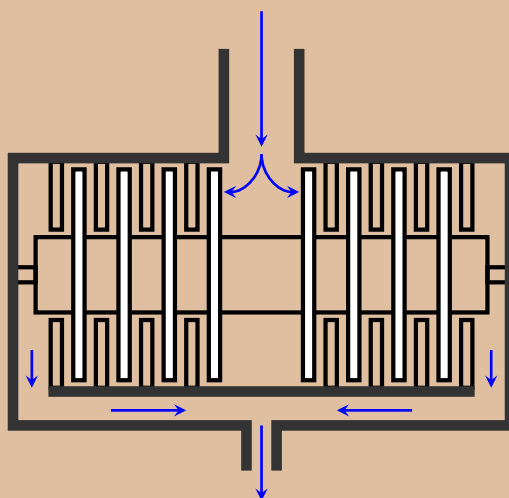


Vakuová fyzika 1

Pavel Slavíček
Vlasta Štěpánová
Jakub Kelar



Masarykova univerzita

Masarykova univerzita
Přírodovědecká fakulta
Ústav fyzikální elektroniky

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 Janě Jurmanové za cenné připomínky a rady k textu těchto skript.

Sazba programem L^AT_EX, obrázky byly vytvořeny pomocí programů Gnuplot, Xfig,
QTikZ a Google Drawings.

© 2016 Pavel Slavíček, Vlasta Štěpánová, Jakub Kelar

© 2016 Masarykova univerzita

ISBN 978-80-210-8473-5

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 Plyny 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 Plyny 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 Plyny ve vakuovém systému	20
2.3.1 Odraz částic od stěny	20

2.3.2	Koeficient akomodace	20
2.3.3	Vakuová vodivost	21
2.3.4	Mezní tlak	23
2.3.5	Čerpací rychlost	24
2.4	Rozdělení vakua	25
3	Vakuové vývěvy	26
3.1	Vodní vývěva	26
3.2	Vodokružní vývěva	27
3.3	Pístová vývěva	28
3.4	Membránová vývěva	29
3.5	Rotační olejová vývěva	30
3.6	Scroll vývěva	32
3.7	Rootsova vývěva	33
3.8	Difuzní vývěva	33
3.9	Molekulární vývěva	34
3.10	Turbomolekulární vývěva	35
3.11	Zamezení vniku par do čerpaného prostoru	38
4	Manometry	39
4.1	Kapalinové U-manometry	41
4.1.1	Otevřený U-manometr	42
4.1.2	Uzavřený U-manometr	42
4.1.3	Šikmý uzavřený U-manometr	42
4.2	McLeodův kompresní manometr	43
4.3	Mechanické manometry	45
4.3.1	Membránové manometry	45
4.3.2	Trubičkové manometry	45
4.3.3	Vlnovcové manometry	47
4.4	Kapacitní manometry	47

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	Dilatační manometry	52
4.7	Viskózní manometry	53
4.7.1	Viskózní manometr s rotujícím kotoučem	53
4.7.2	Viskózní 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	Kvadrupólový 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 nezabývají sorbovanými plyny ve vakuové fyzice, tomuto tématu se věnuje přednáška F6450 Vakuová fyzika 2.

Skripta obsahují celkem sedm kapitol. První kapitola se věnuje úvodu do předmětu, stručné historii vakuové techniky a významu a využití vakua v různých průmyslových odvětvích a vědeckých oblastech. Druhá kapitola se stručně zabývá teoretickými základy vakuové fyziky, zejména tzv. volných plynů a vakuové vodivosti. Jsou v ní uvedeny definice a vztahy různých vakuových veličin. Další kapitola je věnována základním typům vakuových vývěv. Jsou zde popsány jejich vlastnosti, konstrukční řešení a pracovní rozsah tlaků. Čtvrtá kapitola se věnuje metodám měření nízkých tlaků, popisuje základní typy manometrů, jejich měřicí rozsah a provozní vlastnosti. Pátá kapitola je zaměřena na měření parciálních tlaků, zejména se věnuje vybraným typům hmotnostních spektrometrů. Šestá kapitola se zaměřuje na problematiku hledání netěsností ve vakuových systémech. Jsou v ní popsány tři základní hledače netěsností: halogenový, vodíkový a heliový. Poslední kapitolu tvoří dodatky, které obsahují značky vakuových prvků používaných ve schématech, a fyzikální konstanty.

Kapitola 1

Úvod do předmětu

1.1 Vakuová fyzika

Vakuum 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 plynou fází a ostatními fázemi látek. Vakuová technika se zabývá tím, jak získat a změřit nízké tlaky. Vakuová technologie se věnuje nejvýhodnějším 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]. Materiálům používaným ve vakuové technice se věnují publikace [6, 7].

Vakuum 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.

Tabulka 1.1: Závislost tlaku vzduchu na nadmořské výšce [4].

výška [km]	tlak [Pa]
0	10^5
11	10^4
50	10^0
100	10^{-1}
200	10^{-4}
500	10^{-6}
1000	10^{-8}
2000	10^{-13}

1.2 Historický vývoj

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

Pojmenování vakuum je odvozeno z latinského *vacuus*, což znamená prázdný. V praxi lze vakuum popsat jako prostor, ve kterém je podstatně nižší tlak plynu než v prostoru za normálního atmosférického tlaku. Vakuum bylo objeveno italským fyzikem **Janem Evangelistou Torricellim** v roce 1643. Torricelli prováděl experimenty se rtutí ve skleněné trubici s jedním uzavřeným koncem. Vypozoroval, že výška barometrického sloupce se mění s nadmořskou výškou místa pozorování. Je považován za vynálezce prvního barometru a je po něm pojmenována také jednotka tlaku Torr ($1 \text{ torr} = 133,3 \text{ Pa}$).

V roce 1654 provedl **Otto von Guericke**, německý fyzik a zároveň starosta Magdeburgu, experiment nazvaný Magdeburgské polokoule. Jednalo se o demonstraci vakua a důkaz existence zemské atmosféry [5]. Spojil k sobě dvě duté měděné polokoule o průměru asi půl metru a vyčerpал z nich vzduch pomocí vývěvy s dřevěným pístem a válcem těsněným vodou. Poté byly ke každé polokouli připoutány 4 páry koní. Protože obě polokoule u sebe držel tlak okolního vzduchu, nedokázalo je od sebe ani 8 párů koní odtrhnout. Po opětovném vniknutí vzduchu do dutiny se polokoule samovolně oddělily.

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 vakuu 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.

V polovině 19. století prováděl německý fyzik a sklofoukač **Heinrich Geissler** pokusy s průchodem elektrického proudu zředěnými plyny. Zjistil tak, že ve skleněné trubici, kde probíhá výboj, poklesne tlak. Geisslerova trubice demonstruje principy elektrických výbojů v plynech a jedná se o předchůdkyni neonových zářivek. Tyto experimenty však vyžadovaly nižší tlaky. Do té doby bylo možné čerpat tlak pouze do 10 torr (1333 Pa), což bylo pro experimenty s výboji v plynech nedostačující. V roce 1855 proto Geissler, inspirován Torricellim, sestrojil rtuťovou pístovou vývěvu, která byla schopná čerpat tlak až do hodnoty 10^{-3} torr (0,1333 Pa). Funkci pístu zde nahradila rtuť, která odstranila problém s těsněním, s nímž se potýkaly klasické pístové vývěvy. Její nevýhodou byly páry rtuti, které se dostávaly do čerpaného prostoru, ale přesto tato vývěva přispěla k rozvoji elektrických výbojů v plynech.

Spolu s čerpáním tlaků nižších než 1 torr (133,3 Pa) vyvstal problém s jejich měřením - Torricelliho manometr už nebyl dostačující. 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 v měřicí kapiláře a uděláme to pomalu, bude platit, že součin tlaku a objemu je konstantní. Jako pracovní kapalinu používal tento 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.

V roce 1879 vynalezl **Thomas Alva Edison** první žárovku s uhlíkovým vláknem žhaveným ve vyčerpané skleněné baňce. Kdybychom vlákno rozžhavili za atmosférického tlaku, okamžitě shoří, protože za atmosférického tlaku na vlákno dopadá velké množství molekul kyslíku. V baňce vyčerpané na nízký tlak je mnohem menší koncentrace molekul kyslíku, takže jeho okysličení probíhá velmi pomalu a vlákno má mnohem větší životnost. Zajímavostí je, že prvním divadlem v Evropě s vlastním elektrickým osvětlením dle Edisonova projektu bylo Mahenovo divadlo v Brně, a to již v roce 1882. V této době ve městě ještě nebyla zavedena elektřina, takže musela být pro potřeby divadla postavena malá parní elektrárna. Až v roce 1892 poté došlo k průmyslové výrobě žárovek.

Průmyslová výroba žárovek a elektronek si 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 zkapalněných 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.

Nedostačující technika na přelomu 19. a 20. století způsobila nemožnost experimentálního ověření kinetické teorie plynů. Začátkem 20. století proto sestrojil německý fyzik **Wolfgang Gaede** hned tři velmi důležité vývěvy: konkrétně v roce 1905 rotační rtuťovou vývěvu, v roce 1912 molekulární vývěvu a v roce 1913 difuzní vývěvu. Objev difuzní vývěvy byl velmi podstatný, protože snížila mezní tlak, umožnila čerpat větší objemy a především rychleji získávat nízké tlaky. Gaede také formuloval pojem čerpací rychlost vývěvy.

