

5. Získávání a měření nízkých tlaků

Úvod

Přesto, že latinské slovo „*vacume*“ znamená prázdný, neznáme dosud prostor, který by byl charakterizován neexistencí látky. Výrazu vakuum připisujeme prostor, který je naplněn plynem o nízkém tlaku, tedy tlaku nižším než atmosférickém za běžných teplot.

Vakuum je fyzikální model prostoru, který je charakteristický neexistencí látky.

Podle tlaku dělíme vakuum do následujících skupin:

- hrubé vakuum (10^5 – 130 Pa)
- jemné vakuum (130 – 0,13 Pa)
- vysoké vakuum (0,13 – 10^{-6} Pa)
- ultravakuum (10^{-6} Pa a nižší)

Dále je možno vakuum rozdělit na přirozené a umělé. Mezi přirozené formy, které lze nalézt v životě lidí a zvířat řadíme dýchání, při kterém je běžný podtlak v hodnotách okolo 97 kPa. Člověk však může vytvořit podtlak i nižší. Chobotnice dovede dosáhnout podtlak až přibližně 10 kPa. Umělé vakuum je takové vakuum, které lze vytvořit pomocí technických přístrojů pracujících na nejrůznějších principech a bude popisováno dále v textu. Zvláštním případem podtlaku je zemská atmosféra. Tlak je výslednicí silového působení horizontálního plynného sloupce na zemský povrch. Na tomto místě je třeba podotknout, že ani meziplanetární prostor není takovým prostorem, kde se nevyskytuje žádná látka. Tento prostor je vyplněn atomy či molekulami a to o množství přibližně do $10 / \text{cm}^3$.

Jednotky tlaku jsou následující:

- 1 Pa (pascal) je jednotkou SI, znamená z definice totéž jako $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ (nebo $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$)
- 1 bar je jednotkou v soustavě CGS
- 1 Torr je jednotkou v technické soustavě (1 konvenční mm rtuťového sloupce)
- 1 atm je tzv. standardní fyzikální atmosféra
- 1 mm H₂O (1 konvenční milimetr vodního sloupce)
- 1 pz (pieze)

Jejich vzájemné převody jsou:

- $10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ bar}$
- $10^5 \text{ Pa} = 760 \text{ Torr}$
- $1 \text{ atm} = 735,56 \text{ Torr}$
- $1 \mu\text{bar} = 1 \text{ dyn} \cdot \text{cm}^{-2}$
- $1 \text{ mm H}_2\text{O} = 9,80665 \text{ Pa}$
- $1 \text{ mm H}_2\text{O} = 1 \text{ kp} \cdot \text{m}^{-2}$ (kp znamená kilopond)
- $1 \text{ pz} = 10^3 \text{ Pa}$

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Získávání nízkých tlaků

Vakuová technika dovoluje v současné době získávat nízké tlaky až do hodnot řádově 10^{-12} Pa. Je zde nutno uvést, že dosud neexistuje žádné zařízení, které by bylo schopno dosáhnout těchto hodnot z atmosférického tlaku. Je tedy zřejmé, že pro dosažení těchto hodnot je nutné použít kombinaci několika zařízení, které pracují v odlišných intervalech tlaku, přičemž čerpání plynů nebo par z aparatury začíná při atmosférickém tlaku a další vakuové zařízení pracující na odlišném principu čerpání molekul plynu nebo par je schopno dosáhnout i ultra vakua.

Dalším neméně důležitým faktorem je odstranění molekul z povrchu stěn prostoru, ve kterém se snažíme dosáhnout co nejnižšího tlaku. Je tedy zřejmé, že samo odstranění plynů a par z objemu systému nestačí k vytvoření nízkého tlaku. Poklesem tlaku totiž dochází k desorpci plynu z povrchu.

Hlavní podmínkou získání a udržení nízkého tlaku je nejen odstranění všech volných plynů z objemu systému, ale i plynů adsorbovaných na povrchu stěn a absorbovaných uvnitř látky tvořící stěnu.

