

Vážení zákazníci,

dovolujeme si Vás upozornit, že na tuto ukázkou knihy se vztahují autorská práva, tzv. copyright.

To znamená, že ukáзка má sloužit výhradně pro osobní potřebu potenciálního kupujícího (aby čtenář viděl, jakým způsobem je titul zpracován a mohl se také podle tohoto, jako jednoho z parametrů, rozhodnout, zda titul koupí či ne).

Z toho vyplývá, že není dovoleno tuto ukázkou jakýmkoliv způsobem dále šířit, veřejně či neveřejně např. umístováním na datová média, na jiné internetové stránky (ani prostřednictvím odkazů) apod.

redakce nakladatelství BEN – technická literatura
redakce@ben.cz



5. Základy vakuové techniky a technologie

Vakuová technika a technologie je velmi významným oborem umožňujícím průběh procesů bez vlivů běžné atmosféry. Volný pohyb částic ve vakuu umožňuje konstrukci elektrovakuových systémů, jako jsou elektronky, obrazovky, elektronové mikroskopy, implantátory, urychlovače. Ve vakuu je možno provádět přípravu definovaných tenkých vrstev a tenkovrstvových systémů, což má zásadní význam pro mikroelektroniku. Ve zvlášť kvalifikovaném vakuu, jako je ultravakuum, je možno pracovat s atomárně čistými povrchy a využívat jejich zvláštních vlastností. Rozvoj řady oborů, např. fyziky pevných látek, fyziky plazmatu, jaderné fyziky, kosmického výzkumu a elektroniky, by bez účasti fyziky nízkých tlaků a vysokovakuové techniky a technologie nebyl možný. Specialisté v oboru elektrotechnologie a mikroelektroniky musí být proto velmi dobře obeznámeni se základy vakuové fyziky, techniky a technologie.

5.1 Význam a využití vakuové techniky a technologie

Využití vakuové techniky a technologie je rozsáhlé jak v různých vědních oborech, tak i v průmyslu. Dva obecné a hlavní důvody užití nízkých tlaků jsou tyto:

- a) Vakuová technika poskytuje jediný způsob, jak umožnit částicím volný pohyb v prostoru na základě zmenšení celkové koncentrace ostatních částic a tím zvětšení volné dráhy částic. Tak např. volný elektron v atmosféře za normálních podmínek nemůže urazit delší dráhu, než je jeho střední volná dráha, tj. přibližně desetitisícinu milimetru, tj. délka tak malá, že odpovídá vlnovým délkám světla; po proběhnutí této dráhy se sráží elektron s molekulou. Za těchto okolností nelze tedy využít některých vlastností elektronu. Pohybu elektronu lze však využít ve vakuovém systému, v němž je koncentrace molekul tak malá, že střední volná dráha elektronu je desítky i stovky metrů dlouhá (při tlaku 10^{-4} Pa je střední volná dráha 50 m).
- b) Dále vakuová technika dovoluje, aby procesy probíhající v objemu a zejména na povrchu proběhly bez účasti vnějších, nežádoucích procesů. Tak např. žhavé wolframové vlákno v atmosféře za normálních podmínek shoří (okyslíčí se) za zlomek sekundy. Ve vakuovém systému při tlaku 10^{-5} Pa okysličení probíhá velmi pomalu, takže vlákno za těchto okolností může být žhaveno dlouhou dobu, aniž by se poškodilo (žárovka).

Velmi často se užívá nízkých tlaků z obou důvodů zároveň; tak např. v elektronkách je nutno užít nízkých tlaků jak k zajištění volného pohybu elektronů, tak k ochraně katody, žhavé elektrody emitující elektrony.

