** je přenesen ze vstupu na výstup.

Jak je typické pro vývěvy s přenosem impulsu, je k provozu třeba nízkých tlaků, tj. i Rootsova vývěva potřebuje předčerpání.

Zajímavá konstrukce této vývěvy je ovšem příčinou, že vývěva čerpá i při vyšších tlacích, ale rotory se třením o vzduch silně zahřívají (protože se nedotýkají statoru, jejich chlazení není jednoduché). Navíc je vodivost štěrbin při vyšších tlacích daleko vyšší než v oboru nízkých tlaků, což zvyšuje zpětný proud plynu.

Protože mezi rotory a statorom neexistuje tření, je možné používat vyšší otáčky (do 6000/min.) a podle velikosti rotorů může vývěva dosáhnout vysoké **čerpací rychlosti** (stovek až desítek tisíců $\text{m}^3/\text{hod.}$).

Dalším základním parametrem Rootsovy vývěvy je kromě čerpací rychlosti také **maximální tlakový rozdíl** Δp mezi výstupním a vstupním hrdlem vývěvy, při kterém vývěva může pracovat.

Mezní tlak Rootsovy vývěvy se neudává, závisí totiž na použité primární vývěvě, resp. na jejím mezním tlaku.

Uvádí se ale tzv. **kompresní poměr při mezním tlaku** p_0 :

$$K_o = \frac{p_1}{p_0}$$

Odvodíme tuto veličinu za jednoduchých předpokladů:

Nechť n je počet otáček rotorů vývěvy za jednotku času. Pak objem přenesený rotory ze vstupu na výstup za jednotku času, tj. teoretická čerpací rychlost vývěvy (S_0) je:

$$S_0 = 4V_0n$$

a odpovídající čerpací pV-proud:

$$q_0 = p_0 S_0$$

Zpětný proud z výstupu na vstup je tvořen pV-proudem plynu přes štěrbinu o vodivosti C :

$$q_{Z1} = C(p_1 - p_0)$$

a také je určité množství plynu (vyjádřené pV-proudem q_{Z2}) za jednotku času přímo povrchy rotorů přenášeno zpět z výstupu na vstup:

Při vyšším tlaku p_1 na výstupu vývěvy adsorbovaný plyn se při otočení rotoru dostane do vstupu vývěvy, kde desorbuje při nižším tlaku p_0 - tento jev se nazývá **povrchový přenos** (surface carry-over). Částicový desorpční tok převedeme na pV-proud (viz kapitoly o povrchových procesech a proudění plynu):

$$q_{Z2} = kT \cdot j_{des}$$

Celkový zpětný pV-proud je tedy:

$$q_Z = q_{Z1} + q_{Z2} = C(p_1 - p_0) + q_{Z2}$$

A výsledný pV-proud plynu do vývěvy je pak:

$$q = q_0 - q_Z = p_0 S_0 - C(p_1 - p_0) - q_{Z2}$$

Po vydělení vstupním tlakem p_0 dostaneme objemový proud plynu do (vstupu) vývěvy, neboli její skutečnou čerpací rychlost:

$$S = S_0 - \frac{C(p_1 - p_0)}{p_0} - \frac{q_{Z2}}{p_0}$$

Dále uvážíme, že při mezním tlaku p_0 je tento proud nulový:

$$0 = S_0 - \frac{C(p_1 - p_0)}{p_0} - \frac{q_{Z2}}{p_0}$$

A z této rovnice lehce vypočítáme kompresní poměr:

$$K_o = \frac{p_1}{p_o} = \frac{S_0}{C} + 1 - \frac{q_{Z2}}{p_0 \cdot C}$$

Vidíme, že kompresní poměr je funkcí vstupního tlaku (p_o).

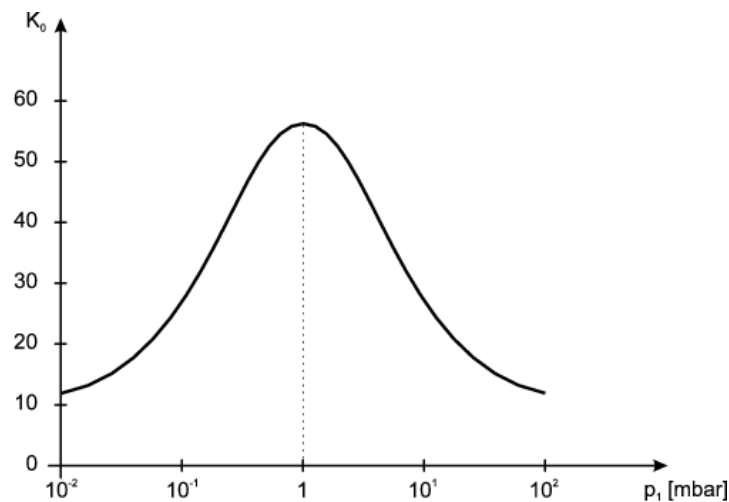
Při vyšším tlaku - v oboru viskózního proudění ($p_o > 1000$ Pa) - s rostoucím tlakem K_o klesá, neboť vodivost štěrbin se zvyšuje s tlakem (je přímo úměrná střednímu tlaku).

Při nízkém tlaku - v oboru molekulárního proudění ($p_o < 0,1$ Pa) - protože je vstupní tlak ve jmenovateli záporného členu, roste tento člen s klesajícím tlakem (navíc vodivost štěrbin se již nemění a je také velmi malá) při konstantním prvním členu - kompresní poměr tedy klesá.

(Bez započtení jevu povrchového přenosu plynu na rotorech Rootsovy vývěvy ve třetím členu na pravé straně rovnice by tedy nebylo možné vysvětlit pokles kompresního poměru při nízkých tlacích.)

V přechodové oblasti středních tlaků proto existuje jistá maximální hodnota kompresního poměru - tzv. **Roots peak** - u většiny standardních Rootsových vývěv v rozmezí tlaků 0,1 mbar až 1 mbar.

(Pro vzduch kolem 0,5 mbar, s hodnotou maxima 20 až 50, pro lehké plyny blíže k 1 mbar s hodnotou výrazně nižší - místo 50 např. 10)



Rootsova vývěva se nejčastěji předčerpává primární rotační vývěvou, protože výrazně zvýší její čerpací rychlost a sníží mezní tlak (minimálně o 1 řád).

Známe-li mezní tlak použité primární vývěvy (p_1) a kompresní poměr Rootsovy vývěvy K_o , můžeme vypočítat mezní tlak p_o Rootsovy vývěvy - tj. výsledný mezní tlak této **soustavy vývěv**:

$$p_o = \frac{p_1}{K_o}$$

mezní tlak Rootsovy vývěvy s primární vývěvou

Sériovým spojením několika sad (5 až 8) Rootsových rotorů se společným pohonem byly v také úspěšně zkonstruovány **vícestupňové Rootsovy vývěvy (Multi-stage Roots pumps)**, které čerpaný plyn postupně stlačují až na tlak vyšší než 1 bar – takže nepotřebují primární vývěvu - a samy jsou schopné pracovat od atmosférického tlaku až na hranici vysokého vakua (0,1 Pa).