S ohledem na výše uvedené je zřejmé, že nulový tlak nelze připravit jakýmkoliv množstvím postupných kroků vedoucím k odčerpávání plynů a par z objemu a povrchu systému, což potvrzuje teorii, že vakuum je jen ideální fyzikální model.

Při popisu metod získávání nízkých tlaků bývají použity tyto základní pojmy:

- čerpací rychlost – je definována jako tok plynu procházející plochou, popřípadě na plochu dopadající, při pracovním tlaku. Je poměrem objemu vyčerpaného za určitý čas. V literatuře je často označována symbolem S_0 . Většina používaných čerpacích zařízení pracuje s konstantní čerpací rychlostí. Čerpací rychlost se mění jen na začátku čerpání, kdy roste a po dosažení mezního tlaku naopak klesá a její hodnota limitně blíží k nule.

$$S_0 = \frac{V}{t} \quad (6.1)$$

- mezní tlak – je popisován jako hodnota tlaku při čerpání v čerpaném systému, která se již dalším čerpáním tímto systémem již nezmenšuje. Je to také tlak, kdy se čerpací rychlost blíží 0. V postati závisí na konstrukci zařízení, netěsnostech, tenzi par, atd. V literatuře je často označován symbolem p_0 někdy p_∞ .
- přípustný vstupní tlak – je udáván jako nejvyšší hodnota pro vstupní tlak, při které ještě může daný systém pracovat. V literatuře je často označován symbolem p_1 .
- přípustný výstupní tlak – je dán jako nejvyšší hodnota výstupního tlaku, při které ještě může daný systém pracovat. V literatuře je často označován symbolem p_2 .
- kompresní poměr – je bezrozměrnou veličinou charakterizující poměr mezi výstupním tlakem ($p_{výst}$) oproti tlaku vstupnímu (p_{vst}) při ustáleném rovnovážném stavu čerpacího systému. V literatuře je často označován symbolem R .

$$R = \frac{p_{výst}}{p_{vst}} \quad (6.2)$$

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Rozdělení čerpacích zařízení

Nejzákladnější rozdělení čerpacích zařízení (vývěv) podle jejich pracovního principu je možné na dvě základní kategorie:

- Vývěvy pracující na základě přenosu molekul čerpaného plynu nebo par (transportní vývěvy)
- Vývěvy pracující na základě vazby molekul čerpaného plynu nebo par na stěnách vývěvy (transportní vývěvy)

Transportní vývěvy

Transportní vývěvy pracují kontinuálně a proto jejich čerpací kapacita je v podstatě neomezená. Transportní vývěvy dělíme následovně:

- vývěvy, ve kterých pracovní komory v první části pracovního cyklu zvětšují svůj objem a v důsledku toho v ní tlak klesá. Přičemž ve druhé části čerpacího cyklu se komora oddělí od čerpacího systému a objem plynu se stlačuje, až se vytlačí ven výstupním otvorem vývěvy. K tomuto typu vývěv patří zejména rotační olejová vývěva, pístová vývěva apod.
- vývěvy, ve kterých je molekulám čerpaného plynu nebo parám předán impuls ve směru čerpání. Do této kategorie čerpacích zařízení řadíme především tzv. Rootsovy vývěvy, ale také molekulární vývěvy a dále turbomolekulární vývěvy, atd.
- vývěvy pracující na základě interakce čerpaného plynu nebo par s tzv. chaotickým plynem. Do této kategorie transportních vývěv řadíme především difúzní vývěvy a ejektorové vývěvy. Tyto vývěvy se vyznačují poměrně extrémně vysokými čerpacími rychlostmi