Vyvíjely se také nepřímé měřící metody, fundamentální pro měření nízkých tlaků. V roce 1906 vznikl tepelný manometr nazvaný po svém vynálezci **Piranim**. Molekulární manometr zkonstruoval **Knudsen** v letech 1909–1911 a také ověřil správnost kinetické teorie plynů i pro nízké tlaky. V letech 1913 až 1915 vznikl zásluhou **Langmuira** a **Dushmana** viskózní manometr. A konečně v roce 1916 sestrojil **Buckley** ionizační manometr pracující na principu ionizace plynu. Tyto manometry opět snížily hranici pro měření nízkých tlaků.

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 vakuových systémů pro urychlovače částic a získávání nízkých tlaků pro účely výbojů v plynech 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 měřícího 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 kvadrupólový hmotnostní spektrometr. Turbomolekulární vývěva vyvinutá v roce 1958 **W. Beckerem** ve firmě Pfeiffer umožnila

KAPITOLA 1. ÚVOD DO PŘEDMĚTU

čerpací tlak až do oblasti ultravysokého vakua. Vyznačuje se vysokou rychlostí otáček rotoru, a tedy i vysokou čerpací rychlostí. V roce 1973 vznikla vývěva typu Scroll (spirálová vývěva) s vysokým kompresním poměrem, která se využívá například jako předčerpávací vývěva pro turbomolekulární vývěvy.

Od roku 1982 se k měření tlaků používá manometr s rotující kuličkou. Jedná se o velmi přesnou nepřímou metodu měření tlaku až do hodnoty 10^{-5} Pa. Manometr s rotující kuličkou se používá jako sekundární etalon v metrologii. Moderní hybridní turbomolekulární vývěva s molekulárním stupněm vznikla v roce 1992. Na rozdíl od klasické turbomolekulární vývěvy začíná čerpat při vyšším tlaku na vstupu.

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

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

1.3 Využití vakua

Metody získávání a měření nízkých tlaků našly 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 srážek s částicemi plynu, a tím se zabránilo jejich brzdění, rozprašování, nebo ionizování plyny;
- aby bylo možné uchovat čistý povrch a zamezit vázání plynů nebo par na povrchu.

V závislosti na dané aplikaci a pracovním tlaku, který potřebujeme získat, musíme vybrat vhodný vakuový čerpací 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 elektronové mikroskopy. Elektronový zdroj i pracovní komora tohoto mikroskopu musí být vyčerpány 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 oblastí, která nízké vakuum využívá, je spektroskopie. Kromě různých typů detektorů, které ve své konstrukci používají malé vakuové komůrky, můžeme v případě spektroskopie v infračervené a ultrafialové oblasti vakuum 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 ~ 80 K se používá tzv. Dewarova nádoba. Je tvořena nádobou s dvojitými stěnami a prostor mezi stěnami je vyčerpán na tlak $\sim 10^{-3}$ Pa, abychom snížili přenos tepla částicemi plynu. Vnitřní stěny jsou ještě pokoveny za účelem snížení přenosu tepla tepelným zářením.

KAPITOLA 1. ÚVOD DO PŘEDMĚTU

Ve fyzikálních oborech nachází vakuum celou řadu využití. Základní výzkum v oblasti částicové fyziky probíhá na velkých urychlovačích částic. V současné době je největším urychlovačem LHC (Large Hadron Collider) nedaleko švýcarské Ženevy. Řada menších urychlovačů se využívá pro výzkum v oblasti nových materiálů, v biologii a medicíně. Základní výzkum v oblasti termojaderné syntézy se provádí v řadě typů reaktorů. Nejpoužívanějšími jsou reaktory typu Tokamak. Největší z nich, ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), vzniká v jihofrancouzském městě Cadarache a představuje vakuovou komoru s objemem 840 m^3 . 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 vyčerpán 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 depoziční procesy nám stačí tlaky $\sim 10 \text{ Pa}$, pro jiné musíme získat tlaky menší než 10^{-8} Pa . Testování speciální depoziční 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 podobným 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 výrobě 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 minulosti to byly zejména různé typy elektronek, denně 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 odrazné 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

KAPITOLA 1. ÚVOD DO PŘEDMĚTU

přenosu tepla. V potravinářství se využívají bariérové vrstvy na plastových lahvích, zejména pro to, aby přes stěnu lahve 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.

Vakuum 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 potřebujeme v chemickém průmyslu při vakuové destilaci ropy nebo při přípravě čistých chemikálií, v metalurgii pro vakuové pece, ve kterých můžeme vyrábět čisté kovy nebo slitiny bez rozpuštěných plynů.

Mezi další průmyslové aplikace vakua patří například: vakuové balení potravin, vakuové sušení, vakuové 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 Plyny 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 .

$$p = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

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 m².

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 čtvereční palec, 1 PSI = 6895 Pa

Základní pojmy a zákony, které platí pro ideální plyn:

- Avogadrův 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 uhlíku $^{12}_6\text{C}$
- Avogadrova konstanta určuje počet částic v jednom molu látky, $N_A = 6,023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, 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}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

$$\frac{pV}{T} = n_0R \quad (2.2)$$

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:

$$\frac{pV}{T} = n_0R = \frac{m}{M}R = NkT \quad (2.3)$$

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:

$$p = nkT \quad (2.4)$$

2.1.3 Maxwellovo rozdělení rychlostí molekul plynu

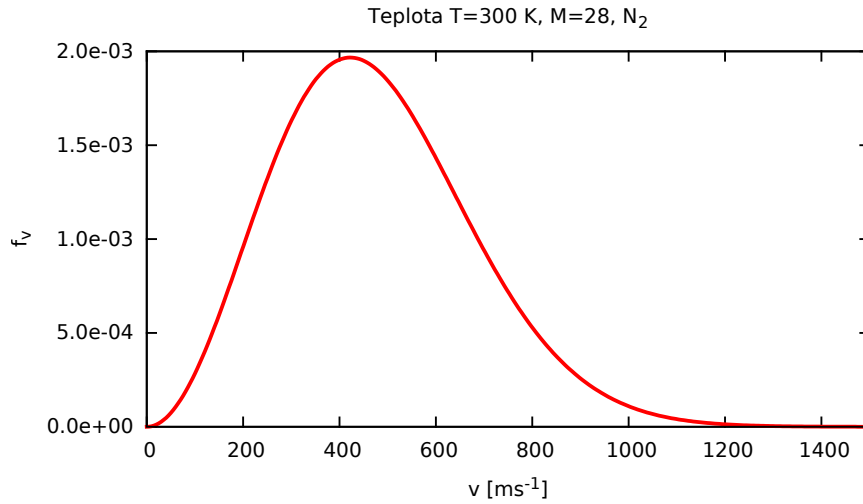
Molekuly plynu jsou v neustálém náhodném pohybu. Dochází ke srážkám molekul plynu mezi sebou a se stěnou nádoby, přičemž jejich rychlost se vlivem těchto srážek mění. Pravděpodobnost, že molekula má danou rychlost, vyjadřuje Maxwellova rozdělovací funkce f_v :

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

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.

KAPITOLA 2. TEORETICKÉ ZÁKLADY VAKUOVÉ FYZIKY



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 ji měly všechny částice, byla by jejich celková kinetická energie stejná, jako když se tyto částice řídí Maxwellovým rozdělením

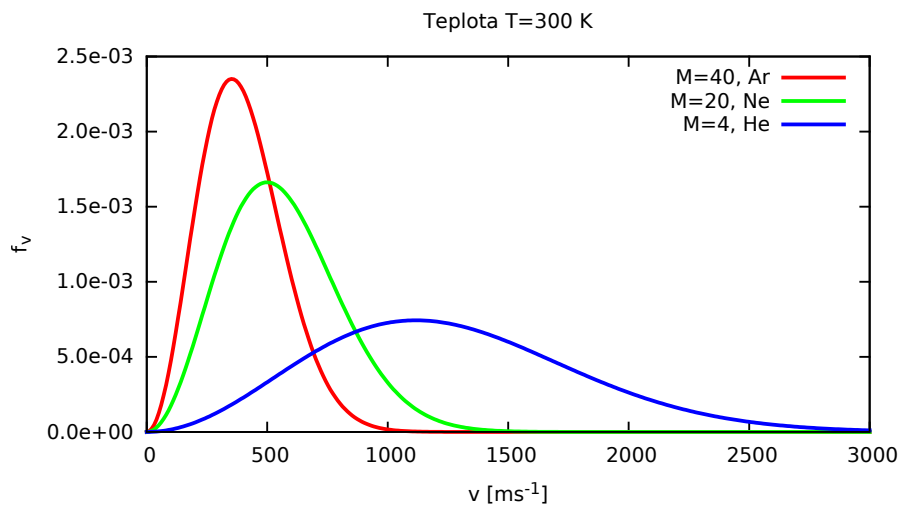
$$v_e = \sqrt{\frac{3}{2}}v_p = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} \quad (2.7)$$

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

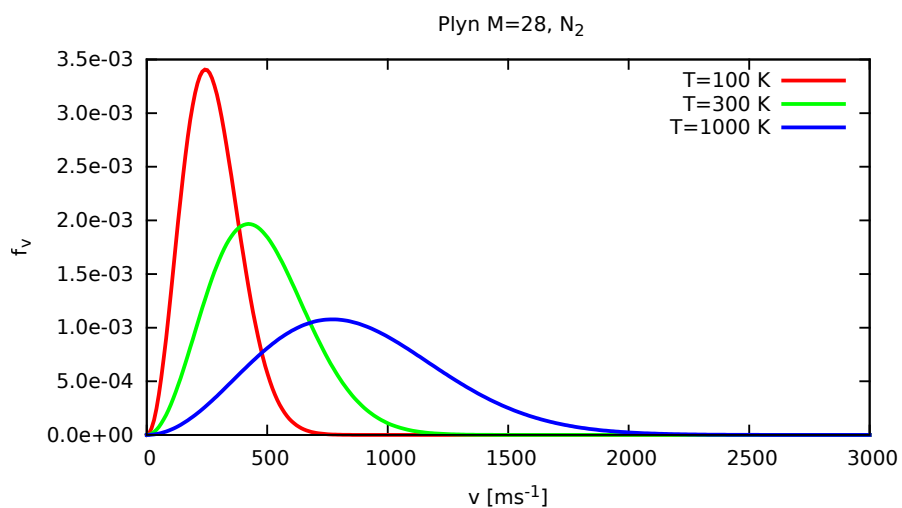
$$v_a = \sqrt{\frac{4}{\pi}}v_p = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} \quad (2.8)$$

Mezi těmito rychlostmi platí nerovnosti $v_p < v_a < v_e$. Tyto střední rychlosti využijeme v dalších kapitolách.

