Vakuová fyzika 1

Pavel Slavíček
Vlasta Štěpánová
Jakub Kelar

Masarykova univerzita
Vakuová fyzika 1

Pavel Slavíček
Vlasta Štěpánová
Jakub Kelar

Brno 2016
Tento studijní text byl vypracován v rámci projektu Fondu rozvoje MU číslo MUNI/FR/1096/2015.

Děkujeme Jané Jurmanové za cenné připomínky a rady k textu těchto skript.

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této elektronické knihy nesmí být reprodukována nebo šířena v papírové, elektronické či jiné podobě bez předchozího písemného souhlasu vykonavatele majetkových práv k dílu, kterého je možno kontaktovat na adrese – Nakladatelství Masarykovy univerzity, Žerotínovo náměstí 9, 601 77 Brno.

Sazba programem \LaTeX, obrázky byly vytvořeny pomocí programů Gnuplot, Xfig, Q TikZ a Google Drawings.

© 2016 Pavel Slavíček, Vlasta Štěpánová, Jakub Kelar
© 2016 Masarykova univerzita

Obsah

Předmluva 1

1 Úvod do předmětu 2
  1.1 Vakuová fyzika ............................................. 2
  1.2 Historický vývoj ............................................. 3
  1.3 Využití vakua ................................................ 7
    1.3.1 Využití vakuové fyziky ve vědě ............................................. 7
    1.3.2 Využití vakuové fyziky v průmyslu ............................................. 8

2 Teoretické základy vakuové fyziky 10
  2.1 Plyn ve statickém stavu ..................................... 10
    2.1.1 Základní pojmy a zákony ............................................. 10
    2.1.2 Stavová rovnice ideálního plynu .......................... 12
    2.1.3 Maxwellovo rozdělení rychlostí molekul plynu ....... 12
    2.1.4 Kinetické působení částic plynu ....................... 15
    2.1.5 Střední volná dráha ............................................. 15
  2.2 Plyn v dynamickém stavu .................................. 16
    2.2.1 Difuze plynů ............................................... 16
    2.2.2 Viskozita plynů ............................................. 17
    2.2.3 Tepelná vodivost plynů .................................. 18
    2.2.4 Proudění plynů ............................................. 18
  2.3 Plyn ve vakuovém systému ................................. 20
    2.3.1 Odraz částic od stěny ..................................... 20
3 Vakuové vývěvy

3.1 Vodní vývěva
3.2 Vodokružní vývěva
3.3 Pístová vývěva
3.4 Membránová vývěva
3.5 Rotační olejová vývěva
3.6 Scroll vývěva
3.7 Rootsova vývěva
3.8 Difuzní vývěva
3.9 Molekulární vývěva
3.10 Turbomolekulární vývěva
3.11 Zamezení vniku par do čerpaného prostoru

4 Manometry

4.1 Kapalinové U-manometry
4.1.1 Otevřený U-manometr
4.1.2 Uzavřený U-manometr
4.1.3 Šikmý uzavřený U-manometr
4.2 McLeodův kompresní manometr
4.3 Mechanické manometry
4.3.1 Membránové manometry
4.3.2 Trubičkové manometry
4.3.3 Vlnovcové manometry
4.4 Kapacitní manometry
4.5 Piezo manometry .................................................. 48
4.6 Tepelné manometry .................................................. 49
  4.6.1 Odporové (Piraniho) manometry .................. 50
  4.6.2 Termočlánkové manometry .................. 51
  4.6.3 Termistorové manometry .................. 52
  4.6.4 Dilaťacní manometry .................. 52
4.7 Viskozní manometry ................................................. 53
  4.7.1 Viskozní manometr s rotujícím kotoučem ........ 53
  4.7.2 Viskozní manometr s rotující kuličkou ........ 53
4.8 Ionizační manometry .............................................. 54
  4.8.1 Ionizační manometr se studenou katodou ........ 55
  4.8.2 Ionizační manometr se žhavenou katodou ........ 56
4.9 Kalibrace manometrů .............................................. 60

5 Měření parciálních tlaků .............................. 63
  5.1 Statické hmotnostní spektrometry
       s kruhovými dráhami .................................. 66
  5.2 Omegatron ......................................................... 67
  5.3 Průletové hmotnostní spektrometry .................. 68
  5.4 Bennettův spektrometr .......................................... 69
  5.5 Kvadrupolový spektrometr .................................. 70

6 Hledání vakuových netěsností .......... 75
  6.1 Halogenový hledač ............................................. 77
  6.2 Vodíkový hledač ............................................. 78
  6.3 Heliový hledač ............................................. 79
  6.4 Další metody hledání netěsností ve vakuové technice .... 82
  6.5 Metody hledání netěsností v průmyslu .................. 83

7 Dodatky .......................................................... 87
  7.1 Vakuové značky ............................................. 87
7.2 Fyzikální konstanty ................................................. 89

Seznam obrázků .......................... 90
Seznam tabulek ......................... 94
Literatura ..................................... 95
Předmluva

Skripta Vakuová fyzika 1 jsou určena posluchačům předmětu F4160 Vakuová fyzika 1, jako studijní materiál pro předmět F7541 Praktikum z vakuové fyziky a všem zájemcům o vakuovou fyziku. Zabývají se základy vakuové fyziky, základními typy vývěv a manometrů, měřením parciálních tlaků plynů a hledáním netěsností ve vakuovém systému. Tato skripta se nezabývá sorbovanými plyny ve vakuové fyzice, tomuto tématu se věnuje předmětka F6450 Vakuová fyzika 2.

Kapitola 1
Úvod do předmětu

1.1 Vakuová fyzika

Vakuová fyzika je označení stavu systému, ve kterém jsou plyny nebo páry při nižším tlaku než je tlak atmosférický.

Oblast problematiky vakuové fyziky zahrnuje vědecké základy, techniku a technologii vakua. Vědecké základy vakua obsahují některé části fyziky a chemie, pojednávají o plynech a v nich probíhajících jevech i o vzájemném působení mezi plynnou fází a ostatními fázemi látek. Vakuová technika se zabývá tím, jak získat a změřit nízké tlaky. Vakuová technologie se věnuje nejvyhodnějším postupům při procesech spojených se získáváním, uchováváním, rozváděním a využíváním vakua. Patří sem rovněž znalosti o materiálech používaných ve vakuové technice. Do oboru vakuové techniky a technologie patří také konstrukce zařízení a aparatur sloužících k využívání nízkých tlaků k výzkumným i průmyslovým účelům.

Vakuové fyzice se věnuje celá řada monografií, které byly využity při tvorbě tohoto studijního materiálu. Základy vakuové fyziky lze najít v [1] – [5]. Materiálem používaným ve vakuové technice se věnují publikace [6, 7].

Vakuové fyzice můžeme vyrábět v laboratoři ve vakuových aparaturách, ale najdeme ho i v přírodě. V tab. 1.1 je například uvedena závislost tlaku vzduchu na nadmořské výšce.

<table>
<thead>
<tr>
<th>Nadmořská výška (m)</th>
<th>Tlak (Pa)</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>0</td>
<td>101325</td>
</tr>
<tr>
<td>100</td>
<td>99325</td>
</tr>
<tr>
<td>200</td>
<td>97325</td>
</tr>
<tr>
<td>300</td>
<td>95325</td>
</tr>
</tbody>
</table>
Tabulka 1.1: Závislost tlaku vzduchu na nadmořské výšce [4].

<table>
<thead>
<tr>
<th>výška [km]</th>
<th>tlak [Pa]</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>0</td>
<td>$10^5$</td>
</tr>
<tr>
<td>11</td>
<td>$10^4$</td>
</tr>
<tr>
<td>50</td>
<td>$10^0$</td>
</tr>
<tr>
<td>100</td>
<td>$10^{-1}$</td>
</tr>
<tr>
<td>200</td>
<td>$10^{-4}$</td>
</tr>
<tr>
<td>500</td>
<td>$10^{-6}$</td>
</tr>
<tr>
<td>1000</td>
<td>$10^{-8}$</td>
</tr>
<tr>
<td>2000</td>
<td>$10^{-13}$</td>
</tr>
</tbody>
</table>

1.2 Historický vývoj

Historie vývoje vakuové fyziky a techniky je zpracována v celé řadě monografií [5, 8, 9].


V roce 1662 byl definován *Boyleův (Boyleův–Mariottův) zákon*, který
KAPITOLA 1. ÚVOD DO PŘEDMĚTU

říká, že součin tlaku a objemu v uzavřeném prostoru je při stálé teplotě konstantní.

Následujících téměř 200 let nedošlo prakticky k žádnému vývoji, protože v této době ještě neexistovala kinetická teorie plynů a také nebylo mnoho možností, kde vakuum využít. K využití vakua ve větší míře došlo až s průmyslovou revolucí v polovině 19. století. Rozvoj ostatních fyzikálních disciplín mezitím přinesl nové poznatky, které fyzika nízkých tlaků převzala, a to zejména kinetickou teorii plynů.


Spolu s čerpaním tlaků nízkých než 1 torr (133,3 Pa) vyvstal problém s jejich měřením - Torricelliho manometr už nebyl dostáčející. Proto se v roce 1874 rozhodl britský chemik Herbert McLeod zkonstruovat kompresní manometr, pro který se vžilo označení McLeodův manometr. Fungoval na principu Boyleova zákona. Když stlačíme velký objem plynu o nízkém tlaku na malý objem ve mřížce kapiláře a uděláme to pomalu, bude platit, že součin tlaku a objemu je konstantní. Jako pracovní kapalinou používalentodo manometr rtuť a jeho hlavním přínosem bylo snížení hranice měřeného tlaku na $10^{-4}$ Pa. McLeodův manometr byl přesnější než měření tlaků pomocí U-trubic, ale neměřil spojitě, dlouhou dobu se používal pro kalibraci nepřímých manometrů, viz kap. 4.2.


Průmyslová výroba žárovek a elektronik se vynutila zdokonalení vývěv. V roce
KAPITOLA 1. ÚVOD DO PŘEDMĚTU

1892 byla zkonstruována Fleussova pístová vývěva, která se uplatnila při výrobě elektronek. Zvládla čerpat tlak až do hodnoty $10^{-4}$ torr ($1,3 \times 10^{-2}$ Pa), ale vyznačovala se malou čerpací rychlostí. Ve stejném roce Sir James Dewar zkonstruoval Dewarovu nádobu pro uchovávání zkapanlených plynů, jejímž základem je dvojitá vnitřní nádoba se stěnami pokrytými tenkou kovovou vrstvou. Z mezery mezi stěnami obou nádob je vyčerpán vzduch. Přes toto vakuum nemůže pronikat teplo vedením a kovové stěny snižují přenos tepla zářením.


V roce 1926 se začíná používat olejová difuzní vývěva, kde olej jako pracovní kapalina nahradil dříve používanou rtuť nebo parafín. V této době se obecně u vývěv místo rtuti začíná používat olej s vysokým bodem varu. V roce 1936 zkonstruoval Penning výbojový manometr s magnetickým polem s měřícím rozsahem $10^{-7}$ až $10^{-1}$ Pa. Elektrovakuový průmysl začíná využívat nových materiálů jako je wolfram a molybden.

II. světová válka urychlila rozvoj elektrovakuového průmyslu, zejména výrobou elektronek pro radiolokační přístroje a vysílačky. Tento rozvoj pomohl také konstrukci velkých vakuočích systémů pro urychlovače částic a získávání nízkých tlaků pro účely výbojů v plyněch a studium povrchových procesů pevných látek. V roce 1942 byl zkonstruován první hmotnostní spektrometr za účelem vyhodnocování kvality nafty. Během války také vznikl první vakuový hledač netěsností umožňující ověřit těsnost vakuové aparatury.

Roku 1949 dosahovala dolní hranice měřicího oboru u ionizačního manometru hodnoty $10^{-11}$ torr ($1,3 \times 10^{-9}$ Pa). V roce 1950 R. T. Bayard a D. Alpert zdokonalili Buckleyho ionizační manometr.

Roku 1958 vznikl první kvadropólový hmotnostní spektrometr. Turbomolekulární vývěva vyvinutá v roce 1958 W. Beckerem ve firmě Pfeiffer umožnila...
čerpat tlak až do oblasti ultravysokého vakua. Vyznačuje se vysokou rychlostí otáček rotoru, a tedy i vysokou čerpačí rychlostí. V roce 1973 vznikla vývěva typu Scroll (spirálová vývěva) s vysokým kompresním poměrem, která se využívá například jako předčerpávací vývěva pro turbomolekulární vývěvy.


Vývoj vakuových zařízení neustále pokračuje ruku v ruce s výzkumem v oblasti plazmových technologií, kosmického výzkumu, polovodičového průmyslu, atd. Nadále dochází ke zlepšování provozních vlastností, zdokonalování vývěv i manometrů a stále vznikají nové konfigurace a varianty.

**Některé milníky vývoje vakuové techniky**

<table>
<thead>
<tr>
<th>Rok</th>
<th>Uvedení</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>1643</td>
<td>E. Torricelli - první vakuum</td>
</tr>
<tr>
<td>1654</td>
<td>O. von Guericke - Magdeburšké polokoule</td>
</tr>
<tr>
<td>1855</td>
<td>H. Geissler - výboje v plynech, rtuťová pístová vývěva</td>
</tr>
<tr>
<td>1874</td>
<td>H. McLeod - kompresní manometr</td>
</tr>
<tr>
<td>1879</td>
<td>T. A. Edison - elektrická žárovka</td>
</tr>
<tr>
<td>1892</td>
<td>Fleussova pístová vývěva, průmyslová výroba žárovek</td>
</tr>
<tr>
<td>1892</td>
<td>Dewarova nádoba - zkapalněné plyny</td>
</tr>
<tr>
<td>1904</td>
<td>Dewar - kryosorpční vývěva</td>
</tr>
<tr>
<td>1906</td>
<td>M. Pirani - Piraniho tepelný manometr</td>
</tr>
<tr>
<td>1906</td>
<td>W. Vöge - termoclánkový manometr</td>
</tr>
<tr>
<td>1912</td>
<td>W. Gaede - molekulární vývěva</td>
</tr>
<tr>
<td>1913</td>
<td>W. Gaede - difuzní vývěva</td>
</tr>
<tr>
<td>1916</td>
<td>Buckley - ionizační manometr</td>
</tr>
<tr>
<td>1926</td>
<td>C. R. Burch - olejová difuzní vývěva</td>
</tr>
<tr>
<td>1933</td>
<td>DuPont - objev neoprenu (vakuové těsnění)</td>
</tr>
<tr>
<td>1936</td>
<td>F. M. Penning - výbojový manometr s magnetickým polem</td>
</tr>
<tr>
<td>1943</td>
<td>první komerční hmotnostní spektrometr</td>
</tr>
<tr>
<td>1950</td>
<td>R. T. Bayard a D. Alpert - ionizační manometr se žhavenou katodou</td>
</tr>
<tr>
<td>1954</td>
<td>konstrukce prvních kvadrupolových hmotnostních spektrometrů</td>
</tr>
<tr>
<td>1958</td>
<td>W. Becker - turbomolekulární vývěva</td>
</tr>
<tr>
<td>1973</td>
<td>Scroll vývěva (spirálová vývěva)</td>
</tr>
<tr>
<td>1982</td>
<td>viskozní manometr s rotující kuličkou</td>
</tr>
<tr>
<td>1992</td>
<td>turbomolekulární vývěva s molekulárním stupněm</td>
</tr>
</tbody>
</table>
1.3 Využití vakua

Metody získávání a měření nízkých tlaků nalezly využití v mnoha aplikacích, a to jak vědeckých, tak průmyslových. Celá řada vědeckých přístrojů a technologických procesů může fungovat jen za nízkých tlaků. Nízký tlak využíváme zejména ze dvou hlavních důvodů:

- aby pohyb těles nebo částic probíhal beze srázků s částicemi plynu, a tím se zabránilo jejích brzdění, rozprašování, nebo ionizování plyny;
- aby bylo možné uchovat čistý povrch a zamezit vázání plynu nebo par na povrchu.

V závislosti na dané aplikaci a pracovním tlaku, který potřebujeme získat, musíme vybrat vhodný vakuový čerpač systém, vhodné typy manometrů na měření tlaku a vhodné konstrukční materiály pro vakuovou aparaturu.

Následuje výběr některých vědeckých a průmyslových aplikací.

1.3.1 Využití vakuové fyziky ve vědě

Vakuová fyzika a s ní spjaté technologie se využívají jak v základním, tak v aplikovaném výzkumu.

S využitím vakua se setkáme u řady vědeckých přístrojů, které se používají v různých oborech. Například hmotnostní spektrometry pro analýzu složení a určení koncentrací různých plynů potřebují dostatečně velkou tzv. střední volnou dráhu částic. Pro zobrazení vzorků s velkým zvětšením se dnes běžně používají elektro- nové mikroskopy. Elektronový zdroj i pracovní komora tohoto mikroskopu musí být vyčerpany na dostatečně nízké tlaky, jinak se zkrátí životnost zdroje elektronů a nezískáme tak velké rozlišení. Moderní metody pro chemickou analýzu povrchu se bez vakuových komor rovněž neobejdou. Další oblasti, která nízké vacuum využívá, je spektroskopie. Kromě různých typů detektorů, které ve své konstrukci používají malé vakuové komůrky, můžeme v případě spektroskopie v infračervené a ultrafialové oblasti vacuum použít pro snížení absorpce záření ve vzduchu.

Celá řada vědeckých experimentů probíhá za nízkých teplot, proto je třeba mít dobrou tepelnou izolaci. Například pro uchování kapalného dusíku při teplotě \( \sim 80 \) K se používá tzv. Dewarova nádoba. Je tvořena nádobou s dvojitými stěnami a prostor mezi stěnami je vyčerpan na tlak \( \sim 10^{-3} \) Pa, abychom snížili přenos tepla částicemi plynu. Vnitřní stěny jsou ještě pokoveny za účelem snížení přenosu tepla tepelným zářením.

LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) je velký laserový interferometr, který slouží k detekci gravitačních vln. Ramena tohoto interferometru mají délku 4 km, celý interferometr má objem \( \sim 10000 \, \text{m}^3 \) a pro správné fungování musí být vyčerpána na dostatečně nízký tlak.