Vývěvy pracující na základě vazby molekul plynu na stěnách vývěvy

Tyto vývěvy se liší od transportních především tím, že molekuly plynu nebo par z čerpaného systému při získávání nízkých tlaků zůstávají vázané ve vývěvě. Používají se zejména v oblasti relativně velmi nízkých tlaků, kde jejich omezená kapacita není velkým problémem. Tyto vývěvy jsou velmi selektivní, tedy pro různé plyny pracují s odlišným čerpacím efektem. Lze je rozdělit do následujících kategorií:

- vývěvy pracující na principu kondenzace plynů nebo par při nízkých teplotách. Tyto vývěvy se nazývají kryogenní nebo kondenzační.
- Vývěvy pracující s aktivními látkami, které mají schopnost fyzikálně vázat molekuly plynů nebo par za nízkých teplot. Vývěvy pracující na tomto principu nazýváme kryosorpční.
- Vývěvy využívající chemickou adsorpci (chemisorpci) molekul plynu nebo par na tenké vrstvě s vysokou afinitou na čerpané hmotě. Tento typ vývěv nazýváme sublimační.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

- Vývěvy pracující na principu ionizace molekul plynu nebo par, kdy ionty vzniklé z molekul plynu se navážou na záporně nabitý povrch. Čerpací efekt těchto vývěv je však relativně malý.

Pístové vývěvy

Těmito vývěvami lze dosáhnout hraniční tlak okolo 100 Pa. Velkou výhodou je poměrně vysoká čerpací rychlost a kontinuita procesu. Vynikají poměrně dlouhou životností, jsou spolehlivé a její pořizovací náklady nejsou náročné. Zpravidla nacházejí uplatnění v provozech potravinářského a chemického průmyslu, kde nachází uplatnění v širokém spektru průmyslových procesů.

Rotační olejové vývěvy

Rotační olejová vývěva je ve své podstatě mechanickou vývěvou s rotujícím rotorem o různých tvarů, přičemž jako těsnící médium se používá olej. Nízké tlaky získáváme v důsledku pohybu rotoru, kdy se prostor periodicky zmenšuje a zvětšuje. Hraniční tlak získaný rotační olejovou vývěvou dosahuje jednotek Pa, přičemž je možné i několikastupňové zapojení těchto vývěv do série, pak získáme hraniční tlaky zpravidla o dva řády nižší. Velkou nevýhodou je fakt, že často odčerpávaným materiálem jsou i vodní páry, které se dostávají do oleje, který znehodnocují. Z těchto důvodů je třeba použít speciální oleje, popřípadě použít vývěvu s pomocným ventilem, jímž vedeme do komory suchý vzduch o atmosférickém tlaku a pára pak tvoří jen parciální tlak směsi. Čerpací rychlost rotačních olejových vývěv je poměrně vysoká a velkou výhodou je také kontinuita čerpacího procesu. Vzhledem k těmto vlastnostem se jedná o v současné době nejpoužívanější druh vývěv, které čerpají již od atmosférického tlaku. Jsou často obsaženy i v aparaturách pro dosahování vysokého vakua jako předstupeň vývěv pracujících do vysokého nebo ultra vysokého vakua. Nevýhodou v případě rotačních olejových vývěv může být tzv. čistota vakua, neboť olej za jistých okolností může unikat do prostoru o nízkém tlaku a případně jej i nečistit. Z těchto důvodů je třeba používat speciální oleje pro rotační olejové vývěvy. U rotačních olejových vývěv platí pravidlo, že pokud zvýšíme otáčky rotoru, získáme vyšší čerpací rychlosti. Toto má ovšem za následek nižší hodnotu mezního tlaku.