KAPITOLA 2. TEORETICKÉ ZÁKLADY VAKUOVÉ FYZIKY



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 ν [4]:

$$\nu = \frac{1}{4}nv_a \quad (2.9)$$

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:

$$p = \frac{1}{3}nm_0v_e^2 \quad (2.10)$$

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]:

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

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:

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

T_λ je tzv. Sutherlandova konstanta pro daný plyn a T je teplota plynu. Pro některé plyny je Sutherlandova konstanta uvedena v tab. 2.2.

KAPITOLA 2. TEORETICKÉ ZÁKLADY VAKUOVÉ FYZIKY

Tabulka 2.1: Efektivní průměr některých atomů a molekul.

plyn	He	Ne	Ar	Kr	Xe	H ₂	N ₂	O ₂	CO ₂	vzduch
d [10^{-10} m]	2,20	2,55	3,69	4,27	4,87	2,68	3,78	3,65	4,66	3,76

Tabulka 2.2: Sutherlandova konstanta pro různé plyny.

plyn	Ne	Ar	He	N ₂	O ₂	CO ₂	H ₂ O
T_λ [K]	55	145	80	110	125	254	650

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:

$$\nu'_1 = -D_{AB} \frac{dn_A}{dx} \quad (2.13)$$

ν'_1 je počet částic, které prochází jednotkou plochy kolmé 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:

$$D_A = \frac{1}{3} v_a \lambda \quad (2.14)$$

v_a je střední aritmetická rychlost plynu a λ 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:

$$D_{AB} = D_A \frac{n_A}{n_A + n_B} + D_B \frac{n_B}{n_A + n_B} \quad (2.15)$$

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.

KAPITOLA 2. TEORETICKÉ ZÁKLADY VAKUOVÉ FYZIKY

Při stejných počátečních koncentracích plynů platí:

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

Tabulka 2.3: Koefficient samodifuze různých plynů pro normální podmínky.

plyn	H ₂	He	H ₂ O	N ₂	CO ₂	Hg	Xe
D_A [$10^{-4}\text{m}^2\text{s}^{-1}$]	1,27	1,25	0,14	0,18	0,10	0,03	0,05

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

plyn	D_{AB} [$10^{-4}\text{m}^2\text{s}^{-1}$] ve vzduchu	D_{AB} [$10^{-4}\text{m}^2\text{s}^{-1}$] v H ₂
H ₂	0,66	1,27
He	0,57	1,25
vzduch	0,18	0,66
CO	0,175	0,64
CO ₂	0,135	0,54

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_t , které se pohybují různou rychlostí, je úměrná dynamické viskozitě plynu η , gradientu rychlosti a ploše ΔS :

$$F_t = -\eta \frac{du}{dx} \Delta S \quad (2.17)$$

KAPITOLA 2. TEORETICKÉ ZÁKLADY VAKUOVÉ FYZIKY

Pokud mají částice malou střední volnou dráhu, tudíž se často srážejí mezi sebou, pak pro dynamickou viskozitu platí vztah:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \lambda v_a \quad (2.18)$$

ρ je hustota plynu, v_a je střední aritmetická rychlost plynu a λ 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. Jestliže 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 m^2 kolmou ke směru maximálního gradientu teploty lze vyjádřit vztahem:

$$W = -\Lambda \frac{dT}{dx} \quad (2.19)$$

Λ 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:

$$\Lambda = \frac{1}{3} \rho v_a \lambda c_v \quad (2.20)$$

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

$$\Lambda = \eta c_v \quad (2.21)$$

ρ je hustota plynu, v_a je střední aritmetická rychlost plynu a λ je střední volná dráha plynu, c_v je měrné teplo plynu při stálém objemu a η je dynamická viskozita plynu.

V určitém rozsahu tlaků plynu, když je střední volná dráha částic větší, je koeficient tepelné vodivosti funkcí 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.

KAPITOLA 2. TEORETICKÉ ZÁKLADY VAKUOVÉ FYZIKY

Molekulární proudění nastává, když střední volná dráha částic je větší než rozměry komory, dominantní jsou srážky mezi částicemi a stěnou komory. Laminární proudění je takové proudění, při kterém jsou proudnice rovnoběžné a neprotínají se, plyn proudí ve vrstvách. Turbulentní proudění nastává, když se proudnice navzájem promíchávají. Hranice mezi jednotlivými typy proudění nejsou ostré a existují mezi nimi přechodové oblasti. Jaký typ proudění v daném systému nastane, můžeme rozhodnout pomocí Reynoldsova a Knudsenova čísla. Typickým prouděním ve vakuové technice je laminární, molekulární a přechodová oblast mezi laminárním a molekulárním prouděním, tzv. Knudsenovo proudění.

Reynoldsovo číslo R_e je definováno vztahem

$$R_e = \frac{D \varrho u}{\eta} \quad (2.22)$$

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

$$\begin{array}{ll} R_e > 2200 & \text{nastává turbulentní proudění} \\ R_e < 1200 & \text{nastává laminární nebo molekulární proudění} \\ 1200 \leq R_e \leq 2200 & \text{přechodová oblast proudění} \end{array}$$

Knudsenovo číslo K_n je definováno vztahem:

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

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

$$\begin{array}{ll} K_n < 0,01 & \text{nastává turbulentní nebo laminární proudění} \\ K_n > 1 & \text{nastává molekulární proudění} \\ 0,01 \leq K_n \leq 1 & \text{přechodová oblast (Knudsenovo proudění)} \end{array}$$

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 :

$$\begin{array}{ll} pD > 0,662 & \text{nastává turbulentní nebo laminární proudění} \\ pD < 6,62 \times 10^{-3} & \text{nastává molekulární proudění} \\ 6,62 \times 10^{-3} \leq pD \leq 0,662 & \text{přechodová oblast (Knudsenovo proudění)} \end{array}$$

2.3 Plyny ve vakuovém systému

2.3.1 Odraz částic od stěny

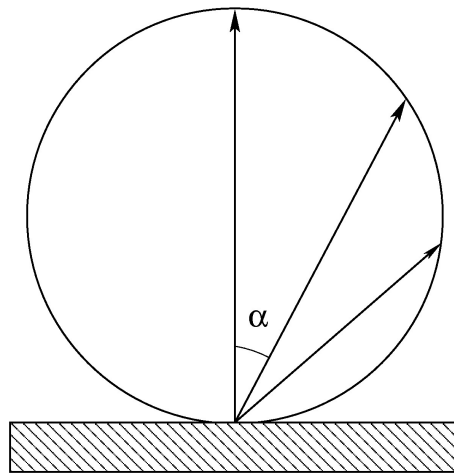
Molekuly plynu dopadající na povrch se nemusejí odrážet podle zákona zrcadlového odrazu. Důvodem je, že doba pobytu částic není nekonečně krátká a povrch vzhledem k velikosti molekuly není dokonale hladká plocha.

Rozdělení pravděpodobností směru rychlostí se řídí kosinovým (Knudsonovým) zákonem:

$$P(\alpha) = P_0 \cos \alpha \quad (2.24)$$

$P(\alpha)$ je pravděpodobnost směru rychlosti, P_0 je pravděpodobnost odrazu ve směru kolmém k povrchu a α 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 rychlostí 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

Sdílení energie při dopadu a odrazu molekuly od povrchu je závislé na určitých podmínkách, které vyjadřuje koeficient akomodace. Pokud je ve vakuovém systému

KAPITOLA 2. TEORETICKÉ ZÁKLADY VAKUOVÉ FYZIKY

plyn s teplotou T_1 a stěna s jinou teplotou T_2 , pak koeficient akomodace můžeme vyjádřit vztahem:

$$d = \frac{T_2' - T_1}{T_2 - T_1} \quad (2.25)$$

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:

$$I = \frac{pV}{t} \quad (2.26)$$

I je proud plynu, p je tlak plynu a V je objem plynu, který prošel nějakým průřezem za čas t . Vakuovou vodivost G nějakého prvku, který má na jedné straně tlak p_1 , na druhé straně tlak p_2 (příčemž $p_2 > p_1$), můžeme definovat pomocí vztahu:

$$G = \frac{I}{p_2 - p_1} \quad (2.27)$$

I je proud plynu, který protéká přes tento prvek.