Výzkum v oblasti výroby nových tenkých vrstev není myslitelný bez využití vakua. Zde využíváme vakuové komory zejména pro napařování, naprašování a plazmochemickou přípravu tenkých vrstev. Pro některé depozitní procesy nám stačí tlaky \( \sim 10 \, \text{Pa} \), pro jiné musíme získat tlaky menší než \( 10^{-8} \, \text{Pa} \). Testování speciální depozitní techniky, tzv. MBE (Molecular Beam Epitaxy), probíhalo v přírodním vakuu ve vesmíru, na orbitální dráze kolem Země.

Prověrky kosmických lodí a sond před jejich letem se musí provádět v podmínkách co nejvíce podobných podmínkám, které jsou ve vesmíru. K tomu se využívají tzv. simulátory kosmického prostoru, v nichž se vytváří dostatečně nízký tlak.

V chemii využíváme nízké tlaky například ke snížení teploty varu různých kapalin, usnadnění filtrace a při výrobě čistých materiálů.

### 1.3.2 Využití vakuové fyziky v průmyslu

Vakuové technologie se využívají prakticky ve všech průmyslových odvětvích.

Jedním z prvních, kdo využil vakuum v průmyslovém měřítku, byl T. A. Edison při výrobe svých žárovek. Ani dnes se při výrobě zářivek, doutnavek, výbojových trubic a žárovek bez vakua neobejdeme.

Nízké tlaky se často používají při výrobě součástek pro elektronický a mikroelektronický průmysl. V mimolístu to byly zejména různé typy elektronek, demně se vyrábělo několik milionů kusů, dnes jsou to mikroprocesory a integrované obvody.

Různé typy tenkých vrstev vyráběných ve vakuových zařízeních se dnes používají prakticky ve všech oborech. V optice využíváme například odrázové vrstvy pro zrcadla a polopropustná zrcadla pro různé typy přístrojů: spektrometry, astronomické dalekohledy, atd. Při výrobě brýlí se používají antireflexní vrstvy a UV filtry. Ve stavebnictví se tenké vrstvy nanášejí na skleněná okna proto, aby se snížil koeficient
přenosu tepla. V potravinářství se využívá bariérové vrstvy na plastových lahvích, zejména pro to, aby přes stěnu lahví nemohl difundovat kyslík. Ve strojírenství se na obráběcí nástroje připravují zpravidla multivrstvy, které prodlužují životnost nástrojů, zlepšují jejich tvrdost, tření a odvod tepla, které vzniká při jejich použití. Pro medicínské aplikace se připravují biokompatibilní vrstvy. Tenké vrstvy se také využívají při výrobě CD, DVD a Blu-ray disků. Dekorační tenké vrstvy se používají ve stavebnictví, automobilovém průmyslu, strojírenství, pro výrobky z plastů, atd.

Vákuum jako tepelný izolátor využíváme všude, kde se pracuje se zkapalněnými plyny. Například při výrobě a skladování tekutého kyslíku a vodíku pro kosmické rakety, kapalného helia pro supravodiče, tekutého dusíku pro chlazení detektorů v přístrojích nebo pro chlazení v potravinářském průmyslu.

Nízkotlaké aparatury také potřebujieme v chemickém průmyslu při vákuové destilaci ropy nebo při přípravě čistých chemikálií, v metaleurgii pro vákuové pece, ve kterých můžeme vyrábět čisté kovy nebo slitiny bez rozpuštěných plynů.

Mezi další průmyslové aplikace vakua patří například: vákuové balení potravin, vákuové sušení, vákuové manipulátory, odplynění a regenerace transformátorových olejů, svařování pomocí elektronového svazku, lisování a odlévání plastických hmot a řada dalších.
Kapitola 2

Teoretické základy vakuové fyziky

Plyny ve vakuové technice, jejich vlastnosti a chování můžeme ve většině případů aproximovat ideálním plynem.

Plyny ve vakuové technice můžeme rozdělit na:

- **plyny volné** - plyny, které se volně pohybují ve vakuovém systému
- **plyny vázané** - plyny, které jsou vázány na povrchu nebo v objemu pevných látek

**Plyny volné** dále dělíme na:

- **plyny ve statickém stavu** - v celém objemu je stejná teplota a tlak plynu, nevzniká proudění plynu
- **plyny v dynamickém stavu** - ve vakuovém systému jsou různé teploty nebo tlaky, a tím vzniká proudění plynu

2.1 Plynů ve statickém stavu

2.1.1 Základní pojmy a zákony

Na základě kinetické teorie plynů platí pro molekuly ideálního plynu následující předpoklady:

- molekuly plynu jsou malé ve srovnání se vzdáleností mezi nimi
KAPITOLA 2. TEORETICKÉ ZÁKLADY VAKUOVÉ FYZIKY

- molekuly plynu na sebe nepůsobí přitažlivými silami
- molekuly plynu jsou v neustálém náhodném pohybu
- molekuly plynu se neustále srážejí mezi sebou navzájem a se stěnami nádoby
- vzájemné srážky molekul jsou dokonale pružné

Tlak \( p \) je definován jako síla \( F \) působící kolmo na plochu \( A \).

\[
p = \frac{F}{A}
\]

(2.1)

Při srážce se stěnami nádoby částice předávají stěně svou hybnost. Součtem působení částic vzniká síla působící kolmo na stěnu nádoby.

Jednotkou tlaku v soustavě SI je 1 pascal. 1 Pa odpovídá tlaku, který vyvolá síla 1 N rovnoměrně rozložená na rovinné ploše 1 \( m^2 \).

Další jednotky tlaku, které se používaly dříve (některé starší přístroje je ještě používají), ale nejsou povoleny v soustavě SI:

- **Torr**, 1 torr = 133,3 Pa
- **mbar**, 1 mbar = 100 Pa
- **PSI** - libra na čtverecí palec, 1 PSI = 6895 Pa

Základní pojmy a zákony, které platí pro ideální plyn:

- Avogadrov zákon: stejné objemy různých plynů obsahují při stejném tlaku a teplotě stejný počet molekul
- Daltonův zákon parciálních tlaků: celkový tlak směsi několika různých plynů je součtem parciálních tlaků těchto plynů
- normální podmínky: tlak \( p = 101324 \) Pa, teplota \( T = 273 \) K
- Mol je základní fyzikální jednotka látkového množství. Jeden mol libovolné látky obsahuje stejný počet částic, jako je obsaženo atomů ve 12 g izotopu uhlika \( ^{12}C \)
- Avogadrova konstanta určuje počet částic v jednom molu látky, \( N_A = 6,023 \times 10^{23} \) mol\(^{-1} \), tento počet je pro všechny látky stejný
KAPITOLA 2. TEORETICKÉ ZÁKLADY VAKUOVÉ FYZIKY

- relativní molekulová (atomová) hmotnost $M$ je poměr hmotnosti molekuly dané látky a $\frac{1}{12}$ hmotnosti atomu uhlíku $^{12}\text{C}$
- 1 mol různých plynů má při stejném tlaku a teplotě vždy stejný objem, za tzv. normálních podmínek: $V_m = 22415 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$ (plyne ze stavové rovnice viz kap. 2.1.2)

2.1.2 Stavová rovnice ideálního plynu

Pro ideální plyn platí stavová rovnice, pro látkové množství $n_0$ kilomolů má tvar

$$\frac{pV}{T} = n_0R \tag{2.2}$$

$R$ je univerzální plynová konstanta, $k$ je Boltzmannova konstanta (hodnoty konstant viz kap. 7.2) a $T$ je termodynamická teplota plynu. Stavová rovnice může mít různé tvary:

$$\frac{pV}{T} = n_0R = \frac{m}{M} R = NkT \tag{2.3}$$

$m$ je hmotnost plynu, $M$ je hmotnost jednoho kilomolu plynu a $N$ je počet částic plynu. Ze stavové rovnice pro plyn můžeme odvodit vztah mezi tlakem, koncentrací částic $n$ a teplotou plynu:

$$p = nkT \tag{2.4}$$

2.1.3 Maxwellovo rozdělení rychlostí molekul plynu

Molekuly plynu jsou v neustálém náhodném pohybu. Dochází ke srážkám molekul plynu mezi sebou a se stěnou nádoby, přičemž jejich rychlost se vlivem těchto srážek mění. Pravděpodobnost, že molekula má danou rychlost, vyjadřuje Maxwellova rozdělovací funkce $f_v$:

$$f_v(v, T, m_0) = 4\pi \left(\frac{m_0}{2\pi kT}\right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{m_0v^2}{2kT}} \tag{2.5}$$

$m_0$ je hmotnost molekuly, $T$ je termodynamická teplota plynu, $v$ je rychlost molekuly.

Ukázka rozdělovací funkce pro dusík a teplotu 300 K je na obr. 2.1. Tato ukázka demonstruje, že se při konstantní teplotě vyskytují jak molekuly s malou rychlostí, tak s velmi velkou rychlostí. Rozdělovací funkce pro různé plyny a stejnou teplotu je na obr. 2.2. Tento obrázek ukazuje, jak závisí rozdělovací funkce rychlostí na hmotnosti částic. Vliv teploty na rychlost plynu pro stejný plyn ukazuje obr. 2.3.
Obrázek 2.1: Maxwellovo rozdělení rychlostí pro dusík a teplotu 300 K.

Z tvaru rozdělovací funkce lze odvodit tři rychlosti, které můžeme využít pro charakterizaci plynu při dané teplotě:

**nejpravděpodobnější rychlost** $v_p$ odpovídá maximu rozdělovací funkce

$$v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} \quad (2.6)$$

**střední kvadratická rychlost** $v_e$ je taková rychlost pro kterou platí, že kdyby jí měly všechny částice, byla by jejich celková kinetická energie stejná, jako když se tyto částice řídí Maxwellovým rozdělením

$$v_e = \sqrt{\frac{3}{2}v_p} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} \quad (2.7)$$

**střední aritmetická rychlost** $v_a$ je taková rychlost pro kterou platí, že 50 % částic má rychlost větší a 50 % částic má rychlost menší než je $v_a$

$$v_a = \sqrt{\frac{4}{\pi}v_p} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} \quad (2.8)$$

Mezi těmito rychlostmi platí nerovnosti $v_p < v_a < v_e$. Tyto střední rychlosti využíváme v dalších kapitolách.
Obrázek 2.2: Maxwellovo rozdělení rychlostí pro různé plyny.

Obrázek 2.3: Maxwellovo rozdělení rychlostí pro různé teploty.
2.1.4 Kinetické působení částic plynu

Velmi důležitým parametrem ve vakuové technice je počet částic, které dopadají za jednotku času na jednotku plochy $\nu$ [4]:

$$\nu = \frac{1}{4} n v_a$$  \hspace{1cm} (2.9)

$n$ je koncentrace částic a $v_a$ je střední aritmetická rychlost.

Z předpokladu neuspořádaného pohybu molekul, dokonale pružných srážek a Maxwellova rozdělení rychlostí molekul lze pro tlak plynu odvodit vztah:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 v_e^2$$  \hspace{1cm} (2.10)

$p$ je tlak plynu, $n$ je koncentrace částic, $m_0$ je hmotnost molekuly a $v_e$ je střední kvadratická rychlost molekul.

2.1.5 Střední volná dráha

Střední volná dráha molekul je průměrná vzdálenost mezi dvěma po sobě následujícími srážkami částic plynu. Z kinetické teorie plynů je možné odvodit pro střední volnou dráhu vztah [3]:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2n\pi d^2}}$$  \hspace{1cm} (2.11)

$n$ je koncentrace částic a $d$ je efektivní průměr molekuly. Efektivní průměr vybraných atomů a molekul podle [10] je uveden v tab. 2.1.

Při přesnějším odvození je potřeba vzít v úvahu i vzájemné působení částic a upravit tento vztah o korekční faktor:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2n\pi d^2}} \left(1 + \frac{T}{T_\lambda}\right)$$  \hspace{1cm} (2.12)

$T_\lambda$ je tzv. Sutherlandova konstanta pro daný plyn a $T$ je teplota plynu. Pro některé plyny je Sutherlandova konstanta uvedena v tab. 2.2.
2.2 Plyny v dynamickém stavu

2.2.1 Difuze plynů

Pokud je ve vakuovém systému v různých místech různá koncentrace plynů, tak se systém snaží dostat do rovnovážného stavu a nastává difuze plynů. Difuzi plynu můžeme popsat pomocí Fickova zákona, který má v jednorozměrném modelu tvar:

\[ \nu' = -D_{AB} \frac{dn_A}{dx} \]  \hspace{1cm} (2.13)

\( \nu' \) je počet částic, které prochází jednotkou plochy kolmě na gradient koncentrace \( \frac{dn_A}{dx} \) za jednotku času, a \( D_{AB} \) je koeficient difuze. Pokud je v systému jen jeden druh plynu, pak hovoříme o koeficientu samodifuze a můžeme ho vyjádřit vztahem:

\[ D_A = \frac{1}{3} v_a \lambda \]  \hspace{1cm} (2.14)

\( v_a \) je střední aritmetická rychlost plynu a \( \lambda \) je jeho střední volná dráha. Koeficient samodifuze je závislý na teplotě, tlaku a druhu plynu.

Pokud jsou ve vakuovém systému dva plyny A a B, pak hovoříme o koeficientu vzájemné difuze:

\[ D_{AB} = D_A \frac{n_A}{n_A + n_B} + D_B \frac{n_B}{n_A + n_B} \]  \hspace{1cm} (2.15)

\( D_{AB} \) je koeficient vzájemné difuze plynů A a B, \( D_A \) je koeficient samodifuze plynu A, \( D_B \) je koeficient samodifuze plynu B, \( n_A \) je koncentrace plynu A, \( n_B \) je koncentrace plynu B. Koeficient samodifuze pro některé plyny naleznete v tab. 2.3, koeficienty vzájemné difuze pro různé plyny ve vzduchu a ve vodíku jsou v tab. 2.4.
Při stejných počátečních koncentracích plynů platí:

\[ n_A = n_B = n \Rightarrow D_{AB} = D_{BA} = D = \frac{1}{6} (\lambda_A v_{a(A)} + \lambda_B v_{a(B)}) \]  (2.16)

**Tabulka 2.3:** Koeficient samodifuze různých plynů pro normální podmínky.

<table>
<thead>
<tr>
<th>plyn</th>
<th>H₂</th>
<th>He</th>
<th>H₂O</th>
<th>N₂</th>
<th>CO₂</th>
<th>Hg</th>
<th>Xe</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>(D_A \ [10^{-4} \text{m}^2\text{s}^{-1}])</td>
<td>1,27</td>
<td>1,25</td>
<td>0,14</td>
<td>0,18</td>
<td>0,10</td>
<td>0,03</td>
<td>0,05</td>
</tr>
</tbody>
</table>

**Tabulka 2.4:** Koeficient difuze pro různé plyny (malá koncentrace) ve vzduchu a ve vodíku pro normální podmínky [3].

<table>
<thead>
<tr>
<th>plyn</th>
<th>(D_{AB} \ [10^{-4} \text{m}^2\text{s}^{-1}]) ve vzduchu</th>
<th>(D_{AB} \ [10^{-4} \text{m}^2\text{s}^{-1}]) v H₂</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>H₂</td>
<td>0,66</td>
<td>1,27</td>
</tr>
<tr>
<td>He</td>
<td>0,57</td>
<td>1,25</td>
</tr>
<tr>
<td>vzduch</td>
<td>0,18</td>
<td>0,66</td>
</tr>
<tr>
<td>CO</td>
<td>0,175</td>
<td>0,64</td>
</tr>
<tr>
<td>CO₂</td>
<td>0,135</td>
<td>0,54</td>
</tr>
</tbody>
</table>

Při nízkém tlaku mají molekuly velkou střední volnou dráhu a nesráží se navzájem, ale jen se stěnami komory. V tom případě závisí difuze jen na rychlosti a hmotnosti molekul a probíhá velmi rychle.

### 2.2.2 Viskozita plynů

Viskozita je způsobena vnitřním třením plynu a vlivem viskozity se vyrovnávají rychlosti pohybu různých vrstev plynu. Síla, která působí mezi dvěma vrstvami plynu \(F_i\), které se pohybují různou rychlostí, je úměrná dynamické viskozitě plynu \(\eta\), gradientu rychlosti a ploše \(\Delta S\):

\[ F_i = -\eta \frac{du}{dx} \Delta S \]  (2.17)
Pokud mají částice malou střední volnou dráhu, tudíž se často srážejí mezi sebou, pak pro dynamickou viskozitu platí vztah:

\[
\eta = \frac{1}{3} \varrho \lambda v_a
\]  

(2.18)

\( \varrho \) je hustota plynu, \( v_a \) je střední aritmetická rychlost plynu a \( \lambda \) je střední volná dráha plynu.

Pokud do tohoto vzorce dosadíme z předchozích vztahů, tak zjistíme, že dynamická viskozita není závislá na tlaku. Toto platí pouze když mají molekuly malou střední volnou dráhu. Jelikož je střední volná dráha částic větší, je dynamická viskozita přímo úměrná tlaku, čehož se využívá v některých typech manometrů pro měření tlaku, viz kap. 4.7.

### 2.2.3 Tepelná vodivost plynů

Množství tepla \( W \) procházející za 1 sekundu plochou 1 m² kolmou ke směru maximálního gradientu teploty lze vyjádřit vztahem:

\[
W = -\Lambda \frac{dT}{dx}
\]  

(2.19)

\( \Lambda \) je koeficient tepelné vodivosti plynu a \( \frac{dT}{dx} \) je gradient teploty. Pokud mají částice malou střední volnou dráhu, často se srážejí mezi sebou, pak pro koeficient tepelné vodivosti platí vztah:

\[
\Lambda = \frac{1}{3} \varrho v_a \lambda c_v
\]  

(2.20)

Pokud využijeme vztahu pro dynamickou viskozitu, můžeme tento výraz upravit na tvar:

\[
\Lambda = \eta c_v
\]  

(2.21)

\( \varrho \) je hustota plynu, \( v_a \) je střední aritmetická rychlost plynu a \( \lambda \) je střední volná dráha plynu, \( c_v \) je měrné teplo plynu při stálém objemu a \( \eta \) je dynamická viskozita plynu.