Rootsovy vývěvy

Rootsovy vývěvy vznikly zejména vzhledem k požadavku na zvýšení čerpacích rychlostí mechanických vývěv. Plyn nebo páry jsou z čerpaného prostoru unášeny pomocí dvou rychle rotujících do sebe zapadajících mechanických částí. Tyto mechanické rotující části mají tzv. „piškotový“ nebo i „hříbový“ popřípadě i jiný tvar. Rotory Rootsových vývěv musí být nutně velmi přesně opracovány neboť šířka štěrby mezi statorem a rotory musí být alespoň okolo 10^{-4} m. Z těchto důvodů mohou Rootsovy vývěvy pracovat pod poměrně vysokými otáčkami a zejména odpadá použití oleje jako těsnícího materiálu. Velikost štěrby mezi rotorem a statorem u Rootsových vývěv také nepřímo udává čerpací rozsah. Je tedy zřejmé, že Rootsovy vývěvy potřebují pro svoji činnost přečerpání a z toho důvodu je není možné použít již od atmosférického tlaku. Šířkou štěrby u Rootsových vývěv je omezen i hraniční tlak, kterého je možné za jejich použití dosáhnout. Zde platí obdobně, čím menší štěrbina, tím nižší

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

je hodnota hraničního tlaku vývěvy. Poměrně velkou nevýhodou tohoto druhu vývěv je kompresní teplo, které ve vývěvě vzniká. Proto se součástí Rootsových vývěv stal i chladič, který nežádoucí teplo pomocí tepelné výměny odvádí. Vzhledem k tomu, že charakteristiky Rootsových vývěv závisí na molekulové hmotnosti čerpaného plynu, je možno označit tyto vývěvy za selektivní. Vynikají navíc svou jednoduchou údržbou a obsluhou.

Molekulární a turbomolekulární vývěvy

Jednu z prvních vývěv tohoto typu navrhl v roce 1912 W. Gaede. Vývěvu konstruoval tak, že uvnitř statoru (dutého válce) se poměrně rychle otáčí rotor (hladký válec). Molekuly čerpaného materiálu vstupují skrz vstupní otvor do vývěvy, dopadají na povrch hladkého rotujícího válce, který jim udává impuls ve směru tečny k němu. Srážka molekuly s válcem zapříčiní pohyb molekuly ve směru čerpání. Tímto způsobem tedy v konečné fázi vzniká rozdíl tlaků na vstupu a výstupu z vývěvy. Tato vývěva byla dále modifikována pro dosažení vyšší účinnosti čerpání. Tyto vývěvy pro svou činnost potřebují přecherpaní, které je zpravidla prováděno pomocí rotačních olejových vývěv. Hraniční tlak molekulárních vývěv může dosahovat hodnot až 10^{-3} popřípadě 10^{-4} Pa. Čerpací rychlosti molekulárních vývěv jsou však zpravidla relativně nízké. Toto vedlo ke konstrukci tzv. turbomolekulárních vývěv, které mají přibližně tvar turbín. Mezi hlavní pozitiva tohoto druhu vývěv patří fakt, že není potřeba použití oleje jako těsnícího materiálu a tedy ve svém důsledku vzniklé vakuum není znečištěno. Pro své vlastnosti se ve velké míře používají na výrobu vysokého vakua a ultra vakua. Nevýhodou bývá poměrně vysoká pořizovací cena, která je dána nároky na preciznost částí tohoto druhu vývěv.

Ejektorové vývěvy

Ejektorová vývěva pracuje na principu strhávání molekul plynu či par ve směru toku jiné hmoty, zejména kapaliny nebo páry a tím jsou unášeny z čerpaného prostoru. Nedílnou částí ejektorových vývěv je tzv. Lavalova dýza, která by se dala popsat jako trubice z obou stran konická se zmenšujícím se poloměrem doprostřed, přičemž vstupní část je do nejužšího poloměru kratší než část na výstupu. Jako materiál strhávající molekuly čerpaného plynu nebo par se nejčastěji používá vodní pára, olej nebo rtuť. V praxi se nejčastěji používá ve vícestupňovém paralelním uspořádání. Za těchto okolností mohou pracovat již od atmosférického tlaku a přečerpávání není nutné.