Vakuová technika má význam pro technické a průmyslové obory a pro ostatní vědní disciplíny. Jejich výrobky jsou buď přímo vakuové systémy (vakuové žárovky) nebo systémy, při jejich výrobě bylo použito vakuové metodiky (vyčerpání výbojek, záři-

vek, doutnavek). Rozsah elektrovakuového průmyslu nespočívá jen v objemu výroby, ale též ve velkém sortimentu různých výrobků. Elektrovakuový průmysl zasahuje svými výrobky do všech ostatních průmyslových oborů a možno říci, do všech oborů lidské činnosti; těžko bychom si představili v naší době život bez rozhlasu, filmu i televize a bez elektrického osvětlení.

Dalším průmyslovým odvětvím, využívajícím vakuové techniky, je chemický průmysl. Vakuová a molekulární destilace jsou hojně užívanými způsoby přípravy některých látek, hlavně organických. Moderní impregnační technika využívá vakuového zpracování materiálu před vlastním impregnačním procesem. Velmi významné je využití vakuového pokovování k úpravě povrchů kovových i nekovových. Pokrývání průhledných látek reflexními, semireflexními nebo antireflexními vrstvičkami vypořádaním ve vakuu je důležité pro optický průmysl.

Příprava tenkých vrstev ve vysokém a zejména v ultravysokém vakuu poskytuje vrstvy o vlastnostech, kterých se s výhodou užívá v mikroelektronických prvcích a mikrominiaturních obvodech.

K uvedeným oborům přistupuje rychle se rozvíjející vakuová metalurgie, která představuje především výrobu kvalitních ocelí. K vakuovému zpracování oceli přistoupilo zpracování materiálů, které nebylo možné provádět za atmosférických podmínek; pozoruhodná metoda je vakuová sintrace, která umožnila výrobu slitin práškovou metalurgií, které nelze provádět obvyklou tavbou.

Vakuová technika umožnila realizaci a rozvoj metod sváření, dělení, vrtání a opracování materiálů pomocí optiky svazků nabitých částic (elektronovým, iontovým svazkem).

Studium procesů v ionizovaném plynu vyžaduje použití vysoce čistých plynů; užitím velmi nízkých tlaků lze snížit stupeň znečištění až na hodnotu $1 : 10^{12}$. Dále se vakuová fyzika uplatnila při studiu molekulárních svazků tenkých vrstev, struktury pevných látek a významnou měrou v katodové elektronice – při studiu emise elektronů a iontů.

Poznámka: Pro názornost jsou v tab. 5.1 uvedeny jednotky tlaku a jejich přepočet vč. specifikace normálních fyzikálních podmínek.

Tabulka 5.1 Přepočet jednotek tlaku.

Jednotka	Pa	bar	Torr
1 Pa = 1 N/m ²	1	10 ⁻⁵	7,5006 · 10 ⁻³
1 bar = 10 ⁵ Pa	10 ⁵	1	7,5006 · 10 ²
1 Torr = 1 mmHg	1,3332 · 10 ²	1,3332 · 10 ⁻³	1

Normální fyzikální podmínky:

tlak: $p_n = 10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ bar} = 750 \text{ Torr}$

teplota: $t_n = 0 \text{ °C}$, $T_n = 273,15 \text{ K}$

tíhové zrychlení: $g_n = 9,80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

(na povrchu země: $g_z = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

5.2 Čerpání plynů a typy vývěv

K rychlému dosažení potřebného vakua se používá vývěv, které jsou součástí čerpacího vakuového systému; jejich úlohou je odstraňovat molekuly plynu z objemu vlastního vakuového systému.

Podle pracovních principů můžeme vývěvy rozdělit do dvou hlavních skupin:

- 1) Vývěvy pracující na základě přenosu molekul – transportní vývěvy.
- 2) Vývěvy pracující na základě vazby molekul na svých stěnách.

Charakteristickými veličinami vývěv je čerpací rychlost a mezní tlak. Rozličné vlastnosti různých vývěv je možno charakterizovat ještě dalšími veličinami a závislostmi, jako: závislost čerpací rychlosti na druhu čerpaného plynu, složení zbytkových plynů, dovolený vstupní tlak čerpaného plynu, dovolený výstupní tlak.