V určitém rozsahu tlaků plynu, když je střední volná dráha částic větší, je koeficient tepelné vodivosti funkční tlaku a toho se využívá pro měření tlaku pomocí tzv. tepelných manometrů, viz kap. 4.6.

### 2.2.4 Proudění plynů

Pokud je ve vakuovém systému v různých místech rozdílný tlak, vznikne proudění plynu. Proudění plynu můžeme rozdělit na molekulární, laminární a turbulentní.

Reynoldsovo číslo $R_e$ je definováno vztahem

$$R_e = \frac{Du}{\eta} \quad (2.22)$$

$D$ je charakteristický rozměr systému (průměr trubice), $\rho$ je hustota plynu, $u$ je rychlost proudění plynu a $\eta$ je dynamická viskozita plynu. Hodnota Reynoldsova čísla dokáže rozhodnout, jestli nastává turbulentní, nebo laminární proudění.

- $R_e > 2200$ nastává turbulentní proudění
- $R_e < 1200$ nastává laminární nebo molekulární proudění
- $1200 \leq R_e \leq 2200$ přechodová oblast proudění

Knudsenovo číslo $K_n$ je definováno vztahem:

$$K_n = \frac{\lambda}{D} \quad (2.23)$$

$\lambda$ je střední volná dráha a $D$ je charakteristický rozměr systému. Pomocí Knudsenova čísla můžeme určit, zda nastává molekulární nebo laminární typ proudění.

- $K_n < 0,01$ nastává turbulentní nebo laminární proudění
- $K_n > 1$ nastává molekulární proudění
- $0,01 \leq K_n \leq 1$ přechodová oblast (Knudsenovo proudění)

Využitím vztahu pro střední volnou dráhu 2.11 můžeme pro vzduch při teplotě 300 K určit, jaký typ proudění nastává, pomocí součinu tlaku plynu $p$ a charakteristického rozměru systému $D$:

- $pD > 0,662$ nastává turbulentní nebo laminární proudění
- $pD < 6,62 \times 10^{-3}$ nastává molekulární proudění
- $6,62 \times 10^{-3} \leq pD \leq 0,662$ přechodová oblast (Knudsenovo proudění)
2.3 Plyny ve vakuovém systému

2.3.1 Odraz částic od stěny

Molekuly plynu dopadající na povrch se nemusejí odrážet podle zákona zrcadlového odrazu. Důvodem je, že doba pobytu částic není nekonečně krátká a povrch vzhledem k velikosti molekuly není dokonale hladká plocha.

Rozdělení pravděpodobností směru rychlosti se řídí kosinovým (Knudsonovým) zákonom:

\[ P(\alpha) = P_0 \cos \alpha \]  

\( P(\alpha) \) je pravděpodobnost směru rychlosti, \( P_0 \) je pravděpodobnost odrazu ve směru kolmém k povrchu a \( \alpha \) je úhel od kolmice (viz obr. 2.4).

Nejpravděpodobnější směr odrazu molekuly je kolmý k povrchu. Pro směry rovnoběžné s povrchem je pravděpodobnost nulová. Rozdělení pravděpodobnosti směrů rychlosti odražených molekul je možné znázornit pomocí koule, která se dotýká povrchu v místě odrazu částice (obr. 2.4).

Obrázek 2.4: Rozdělení pravděpodobnosti směrů rychlostí částic odražených od povrchu.

2.3.2 Koeficient akomodace

Sdělení energie při dopadu a odrazu molekuly od povrchu je závislé na určitých podmínkách, které vyjadřuje koeficient akomodace. Pokud je ve vakuovém systému
plyn s teplotou \( T_1 \) a stěna s jinou teplotou \( T_2 \), pak koeficient akomodace můžeme vyjádřit vztahem:
\[
d = \frac{T_2' - T_1}{T_2 - T_1}
\] (2.25)

\( T_1 \) je teplota molekuly dopadající na povrch, \( T_2 \) je teplota povrchu a \( T_2' \) je teplota odražené molekuly. Jestliže částice, které se budou odrážet od stěny, budou mít teplotu stěny \( T_2 \), pak bude mít koeficient akomodace hodnotu jedna.

Koeficient akomodace závisí na druhu plynu, na stavu a druhu povrchu a na teplotě. Změna koeficientu v závislosti na teplotě v mezích 100-500 K pro různé plyny nepřekračuje 50\% [4]. U některých typů manometrů je hodnota tlaku, který měří, ovlivněna koeficientem akomodace.

### 2.3.3 Vakuová vodivost

Ve vakuové technice se často používá veličina proud plynu. Můžeme ji definovat vztahem:
\[
I = \frac{pV}{t}
\] (2.26)

\( I \) je proud plynu, \( p \) je tlak plynu a \( V \) je objem plynu, který prošel nějakým průřezem za čas \( t \). Vakuovou vodivost \( G \) nějakého prvků, který má na jedné straně tlak \( p_1 \), na druhé straně tlak \( p_2 \) (přičemž \( p_2 > p_1 \)), můžeme definovat pomocí vztahu:
\[
G = \frac{I}{p_2 - p_1}
\] (2.27)

\( I \) je proud plynu, který protéká přes tento prvek.

Odpor vakuového prvků \( R \) definujeme jako převrácenou hodnotu vakuové vodivosti
\[
R = \frac{1}{G}
\] (2.28)

Při paralelním spojení vakuových dílů platí, že výsledná vakuová vodivost je součtem vakuových vodivostí jednotlivých prvků:
\[
G = \sum_i G_i = \sum_i \frac{1}{R_i}
\] (2.29)

Při sériovém spojení vakuových dílů platí, že výsledný vakuový odpor je součtem vakuových odporů jednotlivých prvků:
\[
R = \frac{1}{G} = \sum_i R_i = \sum_i \frac{1}{G_i}
\] (2.30)
KAPITOLA 2. TEORETICKÉ ZÁKLADY VAKUOVÉ FYZIKY

Vakuová vodivost otvoru
Pokud máme v nekonečně velké stěné malý otvor a tloušťka stěny je velmi malá ve srovnání s průměrem otvoru, tak můžeme pro molekulární režim proudění plynu přes tento otvor odvodit vakuovou vodivost tohoto otvoru [2]:

\[ G = \frac{1}{4} v_a A_0 \] (2.31)

\( G \) je vakuová vodivost otvoru, \( v_a \) je střední aritmetická rychlost plynu a \( A_0 \) je plocha otvoru. Pro vzduch při teplotě \( T = 293 \) K můžeme předchozí vztah upravit na tvar:

\[ G = 115,6 A_0 \text{ [m}^3\text{s}^{-1}] \] (2.32)

Vakuová vodivost otvoru ve stěně konečných rozměrů
Pokud je otvor ve stěně konečných rozměrů, má vztah pro vakuovou vodivost otvoru při molekulárním proudění plynu tvar [4]:

\[ G' = \frac{1}{4} v_a A_0 \frac{1}{1 - \frac{A_0}{A}} \] (2.33)

\( G' \) je vakuová vodivost otvoru, \( v_a \) je střední aritmetická rychlost plynu, \( A_0 \) je plocha otvoru a \( A \) je plocha stěny.

Vakuová vodivost trubice s kruhovým průřezem
V obecném případě musíme počítat s vakuovou vodivostí vstupního otvoru a s vakuovou vodivostí samotné trubice:

\[ R = R_T + R_O = \frac{1}{G_T} + \frac{1}{G_O} \] (2.34)

\( R \) je vakuový odpor trubice, \( R_T \) je vakuový odpor dlouhé trubice, \( R_O \) je vakuový odpor vstupního otvoru, \( G_T \) je vakuová vodivost dlouhé trubice a \( G_O \) je vakuová vodivost otvoru. Ve speciálních případech platí:

\[ L \to 0 \Rightarrow R_T \to 0 \Rightarrow R \to R_O \] (2.35)

\[ L \gg D \Rightarrow R_T \gg R_O \Rightarrow R \to R_T \] (2.36)

\( L \) je délka trubice, \( D \) je průměr trubice.

Vakuová vodivost dlouhé trubice s kruhovým průřezem
Budeme uvažovat o velmi dlouhé trubici s kruhovým průřezem s molekulárním prouděním plynu, pro kterou platí:

\[ L \gg D , \; \lambda \gg D \] (2.37)
KAPITOLA 2. TEORETICKÉ ZÁKLADY VAKUOVÉ FYZIKY

$L$ je délka trubice, $D$ je průměr trubice a $\lambda$ je střední volná dráha částic. Potom lze pro vakuovou vodivost takové trubice odvodit vztah [2]:

$$G = \frac{v_a \pi D^3}{12L} \quad (2.38)$$

$L$ je délka trubice, $D$ je průměr trubice a $v_a$ je střední aritmetická rychlost částic. Tato vodivost není závislá na tlaku. Pro vzduch při teplotě $T = 293$ K můžeme vztah upravit na tvar [2]:

$$G = 121 \frac{D^3}{L} \quad [m^3 s^{-1}] \quad (2.39)$$

Pro vakuovou vodivost trubice s kruhovým průřezem pro laminární proudění plynu můžeme odvodit vztah [3]:

$$G = \frac{\pi}{128 \eta} P_s \frac{D^4}{L} \quad (2.40)$$

$L$ je délka trubice, $D$ je průměr trubice, $\eta$ je dynamická viskozita plynu a střední tlak plynu je $P_s = \frac{1}{2}(P_2 + P_1)$, přitom $P_1$ a $P_2$ jsou tlaky na koncích trubice. Pro vzduch při teplotě $T = 293$ K můžeme upravit na tvar [4]:

$$G = 1358 P_s \frac{D^4}{L} \quad [m^3 s^{-1}] \quad (2.41)$$

Vakuová vodivost dlouhé trubice s kruhovým průřezem při laminárním proudění plynu je závislá na středním tlaku plynu v trubici.

Určení vakuové vodivosti nějakého prvku můžeme provést výpočtem pomocí předchozích vztahů, numerickou simulací proudění, nebo experimentálním měřením.

2.3.4 Mezní tlak

Mezní tlak je pro daný vakuový systém definován jako nejnižší tlak, který jsme v něm schopní získat. Každá vakuová vývěva má svůj mezní tlak určený konstrukcí a použitými materiály. Pokud ve vývěvě, anebo ve vakuovém systému používáme nějakou pracovní kapalinu (rtuť, parafín, olej,...), pak tlak nasycené páry této kapaliny při pracovní teplotě musíme připočítat k meznímu tlaku.

Mězní tlak ve vakuovém systému ovlivňuje zejména použité vývěvy a zdroje plynu v tomto systému. Zdroje plynu jsou zejména:

- vakuová netěsnost
- desorpce plynů z povrchu materiálů
KAPITOLA 2. TEORETICKÉ ZÁKLADY VAKUOVÉ FYZIKY

- zpětná difuze plynu z vývěvy
- difuze plynu rozpuštěných ve stěně vakuové aparatury
- pronikání plynu přes stěnu vakuového systému
- vypařování a sublimace materiálů ve vakuovém systému

2.3.5 Čerpací rychlost

Čerpací rychlost vývěvy je definována jako objem plynu, který je vývěva schopna odčerpat za jednotku času:

$$ S = \frac{\Delta V}{\Delta t} $$ (2.42)

$S$ je čerpací rychlost a $\Delta V$ je objem plynu vyčerpaný za čas $\Delta t$.

Mezi proudem plynu a čerpací rychlostí platí vztah

$$ I = Sp $$ (2.43)

$I$ je proud plynu, $S$ je čerpací rychlost a $p$ je tlak plynu.

Nejčastěji používanou metodou pro měření čerpací rychlosti je metodou stálého tlaku. Tato metoda využívá vztahu:

$$ S = \frac{I}{p} $$ (2.44)

$S$ je čerpací rychlost, $I$ je proud plynu, který proudí do aparatury, a $p$ je tlak.

Čerpací rychlost všech vývěv je závislá na tlaku čerpaného plynu, pokud se tlak plynu blíží meznímu tlaku vývěvy, tak je čerpací rychlost vývěvy nulová. Čerpací rychlost udávaná výrobcem pro vývěvu platí na vstupní přírubě vývěvy. Pokud mezi vývěvu a vakuovou komoru vložíme nějaký spojovací prvek s vakuovou vodivostí $G$, je vakuová komora čerpána efektivní čerpací rychlostí $S_{ef}$, pro kterou lze odvodit vztah:

$$ S_{ef} = \frac{SG}{S+G} $$ (2.45)

$S$ je čerpací rychlost použité vývěvy. Platí nerovnost $S_{ef} < S$. To znamená, že efektivní čerpací rychlost vakuové komory je vždy menší než čerpací rychlost použité vývěvy. Proto vývěvy k vakuovým komorám připojujeme vakuovými prvky s co největší vakuovou vodivostí.
2.4 Rozdělení vakua

Podle tlaku, který získáme ve vakuové aparatuře, můžeme vakuum rozdělit na nízké, střední, vysoké, velmi vysoké a extrémně vysoké (viz tab. 2.5).


Tabulka 2.5: Rozdělení vakua, \( n \) je koncentrace částic a \( \lambda \) je střední volná dráha.

<table>
<thead>
<tr>
<th>vakuum zkratka</th>
<th>nízké</th>
<th>střední</th>
<th>vysoké</th>
<th>velmi vysoké</th>
<th>extrémně vysoké</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>tlak [Pa]</td>
<td>( 10^5 - 10^2 )</td>
<td>( 10^2 - 10^{-1} )</td>
<td>( 10^{-1} - 10^{-5} )</td>
<td>( 10^{-5} - 10^{-10} )</td>
<td>( &lt; 10^{-10} )</td>
</tr>
<tr>
<td>( n ) [cm(^{-3})]</td>
<td>( 10^{19} - 10^{16} )</td>
<td>( 10^{16} - 10^{13} )</td>
<td>( 10^{13} - 10^{9} )</td>
<td>( 10^9 - 10^4 )</td>
<td>( &lt; 10^4 )</td>
</tr>
<tr>
<td>( \lambda ) [m]</td>
<td>( 10^{-8} - 10^{-4} )</td>
<td>( 10^{-4} - 10^{-1} )</td>
<td>( 10^{-1} - 10^{3} )</td>
<td>( 10^3 - 10^8 )</td>
<td>( &gt; 10^8 )</td>
</tr>
<tr>
<td>typ proudění</td>
<td>viskózní</td>
<td>Knudsonovo</td>
<td>molekulární</td>
<td>molekulární</td>
<td>molekulární</td>
</tr>
</tbody>
</table>
Kapitola 3

Vakuové vývěvy

3.1 Vodní vývěva

Vodní vývěva používá jako pracovní kapalinu vodu. Rychlost a tlak proudící kapaliny jsou dány Bernoulliho rovnicí:

\[ \frac{1}{2} \varrho v^2 + h \varrho g + p = \text{konst.} \]  (3.1)

\( \varrho \) je hustota kapaliny, \( v \) je rychlost proudění, \( h \) je výška kapaliny, \( g \) je gravitační zrychlení a \( p \) je tlak kapaliny.

Vhodnou konstrukcí vývěvy dosáhneme toho, že tlak \( p \) bude nižší než tlak atmosférický a proudící kapalina bude nasávat plyn. Typické konstrukční uspořádání vodní vývěvy je na obr. 3.1. Voda proudí do trysky, která má proměnný průřez a nasává čerpaný plyn. Na výstupu vývěvy proudí směs čerpaného plynu a vody.

Tato vývěva může pracovat od atmosférického tlaku a na výstupu může mít také atmosférický tlak. Vodní vývěva může čerpat velké množství vodní páry a dosahuje mezních tlaků \( \sim 10^3 \) Pa.

Mezi nevýhody této vývěvy patří malá čerpací rychlost, velká spotřeba vody a zpětná difuze vodní páry do čerpaného prostoru. Proto se tato vývěva hodí pro čerpaní malých objemů.
Obrázek 3.1: Vodní vývěva: 1 - čerpaný plyn, 2 - vstup pro vodu a 3 - výstup vývěvy.

### 3.2 Vodokružní vývěva

Vodokružní vývěva používá jako pracovní kapalinu vodu [11]. Ko do vnitřního uspořádání je ve válcovém statoru asymetricky umístěn rotor s lopatkami, viz obr. 3.2. Princip spočívá v tom, že lopatky roztačejí vodu a ta vlivem odstředivé síly proudí po vnitřní stěně statoru. Lopatky se střídavě ponořují a vynořují z vodního prstence. Tím se vytváří malé čerpačí komůrky, ve kterých má voda funkci pístu.

Tato vývěva může pracovat od atmosférického tlaku, na výstupu může mít atmosférický tlak, přičemž dosahuje mezních tlaků ~ $10^2–10^3$ Pa. Mezi výhody patří fakt, že může čerpat velké množství vodní páry a je odolná vůči mechanickým nečistotám a kondenzování par. Má velkou čerpačí rychlost a co do konstrukce se používá jak jednostupňové, tak vícestupňové provedení. Díky svým vlastnostem se vodokružní vývěvy často používají v metalurgii a chemickém průmyslu.

Nevýhodou této vývěvy je zpětná difuze vodní páry do čerpaného prostoru.
3.3 Pístová vývěva

Tato vývěva pracuje na základě Boyleova–Mariottova zákona, při zvětšení objemu dojde ke snížení tlaku. Princip spočívá v tom, že píst přes vstupní ventil nasává plyn a přes výstupní ventil ho vytlačuje (viz obr. 3.3).

Obrázek 3.3: Pístová vývěva: 1 - píst, 2 - vstup, 3 - výstup, 4 - vstupní ventil, 5 - výstupní ventil.

3.4 Membránová vývěva

Membránová vývěva pracuje na podobném principu jako pístová vývěva. Píst zde představuje pružná membrána, která přes vstupní ventil nasává čerpaný plyn a přes výstupní ventil ho vytlačuje. Schéma membránové vývěvy je na obr. 3.4.

KAPITOLA 3. VAKUOVÉ VÝVĚVY

Obrázek 3.4: Membránová vývěva: 1 - pružná membrána, 2 - vstup, 3 - výstup, 4 - vstupní ventil, 5 - výstupní ventil.