Difúzní vývěvy

Difúzní vývěvy pracují na principu interakce mezi čerpaným plynem a plynem ve vývěvě. Molekuly čerpaného plynu vniknou hluboko do proudu par a pravděpodobnost jejich návratu do aparatury je tím pádem poměrně nízká. Pro konstrukci difúzních vývěv se používá nejčastěji kov, ale je možné použít i sklo, popřípadě i kombinace kovu a skla. Jako čerpací látky se uplatňují zejména parafíny, oleje a nebo i rtuť. Použití rtuti je často považováno za progresivnější, neboť rtuť oproti oleji prakticky nemění své vlastnosti. Olej se postupně rozkládá a čerpací schopnost vývěvy se snižuje. Použití rtuti však klade zvýšené nároky na konstrukční materiál, ze kterého je difúzní vývěva vyrobena. Je známo, že s některými kovy tvoří amalgámy. Tyto vývěvy bývají zapojeny zpravidla sériově, ale i paralelně,

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

popřípadě sériově – paralelní zapojení není výjimkou. Difúzní vývěvy bývají i jednostupňové, ale často se tkáme s vícestupňovým zapojením. Tento typ vývěv musí být chlazený. Jako chladicí médium se používá zpravidla voda nebo v některých případech i vzduch. Difúzní vývěvy se vyznačují především největším kompresním poměrem. Tento druh vývěv není schopen pracovat již od atmosférického tlaku a pro svou činnost potřebují přečerpání, které je zpravidla zabezpečeno použitím rotační olejové vývěvy. Difúzní vývěva může při vhodném výběru čerpací látky dosáhnout až ultravakua.

Kryosorpční vývěvy

Hlavním znakem těchto vývěv je ta odlišnost, že čerpaný materiál neopouští vývěvu, ale váže se uvnitř vyčerpaného prostoru. V současnosti nejpoužívanější látky jsou syntetické zeolity, tedy materiály na bázi oxidů popřípadě směsných oxidů křemíku nebo hliníku. V jejich struktuře jsou dutiny, které jsou po odčerpání zaplněny čerpaným plynem nebo parami. V případě těchto vývěv je nutné zabezpečit výměnu tepla mezi sorpčním prostředím obsahujícím zeolity a chladícím prostředím. Z těchto důvodů je zřejmé, že čerpací kapacita je omezená. Kryosorpční vývěvy se také vyznačují poměrně vysokou selektivitou, neboť daný zeolit s definovanými rozměry své vysoce pórovité struktury může vázat jen plyny nebo páry o odpovídající velikosti molekul. Kryogenní vývěvy jsou taktéž velmi citlivé na znečištění. Může se stát, že z pohlcené směsi plynů vázaných při nízké teplotě se po opětovném zvýšení teploty neuvolní. Tyto vývěvy pracují diskontinuálně a jsou použitelné již od atmosférického tlaku. Jejich hraniční tlak do značné míry koresponduje s typem použitého zeolitu, čerpaným plynem a teplotou. Zpravidla dosahuje hodnot okolo 10^{-1} Pa.

Kryogenní vývěvy

Kryogenní vývěvy pracují na principu využití kondenzace plynů a par na površích o teplotě kapalného vodíku nebo helia, tedy teplot blízkým absolutní nule. Na takto vysoce podchlazených površích kondenzují prakticky všechny plyny a páry, neboť mají teplotu vyšší než je teplota kondenzační stěny. Tato metoda patří k nejperspektivnějším v oblasti získávání nízkých tlaků, protože tlaky jež jsme schopni dosáhnout se pohybují až okolo 10^{-12} Pa. Kryogenní vývěva je tvořena nádobou z nerezavějící oceli, která je umístěna v prostoru, který chceme odčerpat. Uvnitř tohoto válce je chladicí kapalina, nejčastěji kapalné helium. Odčerpávaný prostor je před použitím kryogenní vývěvy odčerpáván pomocí jiných vývěv, které pracují již od atmosférického tlaku. Další výhodou je velmi vysoká čistota vakua. Za zmínku však stojí i zvýšené náklady na její provoz.