Základní principy a druhy vývěv jsou uvedeny v přehledové tab. 5.2

Tabulka 5.2 Základní principy a druhy vývěv.

Skup.	Princip	Druh	Obr.
1.	Vývěvy pracující na základě přenosu molekul = transportní vývěvy		
1.1	Vývěvy s pracovní komorou a periodicky se měnícím pracovním objemem		
	Pístová vývěva		
	Rotační vývěva /Gaedeho	šoupátková olejová – jednostupňová	5.1
		šoupátková olejová – dvoustupňová	5.2
1.2	Vývěvy pracující na základě přenosu impulzu		
	Dmychadla		
	Molekulární vývěvy	turbomolekulární	5.3
	Vodní, ejektorové, difuzní vývěvy	vodní vývěva	5.4
		ejektorová (trysková) vývěva	5.5
		difuzní vývěva olejová	5.7
		difuzní vývěva rtuťová	5.8
2.	Vývěvy pracující na základě vazby molekul na svých stěnách		
2.1	Kondenzační kryogenní vývěvy		
		kryosorpční (molekulární) síta	5.9
		kondenzační chlazené heliem	5.10
2.2	Sorpční vývěvy		
		getrování aktivního kovu (chemisorpce)	
		s vypařováním a rozprašováním titanu	
2.3	Iontové vývěvy		

V dalším budou probrány některé významné druhy vývěv.

5.2.1 Vývěvy pracující na základě přenosu molekul – transportní vývěvy

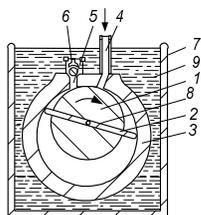
Transportní vývěvy je možno rozdělit podle způsobu přenosu do dvou podskupin:

- Vývěvy s pracovní komorou, která v první části cyklu zvětšuje svůj objem, a proto v ní klesá tlak; v druhé části čerpacího cyklu se komora oddělí od systému, její objem se zmenšuje, až se plyn v ní stlačí natolik, že se vytlačí výstupním otvorem vývěvy ven do okolního prostoru.
- Vývěvy, v nichž je molekulám předáván impuls ve směru čerpání; ve vstupním otvoru těchto vývěv klesá tlak, a proto do něj proudí molekuly plynu z čerpaného systému.

1.1 Vývěvy s periodicky se měnícím pracovním objemem

Vývěvy pracující na základě přenosu molekul s pracovní komorou a periodicky zvětšující a zmenšující svůj objem (vývěvy podskupiny 1.1) se nazývají mechanické. Při zvětšování a zmenšování objemu komory se zmenšuje a zvětšuje tlak plynu v komoře.

Na obr. 5.1 je schematický řez rotační olejovou vývěvou s rotujícími křídélky typu Geade. Těleso vývěvy 3 má válcovitou dutinu, v níž je excentricky uložen válec 1 otáčející se ve směru šipky kolem své vlastní osy. Tento válec má dvě podélné drážky, v nichž jsou uložena dvě křídélka 2, přitlačovaná pružinou 8 na vnitřní stěnu pláště vývěvy. Otáčí-li se válec ve směru šipky, zvětšuje se prostor nad křídélkem, které je na obr. vpravo, tím vzniká v tomto prostoru podtlak a sacím hrdlem 4 se do něho nasává vzduch z vyčerpávaného prostoru. Při dalším otáčení zakryje druhé křídélko sací otvor pláště a tím uzavře prostor s nasátým plynem. Plyn je pak hnán mezi oběma křídélky směrem k výfukovému otvoru 5. V hrdle výfuku je ventil tvořený obvykle kuličkou 6 dosedající do zabroušeného sedla. K dokonalému utěsnění a mazání se používá minerálního oleje s nízkým tlakem páry. Obvykle je celá soustava vývěvy vložena do skříně 7 naplněné olejem 9. Vzduch vytlačovaný výfukem pak probublává na jeho hladinu.