3.5 Rotační olejová vývěva

Tato vývěva pracuje také na základě Boyleova–Mariottova zákona. Schéma rotační olejové vývěvy je na obr. 3.5. Asymetricky umístěný rotor se dvěma lopatkami je umístěn ve statoru. Tím, jak se rotor otáčí, je plyn nasáván do vývěvy a pak je vytlačován přes výstupní ventil a vrstvu oleje. Olej slouží k mazání tříčich ploch, odvádění tepla, vyrovnávání drobných nerovností rotoru a statoru a vyplňování tzv. škodlivého prostoru. Škodlivý prostor je objem, ve kterém zůstává plyn při vysokej tlaku a nelze ho z konstrukčních důvodů vytlačit z vývěvy (viz obr. 3.6). Nejčastěji se používá jednostupňové nebo dvoustupňové provedení.

Rotační olejová vývěva může pracovat od atmosférického tlaku, na výstupu může mít atmosférický tlak. Mezní tlak pro dvoustupňové provedení je \( \sim 10^{-2} \) Pa. Nevýhodou této vývěvy je, že páry oleje se mohou difuzí dostávat do čerpaného prostoru. Na olej pro rotační vývěvy máme speciální požadavky: nízký tlak nasycených par při pracovní teplotě vývěvy, dobré mazací vlastnosti a viskozita, odolnost vůči oxidaci a štěpení při pracovní teplotě vývěvy. Vlivem tření mezi rotoarem a statorem se vývěva zahřívá a její pracovní teplota je asi 50–60 °C.
Obrázek 3.5: Schéma rotační olejové vývěvy: 1 - rotor, 2 - lopatka rotoru, 3 - stator, 4 - sání plynu, 5 - výstup plynu, výstupní ventil, 6 - vývěva, 7 - pružina, 8 - olej a 9 - výstupní ventil.

Většina rotačních vývěv je vybavena speciálním ventilem pro proplachování vývěvy, tzv. gas ballastem. Při čerpání může plyn obsahovat složky, které kondenzují při stlačení ve vývěvě, jedná se zejména o vodní páru. Proplachovací ventil má za úkol snížit koncentraci kondenzujících plynů tím, že se do vývěvy připustí vzduch, a zabránit kondenzaci. Při otevřeném proplachovacím ventilu se mezní tlak vývěvy zvyšuje.
KAPITOLA 3. VAKUOVÉ VÝVĚVY

Obrázek 3.6: Škodlivý prostor v rotační olejové vývěvě se nejčastěji nachází v blízkosti výstupního kanálu: 1 - škodlivý prostor, 2 - stator, 3 - styk rotoru a statoru, 4 - rotor a 5 - lopatka rotoru.

3.6 Scroll vývěva

Scroll vývěva patří mezi tzv. suché vývěvy, protože nepoužívá žádnou pracovní kapalinu, tím pádem odpadají problémy se zpětnou difuzí par pracovní kapaliny do čerpaného prostoru. Konstrukce této vývěvy tvoří stator a rotor ve tvaru spirály (viz obr. 3.7). Rotor koná excentrický pohyb a stlačuje plyn směrem od okraje, kde se nachází sání vývěvy, ke středu statoru, kde je výstup z vývěvy.

Tato vývěva může pracovat od atmosférického tlaku, na výstupu má atmosférický tlak a dosahuje mezních tlaků \( \sim 10^0 \) Pa. Lze ji používat samostatně, nebo jako předčerpávací vývěvu pro jiné typy vývěv, které nemohou čerpat od atmosférického tlaku na vstupu. Typicky se používá například v kombinaci s turbo-molekulární vývěvou.

Obrázek 3.7: Konstrukce a princip Scroll vývěvy: stator - černá barva, rotor - červená barva, čerpaný plyn - zelená barva.
3.7 Rootsova vývěva

Rootsova vývěva představuje typ dvourotorové bezolejové vývěvy. Její schéma nalezeete na obr. 3.8. Využívá dva rotory, které se otácejí velkou rychlostí. Rotory se nedotýkají statoru a nejsou ani v kontaktu mezi sebou. Mezery mezi rotory, rotory a statorem bývají nastaveny na desetiny milimetrů. Počet otácek odpovídá hodnotě \( \sim 1000 \text{ min}^{-1} \). Jednostupňové provedení této vývěvy vyžaduje předčerpání na tlak asi \( 10^2 \text{ Pa} \) a dosahuje mezních tlaků \( \sim 10^{-3} \text{ Pa} \). Výhodou této vývěvy je velká čerpací rychlost. Pro její předčerpání se typicky používá rotační olejová vývěva.

Existuje i vícestupňové provedení Rootsovy vývěvy, jeho výhodou je, že může mít na vstupu i na výstupu atmosférický tlak. Mezní tlak takové vícestupňové vývěvy je asi \( 10^0 \text{ Pa} \).

3.8 Difuzní vývěva

Difuzní vývěva využívá pracovní kapalinu, v minulosti se jednalo o rtuť a parafín, dnes jsou to minerální a silikonové oleje. Jak je zřejmé ze schématu na obr. 3.9, k ohřevu pracovní kapaliny dochází ve varníku. Z něj jsou páry pracovní kapaliny vedeny parovodem do soustavy trysek a tryskající pára následně dopadá na ochlazovanou stěnu vývěvy. Na stěnách pára kondenzuje a stéká zpět do varníku. Tento proces se neustále opakuje. Molekuly čerpaného plynu difundují do proudu tryskající páry a pomocí srážek získávají rychlost směrem k výstupu z vývěvy, kde jsou odčerpány předčerpávací vývěvou. Pro předčerpání difuzní vývěvy se nejčastěji používá rotační olejová vývěva.

Oleje pro difuzní vývěvy musí splňovat řadu požadavků. Musí mít především nízký tlak nasycené páry, odolnost vůči oxidaci a odolnost vůči štěpení.
KAPITOLA 3. VAKUOVÉ VÝVĚVY

Výhodou difuzní vývěvy je jednoduchá konstrukce a dobrá čerpací rychlost. Vývěva dosahuje poměrně nízkého mezního tlaku \( \sim 10^{-7} \) Pa, ale může se zapínat až při vstupním tlaku \( \sim 1–10 \) Pa. Její nevýhodou je zpětná difuze olejových par do čerpaného prostoru. Proto se difuzní vývěvy často používají v kombinaci se srážecí olejových par, viz kap. 3.11.

Obrázek 3.9: Difuzní vývěva: stěna vývěvy je z vnějšku chlazena vodou.

3.9 Molekulární vývěva

Princip molekulární vývěvy je založen na rychle rotujícím disku, který předává hybnost molekulám čerpaného plynu. Schéma této vývěvy je na obr. 3.10. Jedná se o typ bezolejové vývěvy. Nepracuje od atmosférického tlaku, ale potřebuje předčerpat na tlak asi \( \sim 10^1 \) Pa. Počet otáček bývá zpravidla \( \sim 10000 \) min\(^{-1}\). Důležitá je malá mezera mezi rotorem a statorem, která určuje velikost zpětného proudění plynu a tím i mezní tlak vývěvy. Tato vývěva dosahuje mezního tlaku \( \sim 10^{-4} \) Pa. V dnešní době se samostatné molekulární vývěvy příliš často nepoužívají, protože byly nahrazeny turbomolekulárními vývěvami. Nevýhodou molekulární vývěvy je zejména malá čerpací rychlost.

34
3.1.0 Turbomolekulární vývěva

Turbomolekulární vývěva patří mezi bezolejové vývěvy. Z konstrukčního hlediska je tvořena rotorem a statorem, které se skládají z několika řad lopatek nakloněných pod různým úhlem. Molekuly plynu naráží na lopatky rotoru a statoru a tím získávají přídavnou složku rychlosti směrem k výstupu. Turbomolekulární vývěvy musí být předčerpané jiným typem vývěv typicky na tlak $\sim 10$ Pa. Pro předčerpaní se nejčastěji používají rotační olejové vývěvy. Rotor této vývěvy se otáčí velkou rychlostí, typické otáčky jsou 24000–90000 min$^{-1}$. Existují dvě základní konfigurace turbomolekulárních vývěv, na obr. 3.11 je horizontální uspořádání a na obr. 3.12 je vertikální uspořádání. Obr. 3.13 ukazuje detail lopatek rotoru a statoru.

Tato vývěva dosahuje mezního tlaku $\sim 10^{-9}$ Pa. Mezera mezi rotorem a statorem je $\sim 1$ mm. Často bývá součástí turbomolekulární vývěvy i molekulární vývěva. Důvodem je, že pro takovou vývěvu je dostatečně vyšší tlak pro předčerpaní, proto ji stačí předčerpat jen membránovou vývěvou na tlak $\sim 10^3$ Pa.

Čerpací rychlost turbomolekulární vývěvy vztažená na jednotku plochy rotoru $S_A$ se v závislosti na střední obvodové rychlosti rotoru dá odhadnout vztahem:

$$ S_A = \frac{d_f v}{4(v_a + 1)} $$

$v$ je střední obvodová rychlost rotoru, $v_a$ je střední aritmetická rychlost čerpaného plynu a $d_f \sim 0,9$ je korekční faktor závislý na tloušťce lopatek. Graficky je tato
funkce zobrazena na obr. 3.14. Čerpačí rychlost turbomolekulární vývěvy je závislá na druhu plynu. Nejčastěji se čerpačí rychlost uvádí pro dusík.

Obrázek 3.11: Turbomolekulární vývěva - horizontální uspořádání: 1 - rotor, 2 - vstup a 3 - výstup.


Obrázek 3.14: Čerpací rychlost turbomolekulární vývěvy pro dusík vztažená na jednotku plochy rotoru v závislosti na střední obvodové rychlosti rotoru.
3.11 Zamezení vniku par do čerpaného prostoru


Srážeče par zamezují přímému vniku par. Umísťují se blízko vývěvy, aby zkondenzované páry pracovní kapaliny odtékaly do vývěvy. Srážeče par jsou většinou chlazené vodou, ale mohou být i při pokojové teplotě, případně chlazeny tekutým dusíkem. Srážeče snižují čerpací rychlosti asi o 40–60 %. Konstrukce srážečů je nejčastěji navržena tak, aby molekuly par musely narazit na stěny srážeče a nemohly se přímo dostat do čerpaného prostoru.

Pro měření celkových tlaků plynů ve vakuové technice používáme manometry [3]. Jejich základní charakteristiky jsou:

- **měřicí obor** - rozsah tlaků, ve kterém lze manometr použít
- **citlivost** - poměr změny údaje na přístroji vůči změně tlaku
- **přesnost měření** - chyba měření
- **vliv měřícího přístroje** - jak daný typ manometru ovlivňuje hodnotu tlaku a složení plynu v měřeném systému
- **setrvačnost údaje přístroje** - rychlost reakce přístroje na změnu tlaku

Ve vakuové technice měříme rozsah tlaků v rozmezí $10^{-12} - 10^5$ Pa. Principy některých manometrů umožňují měřit i vysší tlak než atmosférický, ale pro účely vakuové techniky je atmosférický tlak dostatečný. Metody měření celkových tlaků dělíme na absolutní (přímé) a nepřímé.

a) **absolutní** (přímé) jsou ty metody, u kterých je hodnota tlaku určena přímo z údaje na měřicím přístroji, nebo pomocí vypočtu plynoucího z principu přístroje. Ve vztahu pro výpočet ale nesmí vystupovat charakteristiky měřeného plynu, pouze charakteristiky přístroje. Můžeme říct, že absolutní metody jsou nezávislé na druhu použitého plynu.

b) **nepřímé** jsou metody, kdy se tlak určuje prostřednictvím některé veličiny, která závisí na tlaku a zároveň na vlastnostech měřeného plynu. Takovou veličinou může být např. viskozita, ionizovatelnost nebo tepelná vodivost. Vypočítaný tlak u těchto metod závisí na druhu plynu. Přehled základních typů manometrů a jejich typické měřicí rozsahy jsou uvedeny v tab. 4.1.
Podle technického provedení můžeme manometry dělit na:

- aktivní měrky - elektronika je součástí měrky, na výstupu je definováno elektrické napětí v závislosti na tlaku
- aktivní digitální měrky - elektronika je součástí měrky, výstup je digitální, např. RS232, RS485, USB,...
- neaktivní měrky - elektronika není součástí měrky, připojuje se pomocí kabelu

<table>
<thead>
<tr>
<th>manometry</th>
<th>metoda</th>
<th>min [Pa]</th>
<th>max [Pa]</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>kapalinové U-trubice</td>
<td>absolutní</td>
<td>$10^{-1}$</td>
<td>$10^5$</td>
</tr>
<tr>
<td>McLeodův</td>
<td>absolutní</td>
<td>$10^{-4}$</td>
<td>$10^2$</td>
</tr>
<tr>
<td>mechanické</td>
<td>absolutní</td>
<td>$10^2$</td>
<td>$10^5$</td>
</tr>
<tr>
<td>kapacitní</td>
<td>absolutní</td>
<td>$10^{-3}$</td>
<td>$10^5$</td>
</tr>
<tr>
<td>piezo</td>
<td>absolutní</td>
<td>$10^1$</td>
<td>$10^5$</td>
</tr>
<tr>
<td>viskózní s kuličkou</td>
<td>nepřímá</td>
<td>$10^{-5}$</td>
<td>$10^1$</td>
</tr>
<tr>
<td>odporové (Pirani)</td>
<td>nepřímá</td>
<td>$10^{-2}$</td>
<td>$10^5$</td>
</tr>
<tr>
<td>ionizační se žhavenou katodou</td>
<td>nepřímá</td>
<td>$10^{-9}$</td>
<td>$10^0$</td>
</tr>
<tr>
<td>ionizační se studenou katodou</td>
<td>nepřímá</td>
<td>$10^{-7}$</td>
<td>$10^0$</td>
</tr>
</tbody>
</table>
### 4.1 Kapalinové U-manometry

Kapalinové manometry představují nej jednodušší příklad absolutní metody měření tlaku. Skládají se typicky ze skleněné trubice naplněné rtutí nebo olejem a tlak se určuje z rozdílu hladin kapaliny. Zdrojem chyb je zde samotné odečítání hladiny kapaliny (menisky způsobené povrchovým napětí kapaliny, kromě toho dochází k optickému lomu na skle).

Existuje několik variant: otevřený U-manometr, uzavřený U-manometr a šikmý uzavřený U-manometr. U všech těchto manometrů je důležité, aby byla v obou ramenech stejná hustota i teplota použité kapaliny. Při odečítání výšky hladiny je třeba brát střední výšku menisku kapaliny, roli může hrát i průměr trubice. Různý tvar menisku může být způsoben i tím, jestli se kapalina do koncové polohy dostala stoupáním nebo klesáním. U olejových manometrů je navíc nutné brát v úvahu zpoždění způsobené viskozitou oleje. Dolní hranice měřených tlaků je \( \sim 10^{-1} \) Pa, za předpokladu použití pomocných zařízení pro odečet hladiny. Horní hranice měřených tlaků je \( \sim 10^5 \) Pa. Výhodou těchto manometrů je velmi jednoduchá konstrukce. Nevýhodou je kontaminace vakuového systému zpětnou difuzí par pracovní kapaliny. Mezi nejčastěji používané pracovní kapaliny patří rtuť a olej. Pokud je pracovní kapalinou rtuť, pak rozdíl hladin \( h \) v milimetrech udává přímo tlak v jednotkách Torr. Pokud použijeme jinou kapalinu než rtuť, nejčastěji olej,
pak tlak odpovídá \( p = \frac{\varrho_o}{\varrho_{Hg}} h \) [torr], kde \( \varrho_o \) je hustota oleje a \( \varrho_{Hg} \) je hustota rtuti.

### 4.1.1 Otevřený U-manometr

Otevřený U-manometr je na obr. 4.2a. Jedno rameno je připojeno k systému, v němž je tlak \( p \), který chceme změřit. Druhé rameno je spojeno s atmosférickým tlakem \( p_{atm} \). Rozdíl tlaků \( \Delta p = p_{atm} - p \) je určen rozdílem výšek hladin pracovní kapaliny, \( \Delta p = h \varrho g \), kde \( h \) je rozdíl výšek hladin, \( \varrho \) je hustota použité kapaliny a \( g \) je gravitační zrychlení. Výsledkem měření je tedy údaj diferenciálního tlaku. Pokud chceme spočítat tlak ve vakuovém systému, musíme znát atmosférický tlak.

### 4.1.2 Uzavřený U-manometr

Schéma uzavřeného U-manometru je na obr. 4.2b. Jedna trubice je uzavřena a je v ní tlak \( p_{ref} \approx 0 \) Pa, druhá je spojena s měřeným systémem. Měřený tlak odpovídá hydrostatickému tlaku \( p = h \varrho g \). Nejnižší měřitelný tlak je dánn minimálním rozdílem hladin, který můžeme odečíst. Ve srovnání s otevřeným U-manometrem je uzavřený U-manometr vhodnější pro měření nízkých tlaků.

### 4.1.3 Šikmý uzavřený U-manometr

Šikmý uzavřený U-manometr je na obr. 4.2c. Na rozdíl od uzavřeného U-manometru je jedno rameno šikmé pod úhlem \( \alpha \). Jinak je princip analogický s uzavřeným U-manometrem. Šiknost trubice zvětšuje citlivost měření. Vztah výšky hladiny v rovné a v šikmé trubici je \( h = h'sina \), citlivost se tedy zvětší o \( \frac{1}{sina} \).
KAPITOLA 4. MANOMETRY

Obrázek 4.2: U-manometry: a) otevřený U-manometr, b) uzavřený U-manometr, c) šikmý uzavřený U-manometr.

4.2 McLeodův kompresní manometr

McLeodův manometr je typickým zástupcem kompresních manometrů. Kompresní manometry měří tlak na základě komprese plynu, dokází měřit menší tlaky než kapalinové U-manometry. Jedná se o absolutní manometry. Princip kompresních manometrů spočívá v tom, že od měřeného systému oddělíme část plynu o měřeném tlaku $p_1$ a objemu $V_1$. Pak tento plyn stlačíme na menší objem $V_2$ a tím vzroste tlak plynu na $p_2$. Platí $p_1 V_1 = p_2 V_2 \Rightarrow p_1 = \frac{V_2}{V_1} p_2$.

McLeodův kompresní manometr je zobrazen na obr. 4.3. Tento manometr používá rtuť jako pracovní kapalinu. Nejdříve spojíme manometr se systémem, ve kterém chceme měřit tlak, a pak změněme výšku hladiny rtuti. Rtuť funguje jako píst a stlačí plyn do měřicí kapiláry.