Sublimační vývěvy

Sublimační vývěvy pracují na principu chemisorpce na povrchu kovu. Aparatura je opatřena vrstvičkou kovu, který má velkou afinitu k plynům nebo parám, které chceme čerpat. Princip je podobný jako u kryogenních vývěv. Vazba na povrch však nevzniká fyzikálně, ale chemicky. Taktéž neprobíhá za velmi nízké, ale za pokojové teploty. Lze říci, že čím je vrstva kovu na povrchu více pórovitá, tím lepší čerpací efekt dosáhneme. Aparatura musí být předem odčerpána jinými typy vývěv. Tento typ vývěv je konstrukčně poměrně jednoduchý. Hraniční tlak, který jsme schopni sublimačními vývěvami dosáhnout se pohybuje řádově

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

okolo 10^{-7} až 10^{-8} Pa. Tento typ vývěv však v praxi nenachází dostatečné uplatnění, zejména z důvodů relativně krátkodobého čerpání s potřebou poměrně častého opakování napouštění vzduchu do systému.

Rozprašovací vývěvy

Rozprašovací vývěvy pracují na principu nanášení vrstev rozprašováním materiálu katody. Pro tyto potřeby se používá aktivní titanová vrstva. Rozprašování vzniká v důsledku ohřevu katody v místě dopadu iontů. Ionty a elektrony vznikají v elektrickém výboji, který je vytvořen v silném elektrickém poli. Zpravidla je elektrický výboj podporován přítomností vnějšího magnetického pole. Pro rozprašovací vývěvy je nutné přečerpání zpravidla na tlak nejméně 10^{-1} Pa. Mezní tlak dosahuje hodnot až 10^{-9} Pa. Mezi hlavní nevýhody těchto vývěv patří obtížná manipulace vzhledem k poměrně vysokým hmotnostem vnějšího magnetu a dále rušivé magnetické pole jím vytvářené.

Měření nízkých tlaků

Veličinou, která primárně charakterizuje vakuový systém je koncentrace molekul plynu nebo par. Tlak a koncentrace jsou přímo úměrné a závisí na teplotě. Při měření jsou však teploty blízké teplotě laboratorní a proto je možné poměrně přesně určit koncentraci plynu nebo par z hodnoty tlaku. Pro měření tlaku vakuových systémů bylo vyvinuto mnoho druhů přístrojů, které nazýváme vakuometry. Vzhledem k širokému rozsahu hodnot vakua je zřejmé, že jeden typ vakuometru nebude schopen měřit tlak v celém rozsahu. Tedy, pro různé rozsahy tlaků je nutno použít různé přístroje. Důležitými charakteristikami jsou zejména měřicí rozsah vakuometru, dále jeho selektivita, citlivost a velikost vlivu daného vakuometru na měřený systém. Dalším neméně důležitým parametrem sloužícím pro popis vakuometru je jeho dolní a horní hranice tlaku, který je schopen spolehlivě změřit.

Metody měření nízkých tlaků zpravidla dělíme do dvou základních kategorií, jímž také odpovídají naměřené hodnoty:

- absolutní metody měření nízkých tlaků a
- nepřímé metody měření nízkých tlaků

Druhy vakuometrů

Nejpoužívanější vakuometry, které se používají pro měření tlaku u vakuových aparatur lze vyjmenovat následujícím způsobem:

- otevřené U trubice
- U trubice s uzavřeným ramenem
- U trubice se šikmým ramenem
- Mac-Leodovy vakuometry (kompresní)
- Membránové vakuometry
- rotačně – viskózní vakuometr
- tlumeně oscilační viskózní vakuometr

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

- Piraniho odporový tepelný vakuometr
- termočlánekový tepelný vakuometr
- tepelný dilatační vakuometr (bimetalový)
- ionizační vakuometr
- inverzní ionizační vakuometr (Bayard – Alpertův)
- výbojový vakuometr (Penningův)
- atd.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