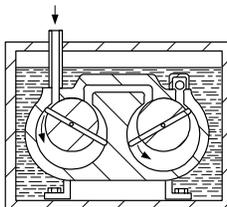


- 1 – válec excentricky uložený
- 2 – křídélka
- 3 – těleso vývěvy
- 4 – sací hrdlo
- 5 – výfukový otvor
- 6 – kuličkový ventil
- 7 – skříň
- 8 – pružina
- 9 – olejová náplň

Obr. 5.1 Schematický řez olejovou rotační vývěvou typu Geade.

Konečný tlak v rotačních vývěvách bývá obvykle více než 1 Pa. Lepšího vakua (10^{-1} Pa i méně) lze dosáhnout s dvoustupňovými vývěvami – obr. 5.2. Pravá vývěva vytváří tzv. předvakuum pro druhou vývěvu; tato druhá vývěva tedy nepracuje proti

tlaku ovzduší, nýbrž vyfukuje do prostoru s tlakem podstatně menším, tím se právě dosahuje lepšího konečného vakua.



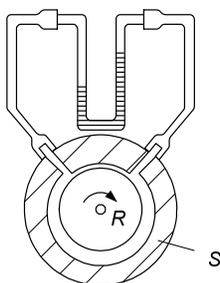
Obr. 5.2 Schematický řez dvoustupňovou olejovou vývěvou.

1.2 Vývěvy pracující na základě přenosu impulsu

Další podskupinu z vývěv pracujících na základě přenosu molekul tvoří vývěvy, v nichž se molekulám různým způsobem předává impuls ve směru čerpání. Tím vzniká rozdíl tlaků v prostoru vstupního a výstupního otvoru. Předávání impulsu není u těchto vývěv důsledkem stlačení předem odděleného objemu plynu, jako tomu bylo u vývěv s periodicky se měnícím pracovním objemem, ale závisí na tom, zda plyn ve vývěvě proudí molekulárním nebo viskózním prouděním. Proto některé z vývěv této skupiny pracují jen za podmínky, že je nutno je předčerpávat; proto se těmto vývěvám někdy říká též sekundární nebo vysokovakuové.

Do této skupiny vývěv patří axiální a radiální ventilátory nebo dmychadla, což jsou vlastně přístroje určené k transportu plynů – je jich však možno užít i jako vývěv.

V klasických molekulárních vývěvách přicházejí molekuly čerpaného plynu vstupním otvorem do komory vývěvy, v níž se rychle točí rotor – obr. 5.3. Molekuly dopadají na povrch rotoru a získávají tak impuls ve směru tečny k rotoru v místě srážky. Ve srážce se stěnou komory molekuly impuls ztrácejí, avšak v další srážce s rotorem jej opět získávají. Celkem molekuly získávají rychlost usměrněného pohybu ve směru čerpání.

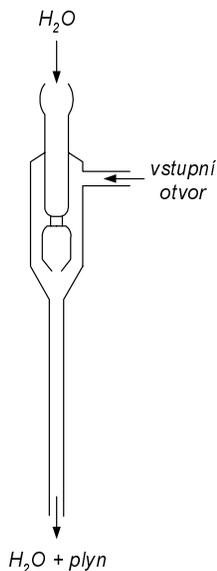


Obr. 5.3 Schéma molekulární vývěvy.

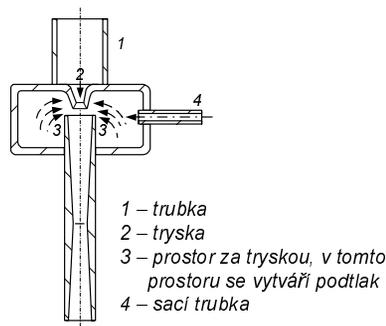
Moderní molekulární vývěvy, tzv. turbomolekulární vývěvy, mají rotor i stator mnohem složitější. Rotor těchto vývěv je soustava kotoučů, na jejichž obvodě jsou lopatky. Mezi jednotlivými kotouči rotoru jsou statorové vložky, tvořené systémem nepohyblivých lopatek. Lopatky rotoru a statoru jsou uspořádány střídavě proti sobě.