V okamžiku, kdy rtuť projde rovinou $X_1$, tak uzavře objem plynu v baňce a měřící kapiláře, kde je tlak $p_1$. Při dalším zvedání hladiny působí rtuť jako píst a stlačuje plyn až do měřící kapiláry - rovina $X_2$. Přitom hladina rtuti ve srovnávací kapiláře je v rovině $X_3$. Označme objem nezaplněné kapiláry $V_2$ a tlak v tomto objemu $p_2$.

$$p_2 = p_1 + H \text{ [torr]}$$  (4.1)

$H$ je rozdíl rovin $X_2$ a $X_3$. Označme $V_1$ objem baňky a kapiláry. Pro objem nezaplněné kapiláry platí

$$V_2 = \frac{1}{4} \pi d^2 h$$  (4.2)

$d$ je průměr kapiláry a $h$ je rozdíl rovin $X_2$ a $X_4$. Využitím Boyleova–Mariottova
zákona dostaneme
\[
p_1 = \frac{V_2}{V_1} p_2 = \frac{1}{4} \pi d^2 h p_2 = \frac{\pi d^2}{4 V_1} h (p_1 + H)
\]
(4.3)

označme \( K = \frac{\pi d^2}{4 V_1} \) konstantu manometru, která závisí na průměru kapily a objemu baňky:
\[
p_1 = K h (p_1 + H) \Rightarrow p_1 = \frac{K h H}{1 - Kh}
\]
(4.4)

Pro \( Kh \ll 1 \) lze zjednodušit na tvar
\[
p_1 = K h H \text{ [torr]}
\]
(4.5)

Obrázek 4.3: McLeodův manometr: a) manometr spojený s komorou s měRENým tlakem, b) po kompresi plynu do měŘíci kapily.

Využívají se dvě měŘící metody, lineární a kvadratická. Při lineární měŘící metodě se hladina rtuti méní tak, aby rozdíl rovin \( X_4 \) a \( X_2 \) byl konstantní. Pak pro tlak platí \( p_1 = K_1 H \) [torr], kde \( K_1 = Kh \). Při kvadratické měŘící metodě se hladina rtuti méní tak, aby byla ve srovnávací kapiláře až na rovině \( X_4 \), pak \( h = H \) a pro tlak platí \( p_1 = K h^2 \) [torr].

Manometr měŘí tím nižší tlaky, čím menší je konstanta \( K \). To znamená, čím je objem baňky větší a průměr kapily menší. Minimální průměr kapily je 0,7 mm,
při menších průměrech nastávají potíže s pohybem rtuti. Objem baňky nelze libovolně zvětšit kvůli velké hustotě rtuti.

Tímto manometrem nelze měřit tlak plynů, které kondenzují za podmínek, při kterých se měření provádí. Tento manometr neměří spojité, takže není schopen měřit rychlé změny tlaku. Páry rtuti se mohou difuzí dostávat do čerpaného systému. Výhodou tohoto manometru je, že je absolutní, a proto se dříve využíval jako etalon pro cejchování tepelných a ionizačních manometrů. Dolní hranice měřených tlaků je \( \sim 10^{-4} \) Pa. Horní hranice měřených tlaků je \( \sim 10^{2} \) Pa, typický měřící rozsah jednoho manometru odpovídá 3–4 tlakovým řádům.

### 4.3 Mechanické manometry

Mechanické manometry využívají pro měření tlaku deformaci pružného elementu. Jedná se proto o absolutní metodu měření tlaku. Mechanické manometry nepotřebují k fungování elektroniku ani napájení. Jsou schopné měřit tlak v rozmezí \( 10^{-5} - 10^{5} \) Pa, s přesností až 2 %. Výhodou mechanických manometrů jsou malé rozměry a malá hmotnost, jednoduchá konstrukce a dostatečná přesnost. Nevýhodou je omezený rozsah měřených tlaků. Mechanické manometry můžeme rozdělit podle typu pružného elementu na membránové, trubičkové a vlnovcové.

#### 4.3.1 Membránové manometry

Principem těchto manometrů je deformace pružné membrány vlivem rozdílu tlaků, viz obr. 4.4. Deformace se přenáší na mechanický ukazatel s kalibrovanou stupnicí. Na jedné straně membrány je známý referenční tlak a na druhé straně membrány je měřený tlak. Referenční tlak bývá mnohem menší než měřený tlak.

#### 4.3.2 Trubičkové manometry

Pružný element v tomto případě představuje kruhově ohnutá trubice s tenkými stěnami, tzv. Bourdonova trubice, obr. 4.5. Jeden konec trubice je uzavřený a druhý je spojen se systémem, ve kterém měříme tlak. Vlivem rozdílu tlaků se mění geometrický tvar trubice a tato deformace je mechanicky přenášena na pohyb mechanického ukazatele s kalibrovanou stupnicí. Měříme tlak uvnitř Bourdonovy trubice, vně trubic je tlak referenční, a tím je nejčastěji tlak atmosférický.
Obrázek 4.4: Membránový manometr: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - membrána a 3 - mechanický ukazatel se stupnicí.

Obrázek 4.5: Trubičkový manometr: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - Bourdonova trubice a 3 - mechanický ukazatel se stupnicí.
4.3.3 Vlnovcové manometry

Pružným elementem je tenkostěnný kovový vlnovec, viz obr. 4.6. Vlivem rozdílu tlaků uvnitř a vně vlnovce se mění jeho délka. Změnu délky vlnovce přenášíme na mechanický ukazatel s kalibrovanou stupnicí. Referenčním tlakem je typicky tlak atmosférický.

Obrázek 4.6: Vlnovcový manometr: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - pružný vlnovec a 3 - mechanický ukazatel se stupnicí.

4.4 Kapacitní manometry

KAPITOLA 4. MANOMETRY

tlaků. Kapacitní manometry se často používají pro kalibraci nepřímých manometrů. Výhodou kapacitních manometrů je absolutní měření, nezávislé na druhu plynu, a velká přesnost. Chyba měření je typicky < 1 %. Nevýhodou je citlivost na změnu mechanických vlastností pružné membrány (vliv teploty, sorbovaných plynů, atd.) a fakt, že nemůžeme měřit příliš nízké tlaky.

Obrázek 4.7: Kapacitní manometr: 1 - prostor s měřeným tlakem, 2 - komůrka s referenčním tlakem a 3 - elektronika pro měření kapacity.

4.5 Piezo manometry

KAPITOLA 4. MANOMETRY

Obrázek 4.8: Piezo manometr: 1 - prostor s měřeným tlakem, 2 - komůrka s referenčním tlakem a 3 - elektronika pro piezo prvek.

4.6 Tepelné manometry

Tepelné manometry pracují typicky v měřicím rozsahu $10^{-2}$–$10^5$ Pa. Jedná se o nepřímou měřící metodu, kdy je měřený tlak závislý na tepelné vodivosti plynu ve vakuovém systému. Horní hranice měřicího oboru je omezena tlakem, při kterém tepelná vodivost plynu již není funkcí tlaku. Různé typy tepelných manometrů využívají měření různých fyzikálních veličin, jejichž závislost na teplotě se mění s tlakem. Podstatnou část manometru tvoří nějaký citlivý element, který je elektrickým příkonem vyhřívan na teplotu $T$ a ta je vyšší než teplota plynu $T_0$.

Dodávaný výkon se rozdělí na tři části: a) na výkon odváděný molekulami plynu, b) na výkon, který tento element vyzáří jako šedé těleso (Planckův vyzařovací zákon) a c) výkon odvedený přívodními vodiči. Dolní hranice měřeného tlaku je omezena hodnotou tlaku, kdy se stává dominantním výkon, který manometr vyzáří jako šedé těleso.

Nejčastěji teplotu $T$ citlivého elementu měříme: ze změny odporu (odporové manometry), pomocí termočlánku (termočlánkové manometry), termistoru a nebo z deformace bimetalu (dilatační manometry).
KAPITOLA 4. MANOMETRY

4.6.1 Odporové (Piraniho) manometry

Piraniho manometr se vyznačuje velmi jednoduchou konstrukcí. Citlivým elementem je zde tenké kovové vlákno zavěšené uvnitř manometru (obr. 4.9). Typický měřicí rozsah je $10^{-2}$–$10^{5}$ Pa a chyba měření je asi 15 %, ale ne v celém rozsahu. V oblasti tlaků $10^{4}$–$10^{5}$ Pa chyba měření prudce roste, protože dochází k přenosu tepla konvekcí a tepelná vodivost plynu přestává být závislá na tlaku. Údaj tohoto manometru závisí na druhu plynu a na teplotě plynu. Moderní Piraniho manometry mají teplotní čidlo a elektroniku, která dokáže změnu teploty plynu korigovat.

Odpor vlákna v Piraniho manometru je funkce teploty:

$$R = R_0(1 + \beta(T - T_0)) \quad (4.6)$$

$R_0$ je odpor při teplotě $T_0$, $\beta$ je teplotní součinitel odporu a $T$ je teplota vlákna. Elektrický výkon $P_e$, kterým vlákno vyhříváme, můžeme vyjádřit:

$$P_e = P_c + P_z + P_p \quad (4.7)$$

$P_c$ je výkon odváděný molekulami plynu, $P_z$ je výkon odváděný tepelným zářením vlákna a $P_p$ je výkon odváděný přívody vlákna.

Pro výkon $P_z$, který vlákno vyzáří jako šedé těleso, platí:

$$P_z = A_0\sigma\varepsilon(T^4 - T_0^4) \quad (4.8)$$

$A_0$ je plocha vlákna, $\sigma$ je Stefanova–Boltzmannova konstanta, $\varepsilon$ je koeficient emisivity vlákna, $T$ je teplota vlákna a $T_0$ je teplota plynu.

Pro výkon $P_c$, který odvádí molekuly plynu, které dopadají na vlákno, platí:

$$P_c = [\alpha\lambda_T(p)]A_0(T - T_0) \quad (4.9)$$

$\alpha$ je akomodační koeficient a $\lambda_T(p)$ je tepelná vodivost plynu jako funkce tlaku.

Tlak pomocí Piraniho manometru můžeme měřit dvěma metodami: **metodou konstantního proudu** a nebo **metodou konstantní teploty**.

Metoda konstantního proudu je založena na konstantním elektrickém proudu, který protéká vláknom v Piraniho manometru. Veličinou, která je úměrná tlaku, je elektrický odpor tohoto vlákna. Tento odpor můžeme měřit například můstkovou metodou.

Metoda konstantní teploty využívá zapojení Piraniho manometru do můstku se třemi stejnými odpory a elektronikou, která automaticky vyrovňává tento můstek. Při rovnováže můstku musí být odpor vlákna v Piraniho manometru stejný jako tři zbývající odpory. Pokud je tento odpor konstantní, tak je konstantní i teplota vlákna.
v Piraniho manometru. Veličinou úměrnou tlaku je napětí zdroje, kterým musíme napájet tento můstk tak, aby byl odpor vlákna v Piraniho manometru konstantní.

Speciálním typem Piraniho manometru je tzv. **Konvektron** (Convectron). Funguje ve stejném rozsahu tlaků jako Piraniho manometr. Při vyšším tlaku využívá tepelnou konvekci plynu a měří s přijatelnou chybou až do atmosférického tlaku. Díky využití tepelné konvekce měří i v oblasti tlaků, kde je tepelná vodivost plynu konstantní. Na rozdíl od Piraniho manometru je Konvektron schopen změřit i atmosférický tlak. Tento manometr má předepsanou orientaci pro montáž na aparátoru, nelze ho libovolně otáčet. Chyba měření je asi 15 %.

Dalším speciálním typem je tzv. **MicroPirani** manometr. MicroPirani je miniaturizovaný Piraniho manometr s tím rozdílem, že je vytvořen technologií MEMS (Micro-Electro-Mechanical System), tzn. je vyleptán a vyráběn podobně jako polovodičové čipy. Měřící rozsah je $10^{-2} – 10^5$ Pa. Vyznačuje se dobrou přesností, která je ale závislá na hodnotě měřeného tlaku (v rozsahu tlaků $10^{-2} – 10^{-1}$ Pa je chyba měření 10 %, v rozsahu $10^{-1} – 10^4$ Pa je chyba měření 5 % a v rozsahu $10^4 – 10^5$ Pa se chyba zvyšuje až na 25 %). Je přesnější než klasický Piraniho manometr a umožňuje měřit v širším rozsahu.

Obrázek 4.9: Piraniho manometr: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - tenké kovové vlákno a 3 - elektrické průchodky.

### 4.6.2 Termočlánkové manometry

Konstrukce je podobná Piraniho manometru. Tenké kovové vlákno vyhříváme elektrickým proudem a jeho teplotu měříme pomocí termočlánku (obr. 4.10). Teplota
vlákna je závislá na tepelné vodivosti plynu a tím také na druhu plynu ve vakuovém systému. Typický měřicí rozsah termočlánkového manometru je $10^{-1} - 10^3$ Pa.

![Diagram termočlánkového manometru]

Obrázek 4.10: Termočlánkový manometr: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - termočlánek a 3 - vyhřívané vlákno.

### 4.6.3 Termistorové manometry

Další variantou tepelných manometrů je využití termistorů (viz obr. 4.11). V tomto případě se termistor zahřívá průchodem elektrického proudu na teplotu asi 100 °C. Elektrický odpor termistoru závisí na teplotě. Teplota termistoru je závislá na tepelné vodivosti plynu a tím na tlaku plynu. Termistor je zapojen do odporového místku a elektrický proud, který protéká termistorem, méníme tak, aby elektrický odpor termistoru byl konstantní. Velikostí úměrnou tlaku je pak velikost proudu, který protéká termistorem. V dnešní době nejsou termistorové manometry příliš rozšířené.

### 4.6.4 Dilatační manometry

Citlivým elementem je materiál, jehož geometrické parametry závisí na teplotě. Vlivem teploty dochází k deformaci elementu co do objemu, délky nebo úhlu zkroucení. Jedním z konstrukčních provedení jsou dvě bimetalové spirály, které jsou na jednom konci spojeny s mechanickým ukazatelem s kalibrovanou stupnicí a na druhém konci upevněny. Procházející elektrický proud zahřívá spirály a jejich deformace je určena teplotou, která je zase dána tepelnou vodivostí plynu. Typický měřicí obor tohoto manometru je $10^{-1} - 10^2$ Pa a jeho citlivost závisí na druhu plynu.
Obrázek 4.11: Termistorový manometr: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - termistor a 3 - elektrické průchodky.

4.7 Viskózní manometry


4.7.1 Viskózní manometr s rotujícím kotoučem


4.7.2 Viskózní manometr s rotující kuličkou

Tento manometr se skládá z kuličky a vakuové trubice, která je připojena k systému, ve kterém chceme měřit tlak. Kovovou kuličku uvnitř trubice uvádí do pohybu vnější magnetické pole [2]. Měří se zpomaléní rotující kuličky, která levituje v magnetickém poli a není v kontaktu se stěnami trubice, viz obr. 4.12. Ke zpomalení dochází vlivem
molekul plynu narážejících do povrchu kuličky. Čím nižší je v systému koncentrace částic, tím méně se kulička zpomalu. Měření je závislé na akomodačním koeficientu pro přenos tečné složky hybnosti pro daný plyn a kuličku. Akomodační koeficient \( \alpha \) je nutné určit experimentálně. Hodnota akomodačního koeficientu je v čase velmi stabilní. Jedná se o malé kompaktní zařízení s měřicím rozsahem \( 10^{-5}–10^{-2} \) Pa. Chyba měření pro tlaky 1–100 Pa je asi 10 %, pro nižší tlaky je chyba asi 1 %.

Obrázek 4.12: Viskozní manometr s rotující kuličkou: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - rotující kulička, 3 - permanentní magnety a 4 - cívky elektromagnetů.

### 4.8 Ionizační manometry

Pracují na principu ionizace molekul a měření vzniklého iontového proudu. Předchozí metody měření nízkých tlaků, založené na jiných principech, nejsou dostatečně citlivé pro měření velmi nízkých tlaků. Při ionizaci se neionizují všechny molekuly, ale pouze jejích část. To určuje koeficient \( \gamma \), pro který platí vztah \( n_i = \gamma n \), kde \( n \) je koncentrace plynu a \( n_i \) je koncentrace vzniklých iontů.


Nevýhodou ionizačních manometrů je fakt, že ovlivňují tlak v měřeném systému. Vykazují čerpaní efekt a vlivem vyšší teploty dochází k desorpcí plynů ze stěn a elektrod. Jedná se o nepřímé manometry závislé na druhu plynu ve vakuumovém systému. Výše zmíněné nevýhody mohou být příčinami relativně velkých chyb měření.
V dnešní době jsou nejpoužívanější dva typy ionizačních manometrů, a to manometr se studenou katodou a manometr se žhavenou katodou.

4.8.1 Ionizační manometr se studenou katodou

Tento manometr využívá závislosti parametrů elektrického nízkotlakého výboje na tlaku. Princip je založen na samostatném výboji, který vzniká při vysokém napětí. Aby samostatný výboj hořel i při nízkém tlaku, je potřeba prodlužit dráhy elektronů. Tím dochází častěji ke srázkám elektronů s molekulami a k častější ionizaci. Pro prodloužení drah elektronů se využívá magnetické pole vytvořené pomocí vnějších permanentních magnetů. Elektrický proud procházející výbojem je mírou tlaku \( I_c = f(p) \).

\[
I_c \sim N_e L_i d_0^2 p e^{-\frac{U_i d_0}{kT E}}
\]  

(4.10)

\( N_e \) je počet elektronů emitovaných katodou za 1 s, \( L_i \) je dráha, na které dochází k ionizaci, \( d_0 \) je efektivní průměr molekuly plynu, \( U_i \) je ionizační potenciál plynu, \( E \) je intenzita elektrického pole mezi katodou a anodou a \( p \) je tlak plynu. Tento vztah můžeme upravit na:

\[
I_c = K p
\]  

(4.11)

\( K \) vyjadřuje citlivost manometru a \( p \) tlak plynu.