Odpor vakuového prvku R definujeme jako převrácenou hodnotu vakuové vodivosti

$$R = \frac{1}{G} \quad (2.28)$$

Při paralelním spojení vakuových dílů platí, že výsledná vakuová vodivost je součtem vakuových vodivostí jednotlivých prvků:

$$G = \sum_i G_i = \sum_i \frac{1}{R_i} \quad (2.29)$$

Při sériovém spojení vakuových dílů platí, že výsledný vakuový odpor je součtem vakuových odporů jednotlivých prvků:

$$R = \frac{1}{G} = \sum_i R_i = \sum_i \frac{1}{G_i} \quad (2.30)$$

KAPITOLA 2. TEORETICKÉ ZÁKLADY VAKUOVÉ FYZIKY

Vakuová vodivost otvoru

Pokud máme v nekonečně velké stěně 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]:

$$G = \frac{1}{4}v_a A_0 \quad (2.31)$$

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:

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

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]:

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

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:

$$R = R_T + R_O = \frac{1}{G_T} + \frac{1}{G_O} \quad (2.34)$$

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:

$$L \rightarrow 0 \Rightarrow R_T \rightarrow 0 \Rightarrow R \rightarrow R_O \quad (2.35)$$

$$L \gg D \Rightarrow R_T \gg R_O \Rightarrow R \rightarrow R_T \quad (2.36)$$

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:

$$L \gg D \text{ , } \lambda \gg D \quad (2.37)$$

KAPITOLA 2. TEORETICKÉ ZÁKLADY VAKUOVÉ FYZIKY

L je délka trubice, D je průměr trubice a λ 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]:

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

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, η 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]:

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

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 schopni 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.

Mezní tlak ve vakuovém systému ovlivňují 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 plynů z vývěvy
- difuze plynů rozpuštěných ve stěně vakuové aparatury
- pronikání plynů 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:

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

S je čerpací rychlost a ΔV je objem plynu vyčerpaný za čas Δt .

Mezi proudem plynu a čerpací rychlostí platí vztah

$$I = Sp \quad (2.43)$$

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

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

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

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:

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

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).

V nízkém vakuu můžeme očekávat typicky viskózní proudění plynu. Ve středním vakuu nastává přechod mezi viskózním a molekulárním prouděním, tzv. Knudsonovo proudění. Ve vysokém, velmi vysokém a extrémně vysokém vakuu je typické molekulární proudění plynu.

Tabulka 2.5: Rozdělení vakua, n je koncentrace částic a λ je střední volná dráha.

vakuum zkratka	nízké LV	střední MV	vysoké HV	velmi vysoké UHV	extrémně vysoké XHV
tlak [Pa]	10^5 – 10^2	10^2 – 10^{-1}	10^{-1} – 10^{-5}	10^{-5} – 10^{-10}	$< 10^{-10}$
n [cm^{-3}]	10^{19} – 10^{16}	10^{16} – 10^{13}	10^{13} – 10^9	10^9 – 10^4	$< 10^4$
λ [m]	10^{-8} – 10^{-4}	10^{-4} – 10^{-1}	10^{-1} – 10^3	10^3 – 10^8	$> 10^8$
typ proudění	viskózní	Knudsenovo	molekulární	molekulární	molekulární

Kapitola 3

Vakuové vývěvy

3.1 Vodní vývěva

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

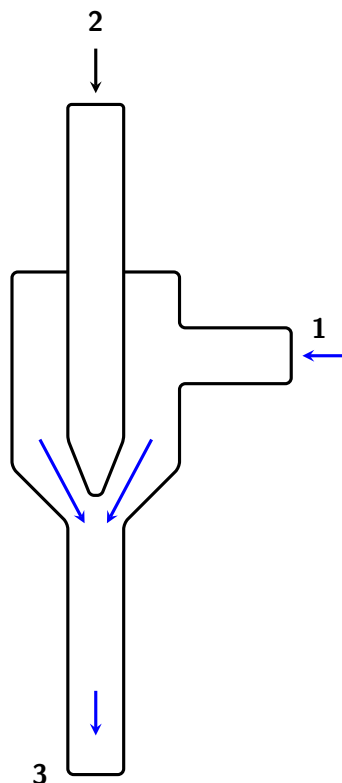
$$\frac{1}{2}\rho v^2 + h\rho g + p = konst. \quad (3.1)$$

ρ 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 čerpání malých objemů.



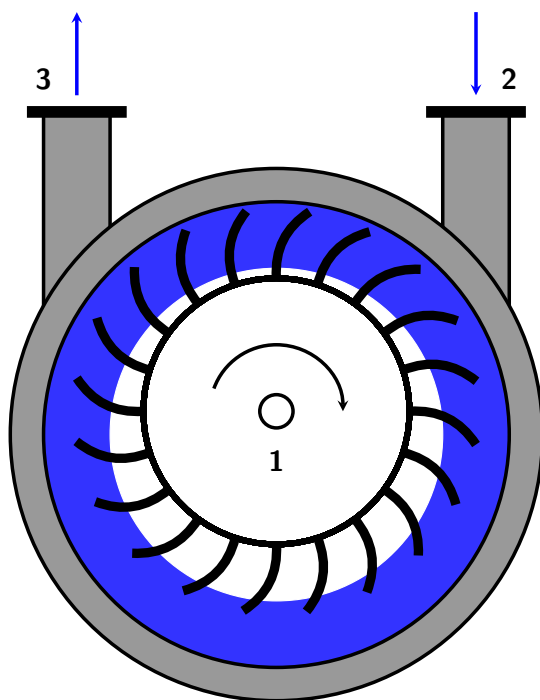
Obrázek 3.1: Vodní vývěva: 1 - čerpaný plyn, 2 - vstup pro vodu a 3 - výstup vývěvy.

3.2 Vodokružní vývěva

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

Tato vývěva může pracovat od atmosférického tlaku, na výstupu může mít atmosférický tlak, přičemž dosahuje mezních tlaků $\sim 10^2\text{--}10^3$ Pa. Mezi výhody patří fakt, že může čerpat velké množství vodní páry a je odolná vůči mechanickým nečistotám a kondenzování par. Má velkou čerpací 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.

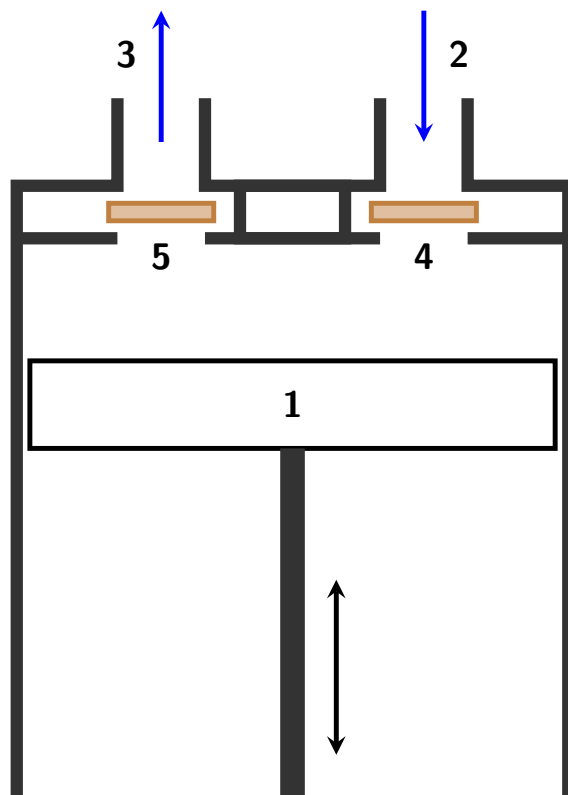


Obrázek 3.2: Vodokružní vývěva: 1 - rotor, 2 - vstup a 3 - výstup vývěvy.

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).

Moderní pístová vývěva nepoužívá pracovní kapalinu. Tím odpadají problémy s difuzí par do čerpaného prostoru. Může pracovat od atmosférického tlaku a na výstupu může mít také atmosférický tlak. Konstrukce vývěvy může být vícestupňová, kdy je několik pístů řazených do série. Pomocí vícestupňové vývěvy získáme nižší mezní tlak ~ 10 Pa.

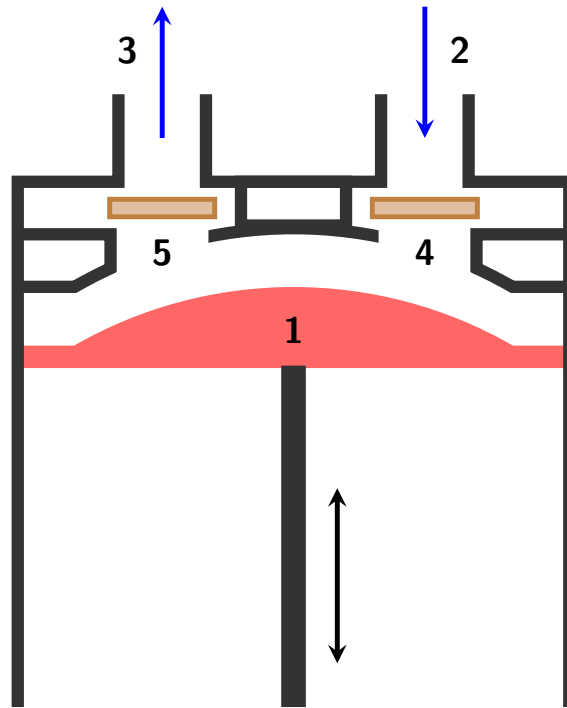


Obrázek 3.3: Pístová vývěva: 1 - píst, 2 - vstup, 3 - výstup, 4 - vstupní ventil, 5 - výstupní ventil.