Vývěvy vodní, ejektorové a difuzní: předávání impulzu molekulám čerpaného plynu je možno uskutečnit ještě dalším způsobem, a to tak, že molekuly čerpaného plynu jsou přiváděny do styku s rychle proudící kapalinou, parou nebo plynem. Čerpaný plyn (přesněji směs plynů a par) je tak strháván proudící tekutinou do místa výstupu z vývěvy. Po této dráze vzrůstá tlak čerpaného plynu; u některých druhů vývěv založených na tomto principu je výstupní tlak roven atmosférickému. Většina těchto vývěv musí být předčerpávána.

Nejjednodušším typem vývěv této skupiny je vodní vývěva. Proud vody je přiváděn do zužující trysky, kde se jeho rychlost zvyšuje a zúžený vodní paprsek vstupuje do komory vývěvy; v ní dochází k turbulentnímu mísení vody se vzduchem. Zpěněná voda pak odchází výstupní trubicí z vývěvy – obr. 5.4. Mezní tlak vývěvy je dán tenzí vodní páry při pracovní teplotě (2 až 2,3 kPa). Čerpací rychlost je poměrně malá u skleněných vývěv 1 až 2 l/s, u větších vývěv kovových je až 30 l/s.



Obr. 5.4 Princip vodní vývěvy.



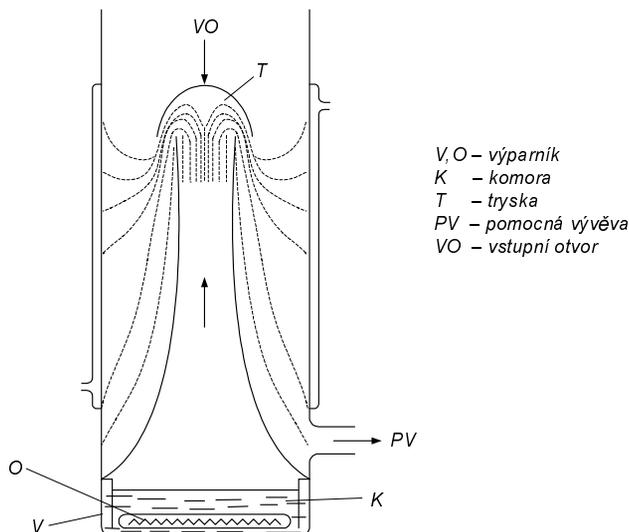
Obr. 5.5 Princip ejektorové vývěvy.

Mnohem hospodárnější jsou vývěvy užívající jako pracovní tekutiny páry. Tyto vývěvy se nazývají ejektorové a difuzní, podle toho, jaký charakter má struktura proudící páry. Nejprve uvedeme vývěvy ejektorové; v nich se do zužující se trysky přivádí

pára z varníku. Pára v místě trysky nabývá rychlosti zvuku. K vzrůstu rychlosti proudění na tuto hodnotu dochází tehdy, je-li v komoře vývěvy dosti nízký tlak – obr. 5.5. Čerpaný plyn, vstupující do komory před ústím trysky, získává ve srážkách s molekulami páry rychlost ve směru čerpání, jeho koncentrace vzrůstá a na konci komory je výstupním otvorem čerpán pomocnou vývěvou. Pro funkci vývěvy je výhodné, aby se pára co nejvíce urychlila. Toho lze dosáhnout tzv. Lavalovou tryskou, v jejímž kuželovitě se rozšiřujícím ústím se proud páry urychlí na nadzvukovou rychlost.