Obrázek 4.13: Penningův ionizační manometr se studenou katodou: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - anoda, 3 - katoda a 4 - permanentní magnet.
Obrázek 4.14: Ionizační manometr se studenou katodou, konfigurace inverzní magnetron: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - anoda, 3 - válcová katoda a 4 - permanentní magnet.

Výbojové manometry jsou robustní, využívají magnetické pole a nevadí jim prudké zavzdušnění systému. Používají se dvě základní konfigurace výbojových manometrů: a) Penningův manometr - anoda má tvar válce, dvě ploché katody a magnetické pole je kolmé ke katodě (obr. 4.13), b) Inverzní magnetron - tyčová anoda, katoda je ve tvaru válce, magnetické pole je rovnoběžné s anodou (obr. 4.14).


### 4.8.2 Ionizační manometr se žhavenou katodou

Tyto manometry využívají k ionizaci plynu proud elektronů, které emituje rozžhavená katoda. K ionizaci dochází mezi anodou a katodou. Tyto manometry mají tři elektrody: žhavenou katodu, anodu, která urychluje a odvádí elektrony, a kolektor, na který dopadají vzniklé kladné ionty (obr. 4.15).

Katoda vytváří elektronový proud $I_e$, který ionizuje plyn. Velikost elektronového proudu se udržuje konstantní pomocí regulace teploty katody. Kolektor sbírá
KAPITOLA 4. MANOMETRY

kladné ionty, jejichž proud spočítáme následovně:

\[ I_{p} = K_{0}I_{e}p \Rightarrow p = \frac{1}{K_{0}} \frac{I_{p}}{I_{e}} \]  

(4.12)

\( I_{p} \) je proud kladných iontů na kolektor, \( K_{0} \) je citlivost manometru, \( I_{e} \) je emisní elektronový proud, který teče anodou, a \( p \) je tlak plynu.

Citlivost manometru \( K_{0} \) [Pa\(^{-1}\)] se liší pro různé plyny, protože jednotlivé plyny mají různý koeficient specifické ionizace \( \epsilon \). Ten vyjadřuje množství iontů vytvořených jedním elektronem na dráze 1 cm v daném plynu při tlaku 133 Pa a teplotě 273 K. Koeficient \( \epsilon \) je závislý na energii elektronů, a tedy na urychlovacím napětí.

Citlivost ionizačního manometru závisí na tvaru elektrod měřky a napájecích napětích. Citlivost měřky vzniká s rostoucím proudem elektronů \( I_{e} \), který je typicky v rozsahu \( 10^{-5} - 10^{-2} \) A. U směsí plynů je nutno stanovit citlivost a proud pro jednotlivé plyny. Celkový iontový proud určíme pomocí vztahu:

\[ I_{p} = \sum_{j} S_{j}p_{j} \]  

(4.13)

kde \( S_{j} \) je citlivost manometru pro daný plyn a \( p_{j} \) je parciální tlak plynu.

Dopad iontů na kolektor závisí na potenciálu kolektoru, dále na tvaru a na poloze kolektoru vzhledem k prostoru, kde dochází k ionizaci.

Nejčastěji využívaný tvar kolektoru je deskovitý nebo tyčkovitý. Deskovitý kolektor se vyznačuje velkým povrchem. Odcíchlování dráh iontů u něj není podstatné, protože všechny ionty dopadají na kolektor. Tyčkovitý kolektor je tvořen tyčí o malém průměru a účinnost záchytu iontů u tohoto typu je malá.

Pokud nejsou v obvodu kolektoru žádné další proudy, je iontový kolektorový proud mírou tlaku \( I_{p} = K_{0}I_{e}p \). Ve skutečnosti se mohou v obvodu kolektoru projevit tzv. parazitní proudy, které si nyní rozebereme podrobněji. Parazitní proudy omezují možnost měření velmi nízkých tlaků.

\[ I_{c} = I_{p} + \sum_{i} I_{i} = K_{0}I_{e}p + \sum_{i} I_{i} \]  

(4.14)

\( I_{c} \) je celkový kolektorový proud, \( I_{i} \) jsou parazitní proudy.

Nejdůležitější parazitní proudy:

1) Proud vyvolaný rentgenovým a ultrafialovým zářením
První parazitní proud je způsoben fotoemisí elektronů z kolektoru. Vysokoenergetické elektrony dopadají na anodu a tím vytváří rentgenové a ultrafialové záření.
Elektromagnetické záření může dopadat na kolektor a způsobit fotoemisi také nepřímo, odrazem od různých povrchů. Pro tento parazitní proud $I_1$ platí:

$$I_1 \sim A_c I_e \frac{1}{D_{AC}}$$  \hspace{1cm} (4.15)

$A_c$ je plocha kolektoru, $I_e$ je anodový proud a $D_{AC}$ je vzdálenost anoda-kolektor. Tento proud můžeme omezit vhodnou geometrií elektrod, zejména zmenšením povrchu kolektoru $A_c$.

2) Proudy vyvolané elektronovou desorpcí

Při bombardování povrchu elektrony se z něj mohou uvolňovat plyny ve formě neutrálních atomů a molekul, ionizovaných atomů a molekul, disocovaných molekul. Pro disociaci jsou potřeba elektrony s energií cca 20 eV. Neutrály se rozptylují po celém vakuovém prostoru a zvyšují tak tlak. Ionizované molekuly a atomy mohou dopadat na kolektor a tím vytvářet parazitní iontový proud vyvolaný elektronovou desorpcí. Tento proud můžeme snížit odstraněním sorbovaných molekul plynu z elektrodu. Tento postup se nazývá odplynění manometru a provádí se pomocí elektrického proudu.

3) Iontový proud ze žhavené katody

Žhavená katoda je také zdrojem iontů, což způsobuje tento parazitní proud. Katoda může emitovat ióny při vysoké teplotě. Projevuje se to ale pouze při velmi nízkých tlacích. Tento parazitní proud můžeme omezit snížením pracovní teploty katody.

4) Svodové proudy

Vznikají při nedokonalé izolaci kolektoru od ostatních elektrod. Tento proud můžeme omezit použitím vhodné izolace, nebo použít uzemněný prstenec, který odděluje kolektor od ostatních elektrod měry.

Nejvýznamnějším parazitním proudem je proud vyvolaný rentgenovým a ultrafialovým zářením.

Používají se dvě základní konfigurace elektrod: a) s vnějším kolektorem, kde kolektor je válcový, anodu představuje válcová mřížka a katoda se nachází uvnitř anody, b) s vnitřním kolektorem, tzv. Bayard–Alpert, kde kolektor představuje tenký drátek uprostřed anody, anoda je válcová mřížka a katoda je vně mřížky.


Chyba měření ionizačního manometru se žhavenou katodou je $\sim 4\text{–}15\%$.  

58
Tyto manometry jsou přesnější ve srovnání s manometry se studenou katodou. Nevyužívají žádné magnetické pole, ale jsou citlivější na provoz, proto je nelze prudce zavzdušnit.

Tabulka 4.2: Maximální hodnota koeficientu specifické ionizace $\epsilon$ pro různé plyny a optimální urychlovací napětí elektronů.

<table>
<thead>
<tr>
<th></th>
<th>He</th>
<th>Ne</th>
<th>H₂</th>
<th>N₂</th>
<th>CO</th>
<th>O₂</th>
<th>Ar</th>
<th>Hg</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>$\epsilon_{max}$</td>
<td>1,2</td>
<td>3</td>
<td>3,7</td>
<td>10</td>
<td>11</td>
<td>12</td>
<td>13</td>
<td>19</td>
</tr>
<tr>
<td>$U_{max}$ [V]</td>
<td>110</td>
<td>170</td>
<td>65</td>
<td>95</td>
<td>100</td>
<td>120</td>
<td>90</td>
<td>85</td>
</tr>
</tbody>
</table>

Obrázek 4.15: Ionizační manometr se žhavenou katodou: 1 - žhavená katoda jako zdroj elektronů, 2 - anoda a 3 - kolektor.
Obrázek 4.16: Ionizační manometr se žhavenou katodou, konfigurace Bayard–Alpert: 1 - žhavená katoda, 2 - anoda a 3 - kolektor.

4.9 Kalibrace manometrů

Kalibraci manometrů můžeme provádět různými metodami. Musíme ale dát pozor na složení plynu ve vakuovém systému a na to, jestli je kalibrovaný manometr absolutní, nebo nepřímý.

Nejjednodušší metodou kalibrace je přímé porovnání s referenčním manometrem. Tato metoda se dá využít zejména pro vyšší tlaky. Další metodou je definované snížení tlaku v kalibrácní komoře vakuového systému. To lze provést několika způsoby.


Další metodou definovaného snížení tlaku je tzv. dynamická expanze plynu (obr. 4.18). Používá se pro rozsah tlaků $10^{-7}–10^{-4}$ Pa. Je to standardní metoda pro kalibraci manometrů. Pracuje na principu konstantního proudu plynu. Vakuová komora je přepážkou s malým otvorem rozdělena na dvě části. Spodní komora je čerpána vývěvou s velkou čerpací rychlostí, typicky pomocí turbomolekulární

Pro velmi nízké tlaky v rozsahu $10^{-10}–10^{-6}$ Pa se využívá metoda tzv. molekulárních svazků. Aparatura se skládá ze dvou přepážek s definovanými otvory, kterým se říká clony. Musíme znát vzdálenost těchto clon, plochu otvorů těchto clon a musíme zajistit, že se částice v prostoru mezi clonami nebudou odrážet od stěn. Pak jsme schopní spočítat množství částic, které projdou první clonou, dopadnou na druhou clonu a dostanou se tak do kalibrační komůrky. Pomocí těchto údajů můžeme spočítat tlak v kalibrační komůrce.

Obrázek 4.17: Kalibrace manometrů pomocí statické expanze plynn: 1 - objem $V_1$ a tlak $p_1$, 2 - objem $V_2$ a tlak $p_2$, 3 - objem $V_3$ a tlak $p_3$, 4 - objem $V_4$ a tlak $p_4$, 5 - manometr pro referenční tlak a 6 - kalibrovaný manometr.
Obrázek 4.18: Kalibrace manometrů pomocí dynamické expanze plynů: 1 - vývěva, 2 - přepážka s malým otvorem, 3 - kalibrovaný manometr, 4 - průtokoměr, 5 - zásobník pracovního plynu.
Kapitola 5

Měření parciálních tlaků

Měření parciálních tlaků je komplexním problémem zabývajícím se rozpoznáváním poměru zbytkových plynů ve vakuovém prostoru. Zbytkové plyny nacházející se často ve vakuovém prostoru jsou například H₂, CO, Ar, N₂, O₂, CO₂, uhlovodíky, vodní pára, páry organických materiálů nebo plyny vzniklé jejich rozpadem či syntézou. Měření parciálních tlaků je analýzou těchto plynů. Absolutní metoda měření parciálních tlaků spočívá v kombinaci absolutního manometru a speciální součásti systému, která propouští pouze jeden nebo několik složek směsi plynu, např. přepážka ze speciálního materiálu (palladium zahřáté na několik set stupňů Celsia propouští pouze H₂, přepážka ze stříbra propouští O₂, křemenná přepážka propouští He). Přepážky máme k dispozici jen pro některé plyny a nelze pomocí nich měřit rychlé změny parciálních tlaků, protože mají malou vakuovou vodivost.

Další metodou je vymrazování, kdy ve vakuovém systému chladíme tzv. kondenzační stěnu, na které mohou některé plyny zkondenzovat, a pak měříme tlak plynů, které nezkondenzovaly. Tlak některých plynů čerpaných stěnou chlazenou různými kapalnými plynů je v tab. 5.1.

Nepřímé metody měření parciálních tlaků využívají k práci nepřímé manometry s přepážkou, která propouští jen některé plynů.

V současné době nejvyužívanější a nejvhodnější způsob analýzy parciálních tlaků je hmotnostní spektrometrie. Tato metoda pracuje na principu ionizace molekul analyzované směsi plynů, separace vzniklých iontů podle hmotnosti a detekci iontového proudu (viz obr. 5.1). Iontový proud pro danou molekulu je úměrný koncentraci těchto molekul a tím jejich parciálnímu tlaku ve zkoumané směsi plynů.

Princip hmotnostních spektrometrů nebo jejich součástí byl ve fyzice v minulosti již hojně zkoumán. Například Thomson v roce 1913 provedl první separaci iontů. První komerční hmotnostní spektrometr byl sestrojen v USA v roce 1943.
Tabulka 5.1: Tlak některých plynů čerpaných stěnou chlazenou různými kapalnými plyny.

<table>
<thead>
<tr>
<th>plyn</th>
<th>bod varu [K]</th>
<th>tlak čerpaného plynu [Pa]</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>He</td>
<td>4,2</td>
<td>&gt;101 000 &gt;101 000 &gt;101 000</td>
</tr>
<tr>
<td>H₂</td>
<td>20,4</td>
<td>4,6 × 10⁻⁵ 101 000 &gt;101 000</td>
</tr>
<tr>
<td>Ne</td>
<td>27,2</td>
<td>– 60000 101 000 &gt;101 000</td>
</tr>
<tr>
<td>N₂</td>
<td>77,3</td>
<td>– 3 × 10⁻⁹ 10⁻⁴ 101 000</td>
</tr>
<tr>
<td>CO</td>
<td>81,6</td>
<td>– 5 × 10⁻¹¹ 10⁻⁵ 68000</td>
</tr>
<tr>
<td>Ar</td>
<td>87,3</td>
<td>– 7 × 10⁻¹¹ 10⁻⁵ 31000</td>
</tr>
<tr>
<td>O₂</td>
<td>90,2</td>
<td>– 1,3 × 10⁻¹¹ 10⁻⁶ 24000</td>
</tr>
<tr>
<td>CH₄</td>
<td>112</td>
<td>– – 10⁻⁸ 10³</td>
</tr>
<tr>
<td>Kr</td>
<td>121</td>
<td>– – – 133</td>
</tr>
<tr>
<td>NH₃</td>
<td>140</td>
<td>– – – 10³</td>
</tr>
<tr>
<td>Xe</td>
<td>165</td>
<td>– – – 10⁻¹</td>
</tr>
<tr>
<td>CO₂</td>
<td>195</td>
<td>– – – 10⁻⁶</td>
</tr>
<tr>
<td>H₂O</td>
<td>373</td>
<td>– – – –</td>
</tr>
<tr>
<td>Hg</td>
<td>630</td>
<td>– – – –</td>
</tr>
</tbody>
</table>


Hmotnostní spektrometry dělíme do několika kategorií podle různých parametrů. Vzhledem k závislosti měření na čase dělíme spektrometry na statické a dynamické. Měření statických spektrometrů není závislé na čase, na rozdíl od těch dynamických. Podle dráhy iontů dělíme spektrometry na kruhové, cykloidální, spirálové,
KAPITOLA 5. MĚŘENÍ PARCIÁLNÍCH TLAKŮ

nebo dokonce i přímkové. Dále lze spektrometry dělit podle fyzikálního principu použitého k separaci iontů, a to na magnetické, rezonanční a průletové.

Obrázek 5.1: Schéma hmotnostního spektrometru.

Obrázek 5.2: Zdroj iontů pomocí svazku elektronů: K - žhavená katoda, A - anoda, 1, 2 - elektronová optika, 3, 4 - iontová optika.
5.1 Statické hmotnostní spektrometry s kruhovými dráhami

Statické hmotnostní spektrometry nejčastěji používají k separaci iontů magnetické pole. Dráhy iontů jsou v tomto případě kruhové nebo cykloidní. Tyto spektrometry jsou schopny měřit i malé parciální tlaky. V rámci této skupiny hmotnostních spektrometrů jsou významné spektrometry s kruhovými dráhami. Jejich princip spočívá ve změně dráhy iontů o různých hmotnostech pomocí magnetického pole, které je kolmé ke směru pohybu iontů. Sila působící na tyto ionty je úměrná rychlosti částic. Výsledkem tohoto procesu je pak separace iontů na základě jejich hmotností (viz obr. 5.3). Rychlost $v_i$ iontu s hmotností $m_0$ a nábojem $e$, který byl urychlen elektrickým polem s rozdílem potenciálů $U$, je určena rovnicí:

$$\frac{1}{2}m_0v_i^2 = eU \rightarrow v_i = \sqrt{\frac{2e}{m_0}U} \quad (5.1)$$

Na tento iont pak v magnetickém poli o indukci $B$ působí kolmo odstředivá síla:

$$\frac{m_0v_i^2}{r} = ev_iB \quad (5.2)$$

$r$ je poloměr dráhy iontů. Pro konstantní $B$ a $U$ se budou ionty s různými molekulovými hmotnostmi pohybovat po odlišných dráhách. Tohoto faktu můžeme využít pro jejich separaci. Pro konstantní $B$ a $r$ je součin $m_0U$ konstantní. Z toho vyplývá, že můžeme ionty separovat pomocí změny urychlovacího napětí $U$.  

Obrázek 5.3: Statický hmotnostní spektrometr s kruhovými dráhami: 1 - zdroj iontů, 2 - kolektor iontů.
KAPITOLA 5. MĚŘENÍ PARCIÁLNÍCH TLAKŮ

5.2 Omegatron

Jedním ze zástupců dynamických hmotnostních spektrometrů je spektrometr se spirálovou dráhou, tzv. Omegatron [4]. Ten využívá magnetické pole a k němu kolmé vysokofrekvenční elektrické pole. Ionty dané hmotnosti se pohybují po rozšiřujících se spirálách a dopadají na kolektor.

Řešením pohybových rovnic iontů, vylétajících z různých bodů osy Omegatronu, pak dostáváme rovnici trajektorie iontů:

\[ r = \frac{E_0}{B(\omega - \omega_c) \sin[\frac{1}{2}(\omega - \omega_c)\tau]} \] (5.3)

\[ r \text{ je vzdálenost iontů od osy, } B \text{ je magnetická indukce, } E_0 \text{ je amplituda intenzity elektrického pole, } \omega \text{ je úhlová frekvence elektrického pole, } \tau \text{ je čas a } \omega_c \text{ je tzv. cyklotronová frekvence, pro kterou platí:} \]

\[ \omega_c = \frac{2\pi}{\tau_c}; \quad \tau_c = \frac{2\pi r}{v}; \quad r = \frac{m_0 v}{Be} \] (5.4)

\[ v \text{ je rychlost iontu a } e \text{ je náboj iontu.} \]

Pro ionty, které jsou v rezonanci s elektrickým polem, platí \( \omega \rightarrow \omega_c \), a pak pro poloměr dráhy platí:

\[ r = \frac{1}{2} \frac{E_0}{B} \tau \] (5.5)

V tomto případě mají tedy dráhy iontů tvar rozvíjející se spirály. To znamená, že poloměr dráhy roste s časem \( \tau \) a iont odebdává z vysokofrekvenčního pole energii.