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.

Membránová vývěva nepoužívá pracovní kapalinu, proto ji řadíme mezi tzv. suché vývěvy. Je schopna pracovat od atmosférického tlaku a na výstupu může mít atmosférický tlak. Konstrukce vývěvy může být i vícestupňová, používá se od jednoho do osmi stupňů. Tyto stupně lze řadit buď do série, nebo paralelně. Když budeme stupně řadit do série, získáme tím nižší mezní tlak. Při paralelním řazení jednotlivých stupňů dostaneme větší čerpací rychlost. Membránové vývěvy dosahují mezní tlaky $\sim 10^2$ Pa.

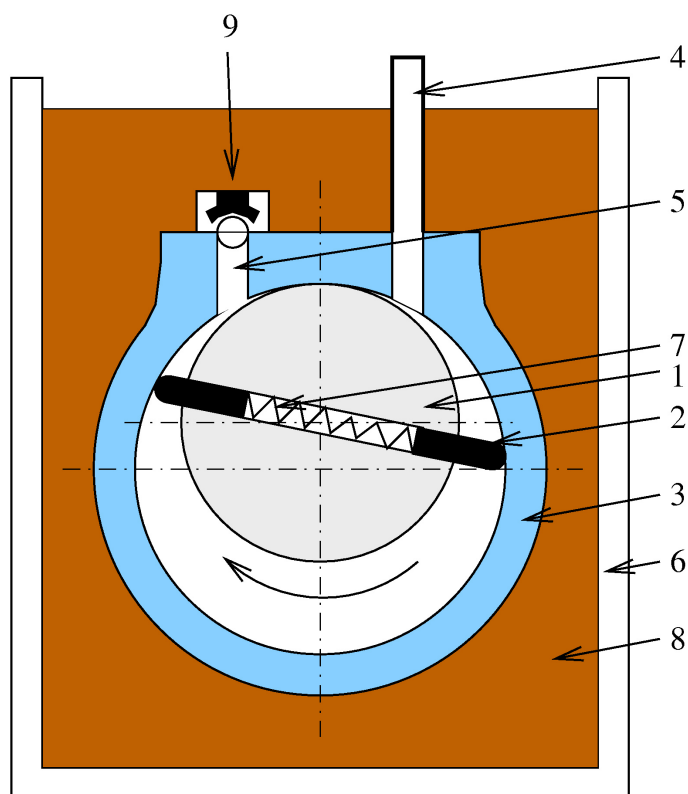


Obrázek 3.4: Membránová vývěva: 1 - pružná membrána, 2 - vstup, 3 - výstup, 4 - vstupní ventil, 5 - výstupní ventil.

3.5 Rotační olejová vývěva

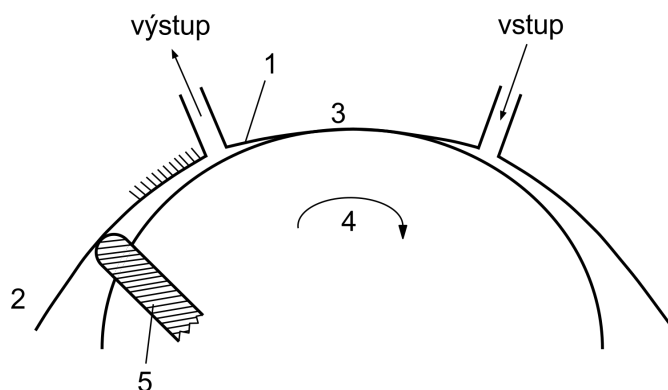
Tato vývěva pracuje také na základě Boyleova–Mariottova zákona. Schéma rotační olejové vývěvy je na obr. 3.5. Asymetricky umístěný rotor se dvěma lopatkami je umístěn ve statoru. Tím, jak se rotor otáčí, je plyn nasáván do vývěvy a pak je vytlačován přes výstupní ventil a vrstvu oleje. Olej slouží k mazání třecích ploch, odvádění tepla, vyrovnávání drobných nerovností rotoru a statoru a vyplňování tzv. škodlivého prostoru. Škodlivý prostor je objem, ve kterém zůstává plyn při vysokém 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 difúzí 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 rotorem a státorem 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.

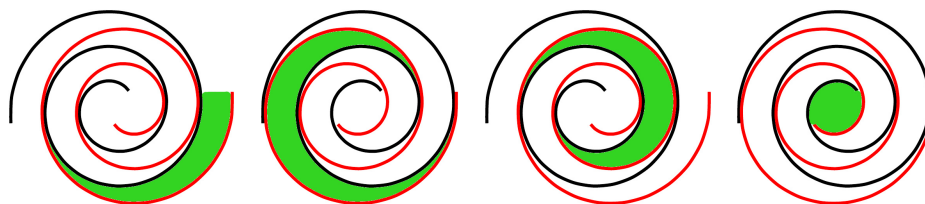


Obrázek 3.6: Škodlivý prostor v rotační olejové vývěvě se nejčastěji nachází v blízkosti výstupního kanálu: 1 - škodlivý prostor, 2 - stator, 3 - styk rotoru a statoru, 4 - rotor a 5 - lopatka rotoru.

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.

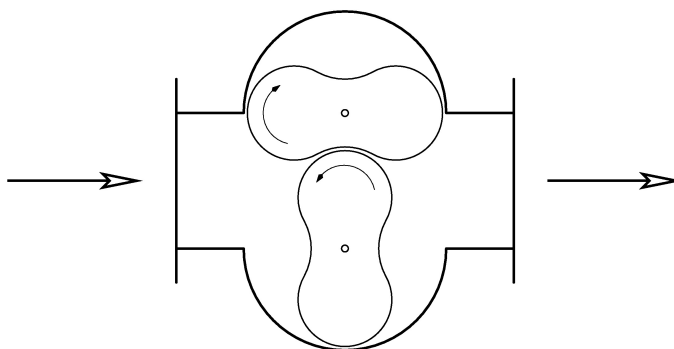
Tato vývěva může pracovat od atmosférického tlaku, na výstupu může mít atmosférický tlak a dosahuje mezních tlaků $\sim 10^0$ Pa. Lze ji používat samostatně, nebo jako předčerpávací vývěvu pro jiné typy vývěv, které nemohou čerpat od atmosférického tlaku na vstupu. Typicky se používá například v kombinaci s turbomolekulární 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 naleznete na obr. 3.8. Využívá dva rotory, které se otáčejí velkou rychlostí. Rotory se nedotýkají statoru a nejsou ani v kontaktu mezi sebou. Mezery mezi rotory, rotory a statorem bývají nastaveny na desetiny milimetru. Počet otáček odpovídá hodnotě $\sim 1000 \text{ min}^{-1}$. Jednostupňové provedení této vývěvy vyžaduje předčerpání na tlak asi 10^2 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.



Obrázek 3.8: Rootsova vývěva.

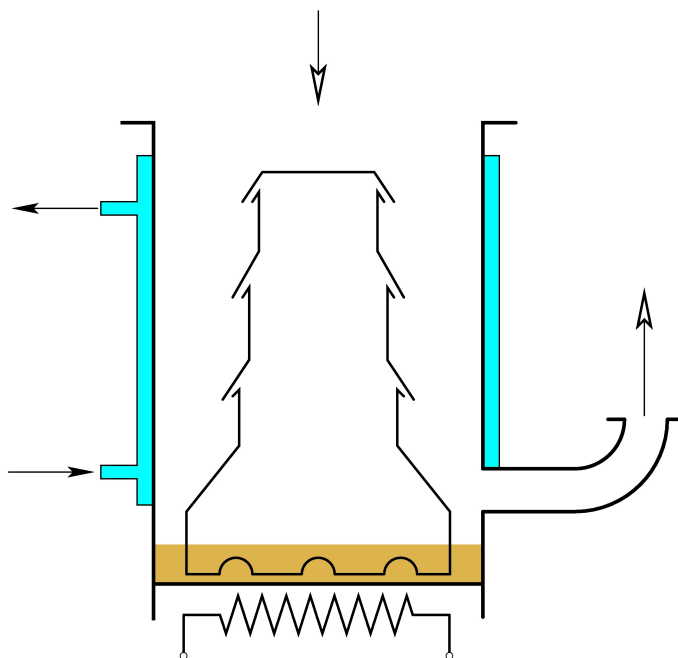
Existuje i víceúrovňové provedení Rootsovy vývěvy, jeho výhodou je, že může mít na vstupu i na výstupu atmosférický tlak. Mezní tlak takové víceúrovňové vývěvy je asi 10^0 Pa .

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 ochlazenou 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.