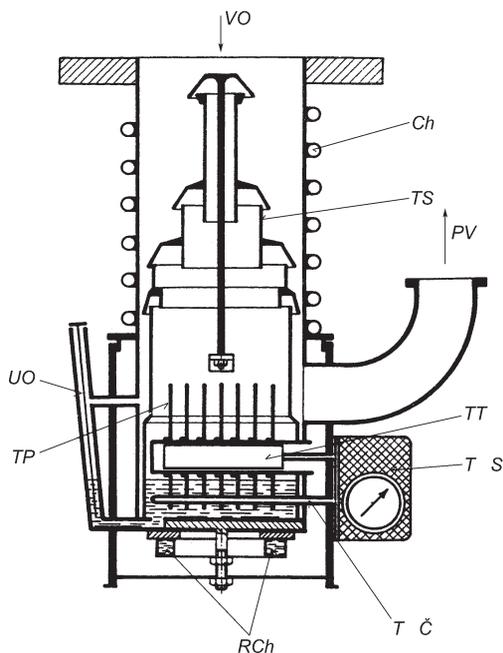
Ejektorové vývěvy se často konstruují ve dvou nebo víceúrovňových uspořádání; v případě čtyř až šesti stupňů nepotřebují předčerpání. Ejektorové vývěvy mají velké čerpací rychlosti (až desetitisíce l/s) a užívají se k čerpání velkých objemů plynů a par – zejména v metalurgii. Užívá se jich též k předčerpání velkých difuzních vývěv tak, že se vkládají mezi rotační a difuzní vývěvu. Mezní tlak ejektorových vývěv je 10^{-1} až 10^{-2} Pa a závisí na počtu stupňů vývěvy.

V difuzních vývěvách – obr. 5.6 proudí pára z varníku *V*, *O* parovodem umístěným v ose válcové komory *K* vývěvy k trysce *T*, jejíž vnější stěnu tvoří klobouček a vnitřní stěnu parovod. Proud páry se v trysce obrací proti svému původnímu směru a po opuštění trysky převážná část proudu směřuje dolů. Rychlost páry vytékající z divergentní trysky do prostoru přečerpávaného pomocnou vývěvou *PV* je podobně jako u ejektorových vývěv nadzvuková. Proud páry se v dolní části pracovní komory zpomaluje, vytváří se zde k ose vývěvy šikmo položená rázová vlna. Její poloha závisí na tlaku v prostoru vstupního otvoru *VO*. Na obr. jsou znázorněny proudučáry; je patrné, že jejich hustota klesá se vzdáleností od trysky tak, jak klesá koncentrace molekul páry.



Obr. 5.6 Schéma činnosti difuzní vývěvy.

Aby se zvýšil kompresní poměr a tím se zmenšily nároky na pomocnou vývěvu, konstruují se difuzní vývěvy vícestupňové; v jejich pracovním prostoru bývá několik (dvě, tři, výjimečně čtyři) trysek, z nichž každá pracuje popsaným způsobem. Poslední tryska pracuje v oboru vyšších tlaků (1 až 5 Pa), a proto má tvar trysky ejektorové vývěvy, jež je při těchto tlacích mnohem účinnější. Na obr. 5.7 je uvedena olejová difuzní vývěva čtyřstupňová, v níž je trubice přivádějící páru k tryškám (parovod) v ose vývěvy; proudící pára kondenzuje na vodou chlazené stěně a stéká zpět do varníku.