Ionty, které nejsou v rezonanci s elektrickým polem, mohou mít maximální poloměr dráhy od osy Omegatronu \( r_{\text{max}} \), pro který platí:

\[ r_{\text{max}} = \frac{E_0}{B(\omega - \omega_c)} \] (5.6)

Kolektor iontů se umisťuje do vzdálenosti větší než \( r_{\text{max}} \) od osy Omegatronu, takže na něj mohou dopadat jen ionty, které jsou v rezonanci s elektrickým polem. Změnou frekvence elektrického pole \( \omega \) můžeme získat rezonanční podmínku pro různé molekulové hmotnosti iontů plynu.

Hlavní výhodou Omegatronu je jeho malá velikost, jen několik centimetrů. Nevýhodou je jeho nepoužitelnost pro ionty s vysokým hmotnostním číslem, typicky větším než 50.
KAPITOLA 5. MĚŘENÍ PARCIÁLNÍCH TLAKŮ

Obrázek 5.4: Schéma Omegatronu: 1 - stínění, 2 - horní vysokofrekvenční elektroda, 3 - spodní vysokofrekvenční elektroda, 4 - vstupní otvor pro elektrony, 5 - výstupní otvor pro elektrony, 6 - kolektor iontů, K - katoda, A - anoda, D₁ a D₂ - elektronová optika.

5.3 Průletové hmotnostní spektrometry

Průletové hmotnostní spektrometry patří k dynamickým spektrometrům. Jejich principem je separace iontů na základě jejich rozdílných rychlostí letu. Ionty jsou urychleny stejně velkým urychlovacím napětím a v závislosti na své hmotnosti získají různě velké rychlosti. Schéma tohoto spektrometu je na obr. 5.5. Ionty jsou urychlovány krátkodobými pulzy napětí potenciálu $U$. Rychlost $v$ získaná iontem o hmotnosti $m_0$ v tomto potenciálu je dána vztahem:

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m_0}U}$$

$e$ je náboj iontu. Urychlené ionty vstupují do tzv. driftového prostoru, ve kterém dochází k rozlišení iontů na základě jejich rozdílné rychlosti. Je zřejmé, že čas průletu $\tau$ závisí na rychlosti $v$ a délce $L$ driftového prostoru podle vztahu:

$$\tau = \frac{L}{v} = L\sqrt{\frac{m_0}{2eU}}$$

Na kolektoru zaznamenáváme iontový proud v čase, částice s nižší hmotností na kolektor dopadají jako první, zatímco ionty s vysokou hmotností proletí driftovým prostorem pomaleji. Průletové hmotnostní spektrometry jsou v literatuře často uváděny pod názvem TOF nebo TOF MS spektrometry z anglického Time of Flight, Time of Flight Mass Spectrometry.
Obrázek 5.5: Průletový hmotnostní spektrometr. K ionizaci vzorku v pevném skupenství je používán laser, pro vkládání vzorků malá pomocná komora.

### 5.4 Bennettův spektrometr


Žhavená katoda emituje elektrony, ty ionizují plyn a jsou přitahovány k anodě. Vzniklé ionty jsou urychleny směrem k separátoru, který je tvořen trojicí mřížek. Tyto mřížky jsou na stejnosměrném potenciálu vůči katodě. Kromě toho je na prostřední mřížku přiváděno vysokofrekvenční napětí. Amplituda vysokofrekvenčního pole je asi desetkrát menší než urychlovací napětí mezi anodou a katodou. Ionty získávají příchozem přes mřížky energii. Nejvyšší energii získají ty ionty, které procházejí prostřední mřížkou v okamžiku, kdy pole mění svůj směr (ionty pak odebírají energii v obou půlperiodách). Rovnice Bennettova spektrometru má následující tvar:

\[
M = \frac{0.266 \times 10^{12} U}{s^2 f^2}
\]  

(5.9)
U [V] je určovací napětí mezi anodou a katodou, s [cm] je vzdálenost jednotlivých mřížek od sebe, f [Hz] je frekvence vysokofrekvenčního pole a M je molekulární hmotnost iontu. Přírůstek energie iontů na počet cyklů vysokofrekvenčního pole Č při pohybu mezi mřížkami má maximum pro Č = 0,74 cyklu. Mezi poslední mřížku a kolektor přivedeme brzdný potenciál o takové velikosti, aby jej překonal pouze ionty s nejvyšším přírůstkem energie. Pak na kolektor dopadou pouze ionty s určitou hmotností vyhovující rovnici Bennetova spektrometru.

Obrázek 5.6: Bennettův spektrometr: K - katoda, A - anoda, C - kolektor iontů a \( g_1, g_2, g_3 \) - mřížky separátoru iontů.

5.5 Kvadrupólový spektrometr

Jeden z nejpoužívanějších spektrometrů současnosti je kvadrupólový spektrometr (viz obr. 5.7). Skládá se z iontového zdroje, vstupní štěrbiny, separátoru, výstupní štěrbiny a kolektoru iontů. Často se používá i zesilovač iontového proudu.

Pro tento spektrometr je charakteristický především separátor tvořený čtyřmi rovnoběžnými kovovými válcovými elektrodami. Ty jsou napájeny kombinací stej-
KAPITOLA 5. MĚŘENÍ PARCIÁLNÍCH TLAKŮ

nosměrného a střídavého napětí. V ideálním případě by tyto elektrody měly být hyperbolického profilu. V minulosti bylo empiricky zjištěno, že při vhodné volbě poloměrů těchto válcových tyčí a jejich vzájemné vzdálenosti vznikne poblíž osy z žádané hyperbolické pole, které zapříčiní správný pohyb iontů.

Obrázek 5.7: Kvadrupolový spektrometr: a) celkové schéma, 1, 2 - iontová optika, Z - zdroj iontů, C - separátor iontů, K - kolektor iontů, b) boční pohled na separátor.

Obrázek 5.8: Kvadrupolový spektrometr: souřadnicový systém pro odvození funkce separátoru.

Funkci tohoto separátoru lze odvodit [12]. Zvolíme si souřadnicový systém
KAPITOLA 5. MĚŘENÍ PARCIÁLNÍCH TLAKŮ

(viz obr. 5.8). Pro potenciál \( \phi(t, x, y, z) \) můžeme obecně napsat rovnici

\[
\phi(t, x, y, z) = V_0(t)(\alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2)
\]  
(5.10)

Z Laplaceovy rovnice \( (\Delta \phi = 0) \) vyplývá podmínka \( \alpha + \beta + \gamma = 0 \), která je v tomto případě splněna jako

\[
\alpha = -\beta = \frac{1}{r_0^2}, \quad \gamma = 0
\]  
(5.11)

Vložíme-li na elektrody kvadrupolového systému stejnoměrné napětí \( 2U \) a střídavé napětí \( 2V \cos \omega t \), pak pro prostorový časový průběh potenciálu \( \phi(t, x, y, z) \) dostáváme

\[
\phi(t, x, y, z) = (U + V \cos \omega t)\frac{x^2 - y^2}{r_0^2}
\]  
(5.12)

Složky elektrického pole ve směru osy \( x \) a \( y \) dostáváme jako záporně vzáte parciální derivace potenciálu \( \phi(t, x, y, z) \) podle souřadnic \( x \) a \( y \).

\[
E_x = -2(U + V \cos \omega t)\frac{x}{r_0^2}, \quad E_y = 2(U + V \cos \omega t)\frac{y}{r_0^2}
\]  
(5.13)

Z toho pak pohybové rovnice pro ionty jsou

\[
m \frac{d^2x}{dt^2} = -2e(U + V \cos \omega t)\frac{x}{r_0^2}
\]  
(5.14)

\[
m \frac{d^2y}{dt^2} = 2e(U + V \cos \omega t)\frac{y}{r_0^2}
\]  
(5.15)

\[
m \frac{d^2z}{dt^2} = 0
\]  
(5.16)

Z těchto rovnic přímo vyplývá \( \frac{dz}{dt} = \text{konst.} \), což znamená, že ionty se budou pohybovat ve směru osy \( z \) počáteční rychlostí. Dále pak zavedeme pro výše uvedené rovnice substituci ve tvaru

\[
\omega t = 2\epsilon, \quad a = \frac{8eU}{mr_0^2\omega^2}, \quad q = \frac{4eV}{mr_0^2\omega^2}
\]  
(5.17)

Pohybové rovnice pro \( x \) a \( y \) poté přejdou na zjednodušený tvar

\[
\frac{d^2x}{d\epsilon^2} + (a + 2q \cos 2\epsilon)x = 0
\]  
(5.18)

\[
\frac{d^2y}{d\epsilon^2} - (a + 2q \cos 2\epsilon)y = 0
\]  
(5.19)

Toto jsou tzv. Mathieuovy diferenciální rovnice s periodickými koeficienty. Řešení se hledá ve tvaru nekonečných řad. Dvěma druhům řešení (stabilnímu a nestabilnímu
viz obr. 5.9) odpovídají dva druhy trajektorií iontů, a to stabilní a nestabilní. Ionty s nestabilními trajektoriemi budou vykonávat translační pohyb ve směru osy $z$ a přícennými oscilacemi v rovině $xy$, jejichž amplituda bude exponenciálně s časem narůstat. Po několika oscilačních pohybech pak iont dopadne na jednu ze čtyř elektrod a tím se neutralizuje. Ionty se stabilními dráhami budou také vykonávat oscilační pohyb v rovině $xy$, avšak amplituda těchto oscilací nepřekročí velikost $r_0$ a ionty tedy mohou dopadnout na kolektor.

Obrázek 5.9: Stabilní a nestabilní řešení pro kvadrupolový spektrometr: P - pracovní přímk.

Pro pevné hodnoty $r_0$, $U$ a $V$ bude všem iontům se stejnou hmotností odpovídat jeden pracovní bod $(a, q)$. Poměr $\frac{a}{q}$ odpovídá poměru amplitud stejnosměrného a střídavého napětí takto $\frac{a}{q} = 2\frac{V}{U}$. Tento poměr je nezávislý na hmotnosti iontů. To znamená, že pracovní body iontů různých hmotností budou ležet na společné pracovní přímce, která prochází počátkem souřadnicové soustavy a jejíž směrnice je závislá na $\frac{U}{V}$. Ionty, jejichž pracovní bod leží na tomto úseku přímky, uvnitř stabilní oblasti, se budou pohybovat po omezených dráhách a dopadnou na kolektor. Sklonem pracovní přímky můžeme tento úsek zvětšovat nebo zmenšovat. Pro hodnoty

$$\frac{U}{V} = 0,168; \quad a_0 = 0,237; \quad q_0 = 0,706$$

(5.20)
pracovní přímka prochází vrcholem stabilní oblasti, což znamená, že na kolektor dopadnou ionty pouze s jednou hmotností. Rovnice kvadrupolového spektrometru je pak ve tvaru

\[
\frac{m}{e} = \frac{4V}{q_0 \omega^2 r_0^2}
\]  

(5.21)

Kapitola 6

Hledání vakuových netěsností

Jestliže se v uzavřeném vakuovém systému odděleném od vývěvy zhoršuje vakuum, tedy roste tlak, pak lze očekávat, že v systému se nachází netěsnost [13]. Pokud nelze v systému i za stálé funkce vývěvy dosáhnout požadovaného tlaku za očekávanou dobu, pak opět můžeme předpokládat netěsnost ve vakuovém systému. Existují dva druhy netěsností, skutečné a virtuální. Skutečná netěsnost je způsobena nějakou vadou, přičemž se může jednat o trhlinu ve stěně, nevyhovující těsnící prvek nebo jinou reálnou příčinou. Pojem virtuální netěsnost se označuje narušení vakua například intenzivní desorpcí plynu z vnitřních stěn vakuové komory. Virtuální netěsnosti se můžeme zbavit odplyněním vakuového systému, nebo dlouhodobým čerpáním. Skutečnou netěsnost musíme najít a opravit. Dále se budeme zabývat jen skutečnými netěsnostmi.

U skleněných vakuových aparatur se netěsnosti objevují nejčastěji v místech spojů, svárů, zátažů kovu do skla, ventilů nebo zábrusů. U kovových aparatur se mohou netěsnosti kromě vyjmenovaných míst vyskytovat v různých částech celého vakuového systému z důvodu porozity samotného kovového materiálu. Hledání netěsností ve vakuových systémech je tedy důležitou oblastí součástí vakuové fyziky. V současné době jsou k tomuto úkolu používány různé specializované hledače vakuových netěsností. Drtivá většina současných metod pro nalezení vakuových netěsností je založena na hmotnostní spektrometrii. K hledání netěsností se využívá tzv. zkušební plynu a měří se změna parciálního tlaku tohoto plynu. Jako zkušební plyn je nejčastěji používán plyn, který je jen v malém množství obsažen v atmosféře, snadno proniká netěsností do vakuového systému a má, pokud možno, nízkou molekulovou hmotnost. Nejčastěji se k tomuto účelu používá helium a vodík.

Na přesnost určení velikosti netěsností mají vliv především faktory jako je množství zkušebního plynu přivedeného do systému, vakuová vodivost netěsnosti, viskozita plynu, citlivost samotného hledače a poloha netěsnosti ve vztahu k hledači.
Mezi další faktory pak patří poměr čerpací rychlosti vakuového systému a jeho objemu.

Pro hledání vakuových netěsností se nejčastěji používají dva způsoby tzv. čichací mód a vakuový mód. Čichací mód spočívá v naplnění zkoumané aparatury zkušebním plynem tak, aby aparatura byla v mírném přetlaku. Následně zkoumáme aparaturu na místo úniku zkušebního plynu pomocí detektoru tohoto plynu.

Principem vakuového módu je připojení detektoru zkušebního plynu přímo k vakuovému systému. Testovaný systém pak neustále čerpáváme a kolem aparatury, především u kritických míst, vypouštíme zkušební plyn. Postupně sledujeme údaje detektoru, jak se mění parciální tlak testovacího plynu. Vakuový mód dokáže najít menší netěsnosti než čichací mód.

Nejpoužívanější hledače netěsností jsou halogenový, vodíkový a heliový hledač. Porovnání citlivostí různých hledačů a metod hledání netěsností pro čichací mód je v tab. 6.1, pro vakuový mód potom v tab. 6.2.

Tabulka 6.1: Citlivost metod hledání netěsností pro čichací mód a přetlak.

<table>
<thead>
<tr>
<th>metoda</th>
<th>tlak [Pa]</th>
<th>min. netěsnost [Pa m³s⁻¹]</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>bublinky ve vodě</td>
<td>2 × 10⁵</td>
<td>10⁻⁷</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>4 × 10⁵</td>
<td>10⁻⁸</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>9 × 10⁵</td>
<td>10⁻⁹</td>
</tr>
<tr>
<td>halogenový hledač</td>
<td>2 × 10⁵</td>
<td>3 × 10⁻⁸</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>4 × 10⁵</td>
<td>7 × 10⁻⁹</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>6 × 10⁵</td>
<td>3 × 10⁻⁹</td>
</tr>
<tr>
<td>heliový hledač</td>
<td>2 × 10⁵</td>
<td>5 × 10⁻⁹</td>
</tr>
</tbody>
</table>
Tabulka 6.2: Citlivost metod hledání netěsností - vakuový mód.

<table>
<thead>
<tr>
<th>metoda</th>
<th>tlak [Pa]</th>
<th>min. netěsnost [Pa m³s⁻¹]</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>ionizační manometr dif. zap.</td>
<td>10⁻⁶–10⁻¹</td>
<td>10⁻¹⁰</td>
</tr>
<tr>
<td>ionizační manometr s palladiovou membránou</td>
<td>10⁻⁶–10⁻¹</td>
<td>10⁻⁸</td>
</tr>
<tr>
<td>halogenový hledač</td>
<td>10⁻⁴–10⁵</td>
<td>10⁻⁸</td>
</tr>
<tr>
<td>heliový hledač</td>
<td>&lt; 10⁻²</td>
<td>10⁻¹³</td>
</tr>
</tbody>
</table>

6.1 Halogenový hledač


6.2 Vodíkový hledač

Vodíkový hledač jako zkušební plyn používá vodík. V minulosti se používal ionizační manometr se žhavenou katodou s palladiovou přepážkou, která propouští jen vodík. Dnes se používají hmotnostní spektrometry, anebo polovodičové detektory vodíku.

Schéma ionizačního manometru s palladiovou přepážkou je na obr. 6.2. Palladiová přepážka je využita jako anoda a je zahřívána dopadem elektronů. Tato přepážka zároveň odděluje prostor manometru od zkoumaného systému. Zahřáté palladium velmi dobře propouští vodík. Přítomnost vodíku v manometru se projeví zvýšením iontového proudu v obvodu kolektoru.

Obrázek 6.2: Vodíkový hledač netěsností s palladiovou přepážkou: 1, 2 - ventil, 3 - testovaný vakuový prvek, 4 - palladiová přepážka, 5 - zvon pro napouštění vodíku a 6 - připojení testovaného prvku k manometru.
KAPITOLA 6. HLEDÁNÍ VAKUOVÝCH NETĚSNOSTÍ

6.3 Heliový hledač

Heliový hledač netěsností je častým a užívaným způsobem hledání vakuových netěsností v moderní vakuové technice. Většina hledačů je schopna pracovat v obou módch, čichacím i vakuovém. Základním prvkem celého detekčního systému je heliový detektor pracující na principu hmotnostního spektrometru, který je optimalizován pro detekci molekul helia. Některé speciální modely hledačů využívají i tenké přepážky z křemenného skla, které propouští helium, a jako detektor používají manometr.