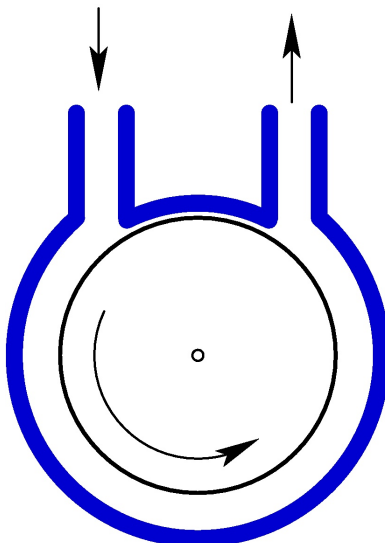
Výhodou difuzní vývěvy je jednoduchá konstrukce a dobrá čerpací rychlost. Vývěva dosahuje poměrně nízkého mezního tlaku $\sim 10^{-7}$ Pa, ale může se zapínat až při vstupním tlaku $\sim 1\text{--}10$ Pa. Její nevýhodou je zpětná difuze olejových par do čerpaného prostoru. Proto se difuzní vývěvy často používají v kombinaci se srážeci 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 předčerpání na tlak asi $\sim 10^1$ Pa. Počet otáček bývá zpravidla ~ 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.



Obrázek 3.10: Molekulární vývěva.

3.10 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 předčerpány jiným typem vývěv typicky na tlak ~ 10 Pa. Pro předčerpání se nejčastěji používají rotační olejové vývěvy. Rotor této vývěvy se otáčí velkou rychlostí, typické otáčky jsou $24000\text{--}90000\text{ min}^{-1}$. 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 až $\sim 10^{-9}$ Pa. Mezera mezi rotorem a statorem je ~ 1 mm. Často bývá součástí turbomolekulární vývěvy i molekulární vývěva. Důvodem je, že pro takovou vývěvu je dostačující vyšší tlak pro předčerpání, proto ji stačí předčerpávat jen membránovou vývěvou na tlak $\sim 10^3$ Pa.

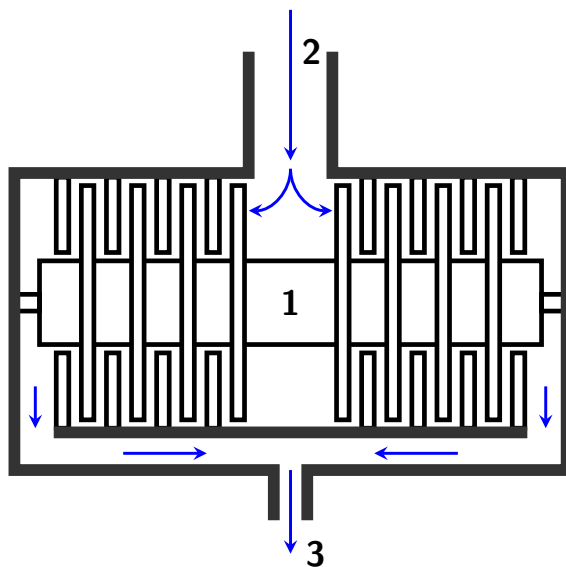
Čerpací rychlost turbomolekulární vývěvy vztahovaná na jednotku plochy rotoru S_A se v závislosti na střední obvodové rychlosti rotoru dá odhadnout vztahem:

$$S_A = \frac{d_f v}{4\left(\frac{v}{v_a} + 1\right)} \quad (3.2)$$

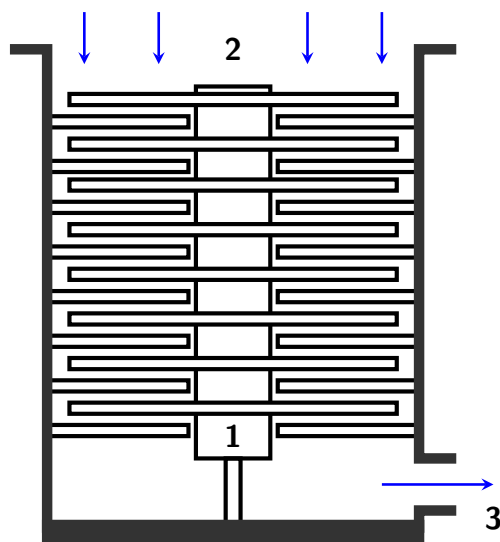
v je střední obvodová rychlost rotoru, v_a je střední aritmetická rychlost čerpaného plynu a $d_f \sim 0,9$ je korekční faktor závislý na tloušťce lopatek. Graficky je tato

KAPITOLA 3. VAKUOVÉ VÝVĚVY

funkce zobrazena na obr. 3.14. Čerpací rychlost turbomolekulární vývěvy je závislá na druhu plynu. Nejčastěji se čerpací rychlost uvádí pro dusík.

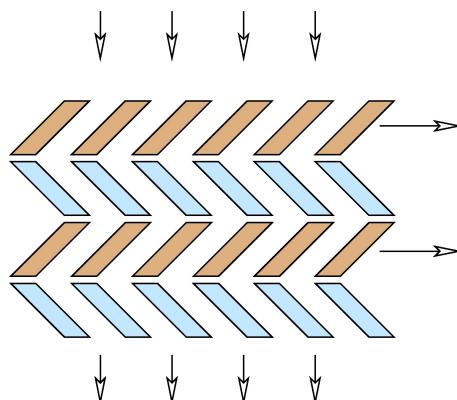


Obrázek 3.11: Turbomolekulární vývěva - horizontální uspořádání: 1 - rotor, 2 - vstup a 3 - výstup.

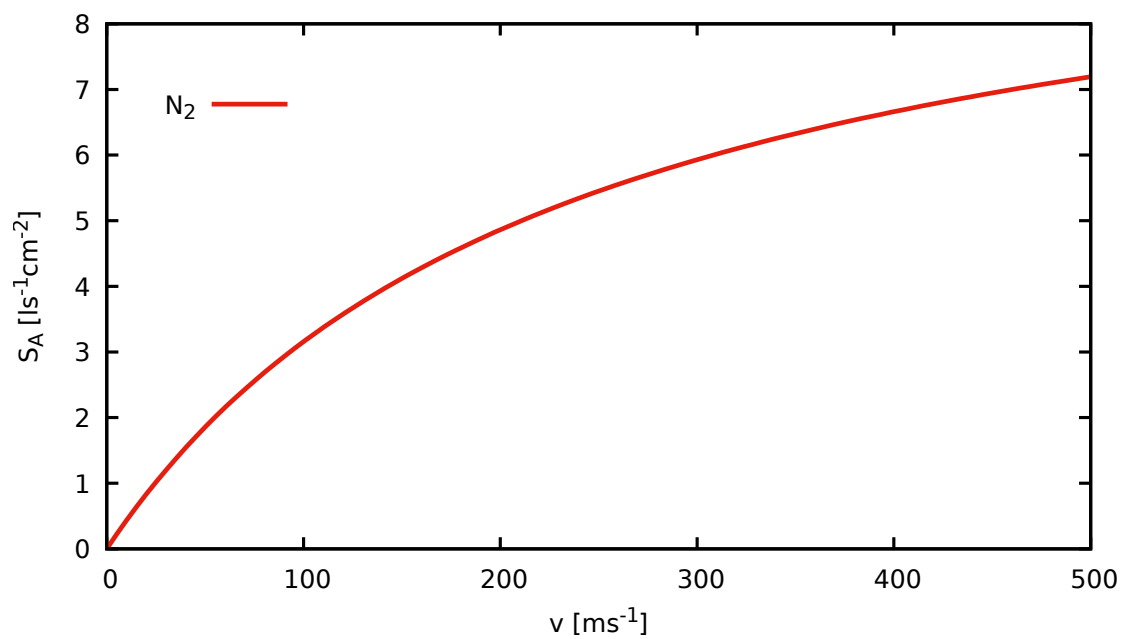


Obrázek 3.12: Turbomolekulární vývěva - vertikální uspořádání: 1 - rotor, 2 - vstup a 3 - výstup.

KAPITOLA 3. VAKUOVÉ VÝVĚVY



Obrázek 3.13: Turbomolekulární vývěva - detail lopatek: rotor - hnědá barva a stator - modrá barva.



Obrázek 3.14: Čerpací rychlost turbomolekulární vývěvy pro dusík vztahovaná na jednotku plochy rotoru v závislosti na střední obvodové rychlosti rotoru.

3.11 Zamezení vniku par do čerpaného prostoru

Pokud používáme vývěvu s pracovní kapalinou, mohou se páry této kapaliny dostávat do čerpaného prostoru. A to zejména pomocí difuze, někdy i pomocí přímého vstříkávání páry. K zamezení vniku par do čerpaného prostoru se používají tzv. srážecí, anebo lapače par. Použití těchto zařízení snižuje čerpací rychlost vakuového systému. V současné době je trend nahradit vývěvy, které používají pracovní kapaliny, vývěvami bez pracovních kapalin.

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

Lapače par zamezují vstupu difundujících molekul par do čerpaného prostoru. Umísťují se proto do blízkosti čerpaného prostoru. Lapače par využívají povrchy s nízkou teplotou, tzv. vymrazovačky, nebo speciální absorpční materiály. Vymrazovačky bývají nejčastěji chlazeny pomocí tekutého dusíku. Princip je takový, že páry kondenzují na povrchu s nízkou teplotou a zůstávají ve vymrazovačce. Absorpčními materiály pro lapače par jsou zejména molekulová síta - zeolity, které se používají za pokojové teploty. Molekulová síta jsou porézní materiály, které obsahují velké množství kanálků a dutin. Jeden gram této látky má povrch až 1000 m². Prostřednictvím velkého povrchu dokáží molekulová síta zachytit páry pracovních kapalin vývěv pomocí fyzisorpce.