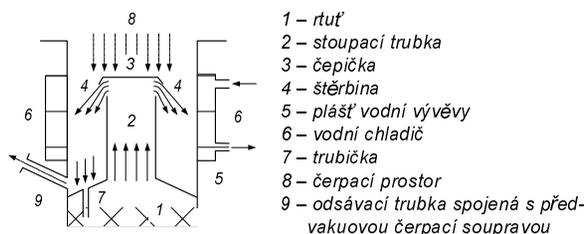
- | | |
|---|---|
| PV – pomocná vývěva | TP – topné plochy k zvětšení přenosu
tepla z topného tělíska na olej
a olejové páry |
| VO – vstupní otvor | T S – termostat |
| Ch – vodní chlazení kondenzační látky | T Č – termočlánek |
| RCh – vodní chlazení varníku, užívané
k rychlému ochlazení varníku po
vypnutí topného příkonu | T T – topné tělísko |
| TS – tryskový systém | U O – tyčinka k ověřování množství a kvality oleje |

Obr. 5.7 Čtyřstupňová olejová difuzní vývěva.

Jako olejů pro difuzní vývěvy se užívá buď olejů minerálních (tzv. oleje „beztenzní“) nebo olejovitých syntetických látek (např. některých ftalátů). V současné době jsou v difuzních vývěvách stále častěji užívány oleje silikonové, což jsou olejové sloučeniny křemíku, většinou polysilixanové řetězce. Tyto oleje jsou mnohem stabilnější, nemění své fyzikální vlastnosti a práce s difuzní vývěvou je proto mnohem méně náročná; jejich život je prakticky neomezený.

Vedle olejů se v difuzních vývěvách užívá jako pracovní kapaliny též rtuť. Rtuť je vysoce odolná kapalina, která během práce nemění své vlastnosti. Její pracovní teplota může být proto vyšší než teplota oleje; tomu se přizpůsobuje i tvar trysek rtuťových vývěv a geometrické uspořádání pracovního prostoru. Rtuťové páry se z vakuových systémů odstraňují mnohem snadněji než páry olejů. Rtuťových difuzních vývěv se užívá zejména tam, kde je nutno snížit vnikání uhlovodíků z vývěv do čerpaného systému; to lze ovšem jen tehdy, vyloučí-li se vnikání oleje z rotační vývěvy do difuzní.

Schematický řez rtuťovou difuzní vývěvou je na obr. 5.8. Rtuť ve spodní části 1 je udržována ve varu elektrickým topným tělesem. Její páry stoupají trubkou 2, nad kterou je postavena čepička 3. Ta spolu s okrajem trubky 2 tvoří štěrbinu 4, kterou proudí pára rtuťi velkou rychlostí, a čepičkou je usměřována k plášti 5. Plášť je opatřen vodním chladičem 6, takže rtuťová pára kondenzuje a rtuť vtéká trubičkou 7 zpět do varné nádoby. Molekuly vzduchu difundují z vyčerpávaného prostoru 8 do proudu rtuťové páry a jsou pak odsávány trubkou 9, ke které je připojena rotační vývěva, tvořící předvakuum pro vývěvu difuzní. Difuzní vývěvy totiž nemohou pracovat proti tlaku ovzduší, a proto čerpají vždy v součinnosti s vývěvami předvakuovými, nejčastěji rotačními.



Obr. 5.8 Schematický řez rtuťovou difuzní vývěvou.

5.2.2 Vývěvy pracující na základě vazby molekul na svých stěnách

Metody získávání nízkých tlaků na principu vazby molekul čerpaného plynu se liší od metod založených na transportu molekul tím, že molekuly zůstávají v systému (ve vývěvě). Jde tedy o princip získávání nízkých tlaků, jenž dovoluje přiblížit se ideálnímu případu, v němž jsou všechny molekuly dopadající na celý vnitřní povrch stěn systému z objemu systému odvedeny.

Metody založené na principu vazby molekul na stěnách systému je možno shrnout do tří skupin:

1. Metoda kondenzační, v níž se využívá kondenzace plynů a par na kondenzační stěně vývěvy. Ke kondenzaci dochází u obecných plynů při hlubokých teplotách; metodě se proto říká kryogenní metoda. Čerpací efekt je možno zvýšit tím, že se plyn váže při hlubokých teplotách na různých sorbentech fyzikální adsorpce. V tomto případě hovoříme o sorpčních, přesněji kryosorpčních vývěvách.