Schéma heliového hledače netěsností je na obr. 6.3. Hledač obsahuje vlastní čerpační systém, ventily pro připojování testovaného systému, vývěv a hmotnostní spektrometr jako detektor helia. Hmotnostní spektrometr zpravidla měří jen do hmotového čísla 4, které má helium. Heliový hledač ve vakuovém módě připojíme k testovanému prvku, nebo vakuovému systému, který vyčerpáme, a začneme ho zvenku ofukovat heliem. Pokud je v systému netěsnost, helium bude difundovat přes turbo-molekulární vývěv a z do hmotnostního spektrometru. Využíváme toho, že turbo-molekulární vývěva má malou čerpační rychlost pro helium.

Systém ventilů a bočních větví slouží přede vším ke zvýšení citlivosti měření. Speciálně navržená elektronika kontroluje tlak v různých větvích hledače a otevírá ventily tak, aby bylo dosaženo maximální citlivosti.

Na tomto schématu (obr. 6.3) je pak také zobrazena možnost zapojení tohoto hledače v čichacím módě. Zkoumanou komoru bychom v tomto případě oddělili od hledače a napustili do ní helium tak, aby tlak v aparatuře překročil tlak atmosférický. Samotnou čichací sondu (kapiláru) bychom pak zapojili na speciální vstup hledače.

Součástí většiny heliových hledačů netěsností je i kalibrovaná vakuová netěsnost. Její možné konstrukční provedení je na obr. 6.4. Kalibrovaná netěsnost je mutná pro kalibraci hledače, abychom dokázali určit nejen místo, kde je netěsnost, ale i jak velká je to netěsnost.
Obrázek 6.3: Heliový hledač netěsností: 1 - připojení testovaného systému, 2 - hmotnostní spektrometr, 3 - turbomolekulární vývěva, 4 - předčerpávací vývěva, 5 - kalibrovaná vakuová netěsnost, 6 - manometr a 7 - připojení čichací sondy.
Obrázek 6.4: Kalibrovaná vakuová netěsnost: a) netěsnost s kapilárou, b) netěsnost s přepážkou z křemenného skla, 1 - připojení k hledací netěsnosti, 2 - prvek s velmi malou vakuovou vodivostí pro helium (tenká kapilára, přepážka z křemenného skla) a 3 - zásobník s heliem.
6.4 Další metody hledání netěsností ve vakuové technice

Za dlouhou historii vakuové fyziky bylo vynalezeno a vyzkoušeno mnoho jednoduchých i sofistikovaných metod na odhalení vakuových netěsností. Jednou z nich je například metoda používající mýdlové bublinky, nebo bublinky unikající do kapaliny (viz obr. 6.5). Tato metoda je vhodná pro hledání větších netěsností.

U skleněných vakuových aparatur a dílů, které se v minulosti často ve vakuové fyzice používaly, můžeme využít metody doutnavého a jiskrového výboje. Princip spočívá v tom, že se pomocí velké intenzity elektrického pole zapálí výboj v kanálu, který tvoří vakuovou netěsnost.

Další užívanou metodou je hledání netěsností pomocí diferenciálního zapojení manometrů, viz obr. 6.6. Tento systém se zpravidla skládá ze dvou tepelných, nebo ionizačních manometrů zapojených do odporového můstku. Před jeden manometr se umístí vymrazovačka, která má dostatečně nízkou teplotu pro kondenzaci testovacího plynu. Pokud v systému není netěsnost, tak oba manometry budou ukazovat stejný tlak a můstek bude vyvážený. Pokud začne vakuovou netěsnost proutit do aparatury testovacího plynu, tak manometr, před kterým je vymrazovačka, bude měřit nižší tlak a odporový můstek nebude vyvážený. Díky tomu můžeme detekovat místo i velikost netěsnosti.

Obrázek 6.5: Bublinková metoda, plyn s tlakem $p$ ve vakuovém systému prochází netěsností s průměrem $d$ a vytváří bublinku v kapalině.

82
Obrázek 6.6: Hledání netěsností pomocí diferenciálního zapojení dvou Piraniho manometrů: 1 - vakuová komora, 2 - netěsnost, 3 - Piraniho manometr bez vymrazovačky, 4 - Piraniho manometr s vymrazovačkou a 5 - vymrazovačka.

6.5 Metody hledání netěsností v průmyslu

V průmyslových podmínkách je často využíváno kombinace různých výše zmíněných technik za použití širokého spektra detektorů. Jako testovací plyn se používá heliun i vodík. O vhodné volbě metody hledání netěsností rozhodují okolnosti, a to jestli potřebujeme znát přesnou polohu netěsnosti, nebo pouze informaci, zda je nějaký prvek dostatečně těsný. V průmyslu jsou dle norem předepsána různá kritéria netěsnosti pro jednotlivé prvky a objekty, viz tab. 6.3 a tab. 6.4.

KAPITOLA 6. HLEDÁNÍ VAKUOVÝCH NETĚSNOSTÍ

Obrázek 6.7: Hledání netěsností: a) čichací mód, b) vakuový mód.

Obrázek 6.8: Hledání netěsností: a) integrální vakuový test, b) integrální čichací test.
Obrázek 6.9: Hledání netěsností: a) integrální čichací test za atmosférického tlaku, b) bombový test.

Tabulka 6.3: Kritéria pro netěsnosti.

<table>
<thead>
<tr>
<th>Název kritéria</th>
<th>[Pa m³s⁻¹]</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>vodotěsnost</td>
<td>10⁻³</td>
</tr>
<tr>
<td>parotěsnost</td>
<td>10⁻⁴</td>
</tr>
<tr>
<td>těsnost pro bakterie</td>
<td>10⁻⁵</td>
</tr>
<tr>
<td>těsnost pro ropné produkty</td>
<td>10⁻⁶</td>
</tr>
<tr>
<td>těsnost pro viry</td>
<td>10⁻⁷</td>
</tr>
<tr>
<td>plynotěsnost</td>
<td>10⁻⁸</td>
</tr>
</tbody>
</table>
Tabulka 6.4: Kritéria netěsností pro různé objekty a prvky.

<table>
<thead>
<tr>
<th>Název kritéria podle objektu</th>
<th>[Pa m³s⁻¹]</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>těsnost nádrží a potrubí</td>
<td>$10^{-1}$–$10^{-3}$</td>
</tr>
<tr>
<td>těsnost výměníků tepla</td>
<td>$10^{-4}$</td>
</tr>
<tr>
<td>těsnost nádob pro zkopalněné plyny</td>
<td>$10^{-6}$</td>
</tr>
<tr>
<td>těsnost elektronických součástek</td>
<td>$10^{-10}$</td>
</tr>
<tr>
<td>těsnost pouzdra baterie kardiostimulátoru</td>
<td>min. $10^{-10}$</td>
</tr>
</tbody>
</table>
Kapitola 7

Dodatky

7.1 Vakuové značky

Tabulka 7.1: Značky pro vakuové prvky ve schématech [1].
KAPITOLA 7. DODATKY

rotační lopatková vývěva  
pištová vývěva  
vodokružní vývěva

sublimační vývěva  
průtokoměr  
manometr

rozebíratelný spoj  
flexibilní spoj  
vymrazovačka

vakuová komora  
ventil - obecný symbol  
deskový ventil

ventil ovládaný ručně  
pneumatický ventil  
elektromagnetický ventil

Tabulka 7.2: Značky pro vakuové prvky ve schématech [1].
7.2 Fyzikální konstanty

náboj elektronu \( e = 1,602177 \times 10^{-19} \) C

hmotnost elektronu \( m_e = 9,109389 \times 10^{-31} \) kg

hmotnost protonu \( m_p = 1,672623 \times 10^{-27} \) kg

měrný náboj elektronu \( e/m_e = 1,758819 \times 10^{11} \) C kg\(^{-1}\)

atomová hmotnostní jednotka \( m_u = 1,660539 \times 10^{-27} \) kg

univerzální plynová konstanta \( R = 8,314510 \) J mol\(^{-1}\) K\(^{-1}\)

Planckova konstanta \( h = 6,626075 \times 10^{-34} \) J s

Stefanova–Boltzmannova konstanta \( \sigma = 5,67051 \times 10^{-8} \) W m\(^{-2}\) K\(^{-4}\)

Boltzmannova konstanta \( k = 1,380658 \times 10^{-23} \) J K\(^{-1}\)

Avogadrova konstanta \( N_A = 6,022136 \times 10^{23} \) mol\(^{-1}\)

permitivita vakua \( \epsilon_0 = 8,854187 \times 10^{-12} \) F m\(^{-1}\)

permeabilita vakua \( \mu_0 = 1,256637 \times 10^{-6} \) H m\(^{-1}\)
Seznam obrázků

2.1 Maxwellovo rozdělení rychlostí pro dusík a teplotu 300 K. ............... 13
2.2 Maxwellovo rozdělení rychlostí pro různé plyny. ......................... 14
2.3 Maxwellovo rozdělení rychlostí pro různé teploty. .................... 14
2.4 Rozdělení pravděpodobnosti směrů rychlostí částic odražených od povrchu. ............................................................ 20

3.1 Vodní vývěva: 1 - čerpaný plyn, 2 - vstup pro vodu a 3 - výstup vývěvy. 27
3.2 Vodokružní vývěva: 1 - rotor, 2 - vstup a 3 - výstup vývěvy. ............. 28
3.3 Pístová vývěva: 1 - píst, 2 - vstup, 3 - výstup, 4 - vstupní ventil, 5 - výstupní ventil. ................................................................. 29
3.4 Membránová vývěva: 1 - pružná membrána, 2 - vstup, 3 - výstup, 4 - vstupní ventil, 5 - výstupní ventil. ............................... 30
3.5 Schéma rotační olejové vývěvy: 1 - rotor, 2 - lopatka rotoru, 3 - stator, 4 - sání plynu, 5 - výstup plynu, výstupní ventil, 6 - vývěva, 7 - pružina, 8 - olej a 9 - výstupní ventil. ........................................ 31
3.6 Škodlivý prostor v rotační olejové vývěvě se nejčastěji nachází v blízkosti výstupního kanálu: 1 - škodlivý prostor, 2 - stator, 3 - styk rotoru a statoru, 4 - rotor a 5 - lopatka rotoru. ................................. 32
3.7 Konstrukce a princip Scroll vývěvy: stator - černá barva, rotor - červená barva, čerpaný plyn - zelená barva. ................................. 32
3.8 Rootsova vývěva. ................................................................. 33
3.9 Difuzní vývěva: stěna vývěvy je z vnějšího chlazená vodou. ............ 34
3.10 Molekulární vývěva. ......................................................... 35
3.11 Turbomolekulární vývěva - horizontální uspořádání: 1 - rotor, 2 - vstup a 3 - výstup. ................................................................. 36
3.12 Turbomolekulární vývěva - vertikální uspořádání: 1 - rotor, 2 - vstup a 3 - výstup. .......................... 36
3.13 Turbomolekulární vývěva - detail lopatek: rotor - hnědá barva a stator - modrá barva. .......................... 37
3.14 Čerpací rychlost turbomolekulární vývěvy pro dusík vztavená na jednotku plochy rotoru v závislosti na střední obvodové rychlosti rotoru. 37

4.1 Přibližný pracovní rozsah různých typů manometrů. ................. 41
4.2 U-manometry: a) otevřený U-manometr, b) uzavřený U-manometr, c) šikmý uzavřený U-manometr. .................. 43
4.3 McLeodův manometr: a) manometr spojený s komorou s měřeným tlakem, b) po kompresi plynu do měřicí kapiláry. .................. 44
4.4 Membránový manometr: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - membrána a 3 - mechanický ukazatel se stupnicí. .................. 46
4.5 Trubíčkový manometr: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - Bourdonova trubice a 3 - mechanický ukazatel se stupnicí. ........... 46
4.6 Vlnovcový manometr: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - pružný vlincovec a 3 - mechanický ukazatel se stupnicí. ........... 47
4.7 Kapacitní manometr: 1 - prostor s měřeným tlakem, 2 - komůrka s referenčním tlakem a 3 - elektronika pro měření kapacity. ........... 48
4.8 Piezo manometr: 1 - prostor s měřeným tlakem, 2 - komůrka s referenčním tlakem a 3 - elektronika pro piezo prvek. ........... 49
4.9 Pirаниho manometr: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - tenké kovové vlákno a 3 - elektrické průchodky. .................. 51
4.10 Termočlánkový manometr: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - termočlánek a 3 - vyhřívané vlákno. .................. 52
4.11 Termistorový manometr: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - termistor a 3 - elektrické průchodky. .................. 53
4.12 Viskozní manometr s rotující kuličkou: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - rotující kulička, 3 - permanentní magnety a 4 - cívky elektromagnetů. 54
4.13 Penningův ionizační manometr se studenou katodou: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - anoda, 3 - katoda a 4 - permanentní magnet. ....... 55
4.14 Ionizační manometr se studenou katodou, konfigurace inverzní magnetron: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - anoda, 3 - válcová katoda a 4 - permanentní magnet. ........... 56
4.15 Ionizační manometr se žhavenou katodou: 1 - žhavená katoda jako zdroj elektronů, 2 - anoda a 3 - kolektor. 59
4.16 Ionizační manometr se žhavenou katodou, konfigurace Bayard–Alpert: 1 - žhavená katoda, 2 - anoda a 3 - kolektor. 60
4.17 Kalibrace manometrů pomocí statické expanze plynu: 1 - objem $V_1$ a tlak $p_1$, 2 - objem $V_2$ a tlak $p_2$, 3 - objem $V_3$ a tlak $p_3$, 4 - objem $V_4$ a tlak $p_4$, 5 - manometr pro referenční tlak a 6 - kalibrovaný manometr. 61
4.18 Kalibrace manometrů pomocí dynamické expanze plynu: 1 - vývěva, 2 - přepážka s malým otvorem, 3 - kalibrovaný manometr, 4 - průtokoměr, 5 - zásobník pracovního plynu. 62

5.1 Schéma hmotnostního spektrometru. 65
5.2 Zdroj iontů pomocí svazku elektronů: K - žhavená katoda, A - anoda, 1, 2 - elektronová optika, 3, 4 - iontová optika. 65
5.3 Statický hmotnostní spektrometr s kruhovými drahami: 1 - zdroj iontů, 2 - kolektor iontů. 66
5.4 Schéma Omegatronu: 1 - stínění, 2 - horní vysokofrekvenční elektroda, 3 - spodní vysokofrekvenční elektroda, 4 - vstupní otvor pro elektrony, 5 - výstupní otvor pro elektrony, 6 - kolektor iontů, K - katoda, A - anoda, $D_1$ a $D_2$ - elektronová optika. 68
5.5 Průletový hmotnostní spektrometr. K ionizaci vzorku v pevném skupenství je používán laser, pro vkládání vzorků malá pomocná komora. 69
5.6 Bennettův spektrometr: K - katoda, A - anoda, C - kolektor iontů a $g_1$, $g_2$, $g_3$ - mřížky separátoru iontů. 70
5.7 Kvadrupolový spektrometr: a) celkové schéma, 1, 2 - iontová optika, Z - zdroj iontů, C - separátor iontů, K - kolektor iontů, b) boční pohled na separátor. 71
5.8 Kvadrupolový spektrometr: souřadnicový systém pro odvození funkce separátoru. 71
5.9 Stabilní a nestabilní řešení pro kvadrupolový spektrometr: P - pracovní přímk. 73

6.1 Halogenový hledač netěsností v čichacím módu: A - anoda, K - katoda. 77
6.2 Vodíkový hledač netěsností s palladiovou přepážkou: 1 - ventil, 3 - testovaný vakuový prvek, 4 - palladiová přepážka, 5 - zvon pro napouštění vodíku a 6 - připojení testovaného prvku k manometru. 78
6.3 Heliový hledač netěsností: 1 - připojení testovaného systému, 2 - hmotnostní spektrometr, 3 - turbomolekulární vývěva, 4 - předčerpávací vývěva, 5 - kalibrovaná vakuová netěsnost, 6 - manometr a 7 - připojení čichací sondy. 80

6.4 Kalibrovaná vakuová netěsnost: a) netěsnost s kapilárou, b) netěsnost s přepážkou z křemenného skla, 1 - připojení k hledači netěsností, 2 - prvek s velmi malou vakuovou vodivostí pro helium (tenká kapilára, přepážka z křemenného skla) a 3 - zásobník s heliem. 81

6.5 Bublinková metoda, plyn s tlakem \( p \) ve vakuovém systému prochází netěsností s průměrem \( d \) a vytváří bublinku v kapalině. 82

6.6 Hledání netěsností pomocí diferenciálního zapojení dvou Piraniho manometrů: 1 - vakuová komora, 2 - netěsnost, 3 - Piraniho manometr bez vymrazovačky, 4 - Piraniho manometr s vymrazovačkou a 5 - vymrazovačka. 83

6.7 Hledání netěsností: a) čichací mód, b) vakuový mód. 84

6.8 Hledání netěsností: a) integrální vakuový test, b) integrální čichací test. 84

6.9 Hledání netěsností: a) integrální čichací test za atmosférického tlaku, b) bombový test. 85
Seznam tabulek

1.1 Závislost tlaku vzduchu na nadmořské výšce [4] ...................... 3

2.1 Efektivní průměr některých atomů a molekul ......................... 16
2.2 Sutherlandova konstanta pro různé plyny ......................... 16
2.3 Koeficient samodifuze různých plynů pro normální podmínky .... 17
2.4 Koeficient difuze pro různé plyny (malá koncentrace) ve vzduchu a ve vodíku pro normální podmínky [3] ....................... 17
2.5 Rozdělení vakua, $n$ je koncentrace částic a $\lambda$ je střední volná dráha. 25

4.1 Přehled manometrů pro měření celkových tlaků .......................... 40
4.2 Maximální hodnota koeficientu specifické ionizace $\epsilon$ pro různé plyny a optimální urychlovací napětí elektronů .............. 59

5.1 Tlak některých plynů čerpaných stěnou chlazenou různými kapalnými plyny .................................................. 64

6.1 Citlivost metod hledání netěsností pro čichací módu a přetlak .... 76
6.2 Citlivost metod hledání netěsností - vakuový mód .................. 77
6.3 Kritéria pro netěsnosti ....................................................... 85
6.4 Kritéria netěsností pro různé objekty a prvky ...................... 86

7.1 Značky pro vakuové prvky ve schématech [1] ...................... 87
7.2 Značky pro vakuové prvky ve schématech [1] ...................... 88

94
Literatura