Kapitola 4

Manometry

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 vyšší tlak než atmosférický, ale pro účely vakuové techniky je atmosférický tlak dostačující. 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 měřícím přístroji, nebo pomocí výpočtu plynocího 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.

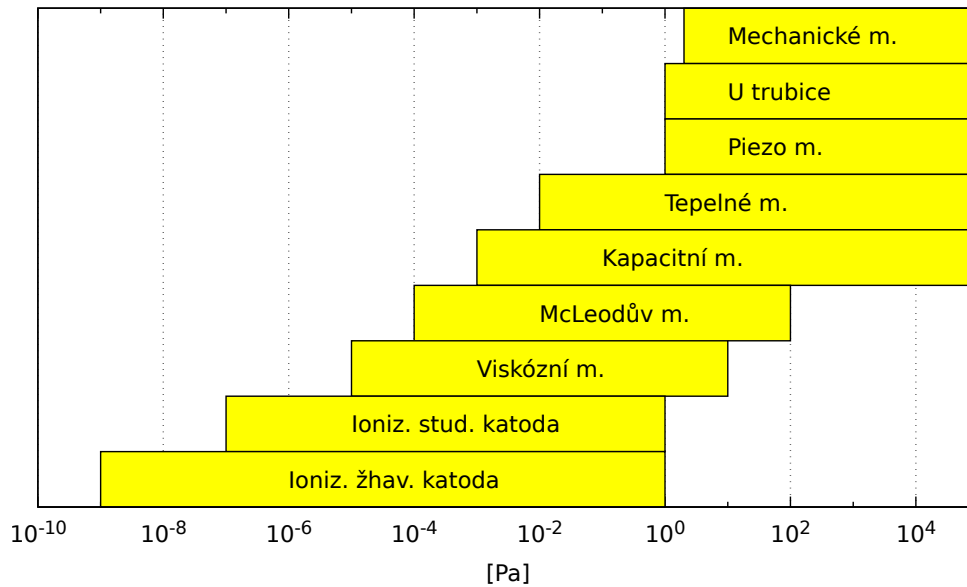
KAPITOLA 4. MANOMETRY

Podle technického provedení můžeme manometry dělit na:

- aktivní měrky - elektronika je součástí měrky, na výstupu je definované 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

Tabulka 4.1: Přehled manometrů pro měření celkových tlaků.

manometry	metoda	min [Pa]	max [Pa]
kapalinové U-trubice	absolutní	10^{-1}	10^5
McLeodův	absolutní	10^{-4}	10^2
mechanické	absolutní	10^2	10^5
kapacitní	absolutní	10^{-3}	10^5
piezo	absolutní	10^1	10^5
viskózní s kuličkou	nepřímá	10^{-5}	10^1
odporové (Pirani)	nepřímá	10^{-2}	10^5
ionizační se žhavenou katodou	nepřímá	10^{-9}	10^0
ionizační se studenou katodou	nepřímá	10^{-7}	10^0



Obrázek 4.1: Přibližný pracovní rozsah různých typů manometrů.

4.1 Kapalinové U-manometry

Kapalinové manometry představují nejjednodušší 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 $p = \frac{\rho_o}{\rho_{Hg}} h$ [torr], kde ρ_o je hustota oleje a ρ_{Hg} je hustota rtuti.

4.1.1 Otevřený U-manometr

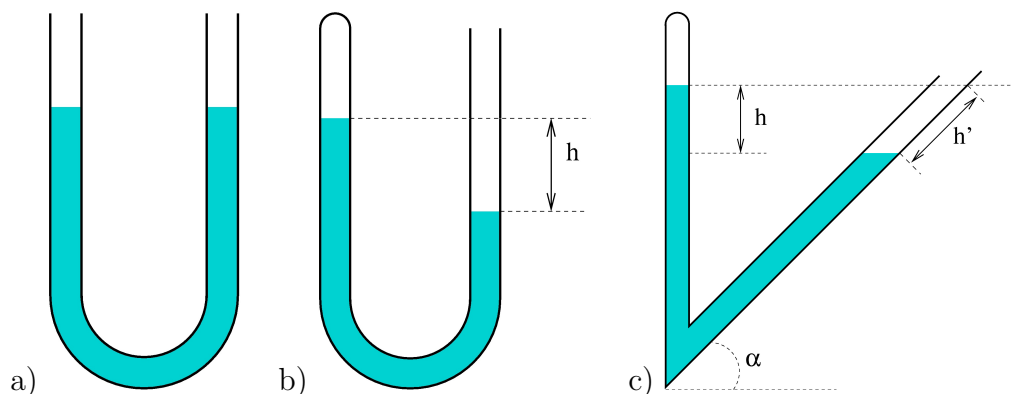
Otevřený U-manometr je na obr. 4.2a. Jedno rameno je připojeno k systému, v němž je tlak p , který chceme změřit. Druhé rameno je spojeno s atmosférickým tlakem p_{atm} . Rozdíl tlaků $\Delta p = p_{atm} - p$ je určen rozdílem výšek hladin pracovní kapaliny, $\Delta p = h\rho g$, kde h je rozdíl výšek hladin, ρ 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 $p_{ref} \sim 0$ Pa, druhá je spojena s měřeným systémem. Měřený tlak odpovídá hydrostatickému tlaku $p = h\rho g$. Nejnižší měřitelný tlak je dán 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 α . Jinak je princip analogický s uzavřeným U-manometrem. Šikmost trubice zvětšuje citlivost měření. Vztah výšky hladiny v rovné a v šikmé trubici je $h = h' \sin\alpha$, citlivost se tedy zvětší o $\frac{1}{\sin\alpha}$.



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, dokáží 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 změním výšku hladiny rtuti. Rtuť funguje jako píst a stlačí plyn do měřící 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 nezaplňené kapiláry V_2 a tlak v tomto objemu p_2 .

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

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

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

d je průměr kapiláry a h je rozdíl rovin X_2 a X_4 . Využitím Boyleova–Mariottova

zákona dostaneme

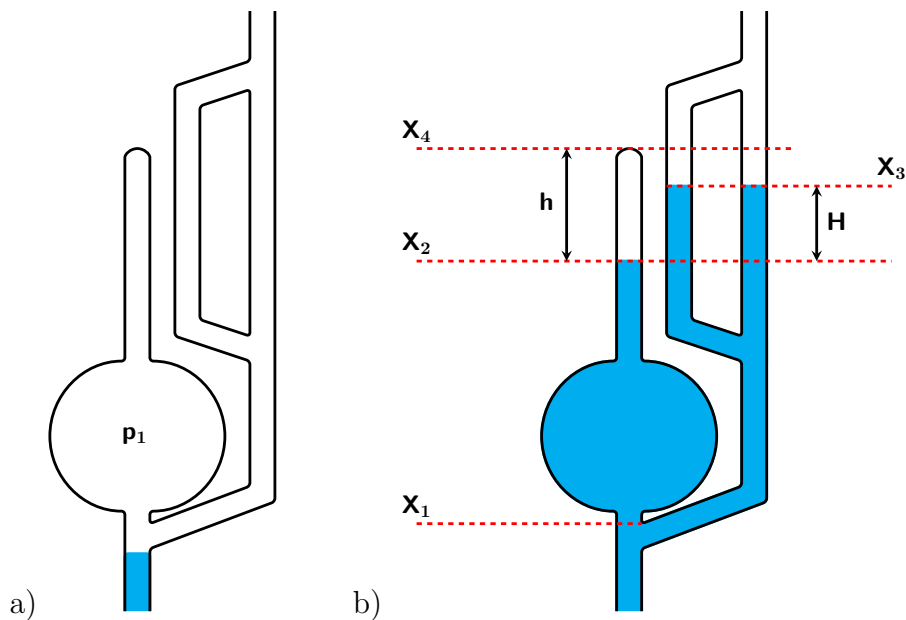
$$p_1 = \frac{V_2}{V_1} p_2 = \frac{\frac{1}{4}\pi d^2 h}{V_1} p_2 = \frac{\pi d^2}{4V_1} h(p_1 + H) \quad (4.3)$$

označme $K = \frac{\pi d^2}{4V_1}$ konstantu manometru, která závisí na průměru kapiláry a objemu baňky:

$$p_1 = Kh(p_1 + H) \Rightarrow p_1 = \frac{KhH}{1 - Kh} \quad (4.4)$$

Pro $Kh \ll 1$ lze zjednodušit na tvar

$$p_1 = KhH \text{ [torr]} \quad (4.5)$$



Obrázek 4.3: McLeodův manometr: a) manometr spojený s komorou s měřeným tlakem, b) po kompresi plynu do měřící kapiláry.

Využívají se dvě měřící metody, lineární a kvadratická. Při lineární měřící metodě se hladina rtuti mění 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 mění tak, aby byla ve srovnávací kapiláře až na rovině X_4 , pak $h = H$ a pro tlak platí $p_1 = Kh^2$ [torr].

Manometr měří tím nižší tlaky, čím menší je konstanta K . To znamená, čím je objem baňky větší a průměr kapiláry menší. Minimální průměr kapiláry 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 spojitě, 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 měřicí rozsah jednoho manometru odpovídá 3–4 tlakovým řádům.

4.3 Mechanické manometry

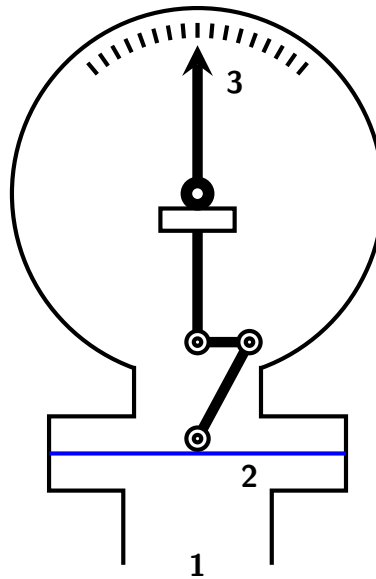
Mechanické manometry využívají pro měření tlaku deformaci pružného elementu. Jedná se proto o absolutní metodu měření tlaku. Mechanické manometry nepotřebují k fungování elektroniku ani napájení. Jsou schopné měřit tlak v rozmezí 10^2 – 10^5 Pa, s přesností až 2 %. Výhodou mechanických manometrů jsou 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

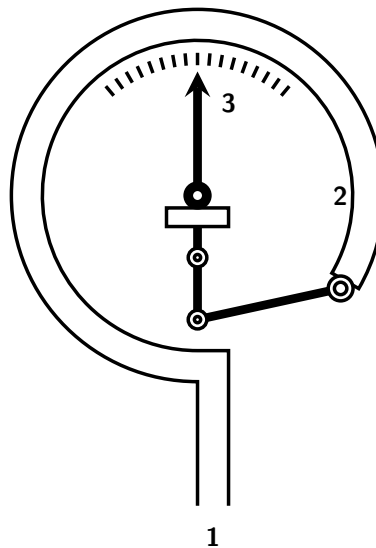
Principem těchto manometrů je deformace pružné membrány vlivem rozdílu tlaků, viz obr. 4.4. Deformace se přenáší na mechanický ukazatel s kalibrovanou stupnicí. Na jedné straně membrány je známý referenční tlak a na druhé straně membrány je měřený tlak. Referenční tlak bývá mnohem menší než měřený tlak.

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 trubice je tlak referenční, a tím je nejčastěji tlak atmosférický.



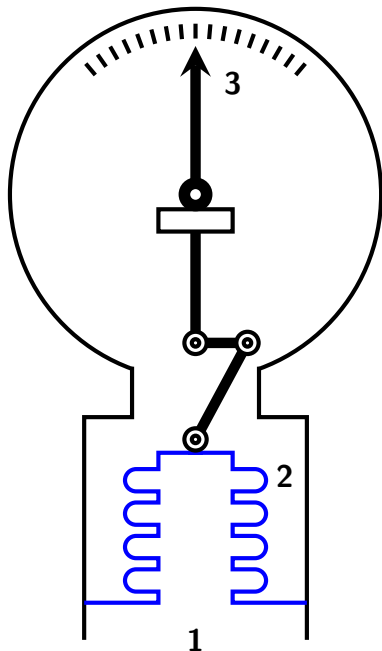
Obrázek 4.4: Membránový manometr: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - membrána a 3 - mechanický ukazatel se stupnicí.



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.

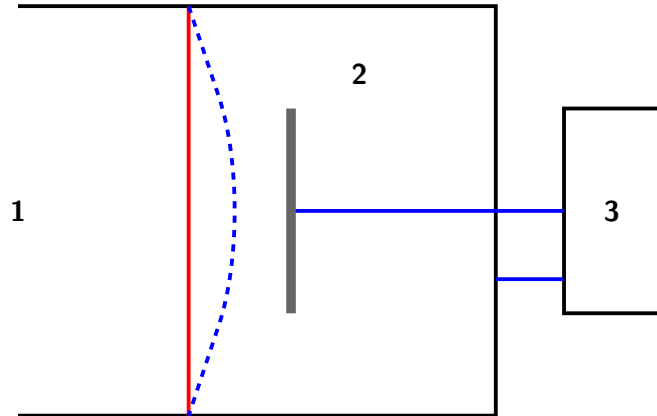


Obrázek 4.6: Vlnovcový manometr: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - pružný vlnovec a 3 - mechanický ukazatel se stupnicí.

4.4 Kapacitní manometry

Principem tohoto manometru je deformace pružné membrány vlivem rozdílu tlaků. Na jedné straně membrány je měřený tlak, na druhé straně je komůrka s referenčním tlakem (viz obr. 4.7). Referenční tlak je podstatně menší než měřený tlak. Tato membrána tvoří s referenční elektrodou deskový kondenzátor. Vlivem deformace membrány se mění kapacita tohoto kondenzátoru, takže veličina úměrná změně tlaku je změna kapacity. Jedná se o absolutní metodu měření tlaku. Dolní hranice měřených tlaků odpovídá $\sim 10^{-3}$ Pa a je dána nejmenší deformací membrány, kterou jsme schopni zaznamenat. Horní hranice měřených tlaků je $\sim 10^5$ Pa. Měřicí rozsah jednoho manometru je nejčastěji 4 tlakové řády ve výše uvedeném rozsahu

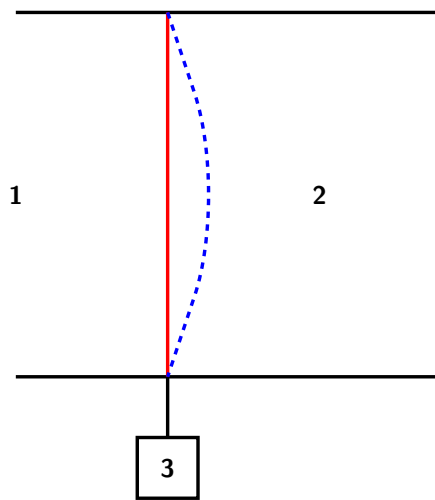
tlaků. Kapacitní manometry se často používají pro kalibraci nepřímých manometrů. Výhodou kapacitních manometrů je absolutní měření, nezávislé na druhu plynu, a velká přesnost. Chyba měření je typicky $< 1 \%$. Nevýhodou je citlivost na změnu mechanických vlastností pružné membrány (vliv teploty, sorbovaných 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

Princip tohoto manometru (viz obr. 4.8) je podobný jako u kapacitního manometru. Deformuje se membrána vlivem rozdílu tlaků. Na jedné straně membrány je měřený tlak, na druhé straně referenční tlak. Součástí membrány je piezo prvek, na kterém se vlivem deformace generuje napětí. Veličinou úměrnou změně tlaku je toto napětí. Jedná se o absolutní měření. Dolní hranice měřených tlaků je $\sim 10^1$ Pa. Horní hranice měřených tlaků je $\sim 10^5$ Pa. Mezi výhody piezo manometrů patří dobrá přesnost měření ($< 1 \%$) a fakt, že se jedná o absolutní měření tlaku. Nevýhodou je malý měřicí rozsah.



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 měřicí 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 vyhříván 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 (termočlávkové manometry), termistoru a nebo z deformace bimetalu (dilatační 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 funkcí teploty:

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

R_0 je odpor při teplotě T_0 , β 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, σ je Stefanova–Boltzmannova konstanta, ε 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:

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

α 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**.

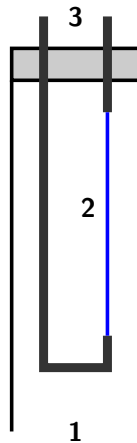
Metoda konstantního proudu je založena na konstantním elektrickém proudu, který protéká vláknem v Piraniho manometru. Veličinou, která je úměrná tlaku, je elektrický odpor tohoto vlákna. Tento odpor můžeme měřit například můstkovou metodou.

Metoda konstantní teploty využívá zapojení Piraniho manometru do můstku se třemi stejnými odpory a elektronikou, která automaticky vyrovnává tento můstek. Při rovnováze 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 můstek 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 aparaturu, 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. Měřicí 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.

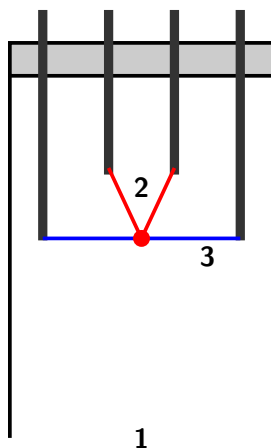


Obrázek 4.9: Piraniho manometr: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - tenké kovové vlákno a 3 - elektrické průchodky.

4.6.2 Termočláňkové manometry

Konstrukce je podobná Piraniho manometru. Tenké kovové vlákno vyhříváme elektrickým proudem a jeho teplotu měříme pomocí termočláňku (obr. 4.10). Teplota

vlákna je závislá na tepelné vodivosti plynu a tím také na druhu plynu ve vakuovém systému. Typický měřicí rozsah termočlánekového manometru je 10^{-1} – 10^3 Pa.



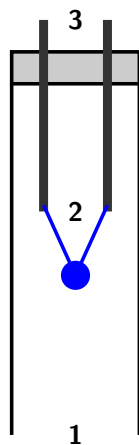
Obrázek 4.10: Termočlánekový manometr: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - termočlánek a 3 - vyhřívané vlákno.

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 můstku a elektrický proud, který protéká termistorem, měníme tak, aby elektrický odpor termistoru byl konstantní. Veličinou 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 závisejí 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

Jsou založeny na principu přenosu momentu hybnosti. Princip těchto manometrů spočívá v tom, že molekuly plynu mění pohyb nějakého elementu. Změna pohybu tohoto elementu je úměrná tlaku plynu ve vakuovém systému. V minulosti se používaly různé typy viskózních manometrů. V dnešní době je nejrozšířenější viskózní manometr s rotující kuličkou.

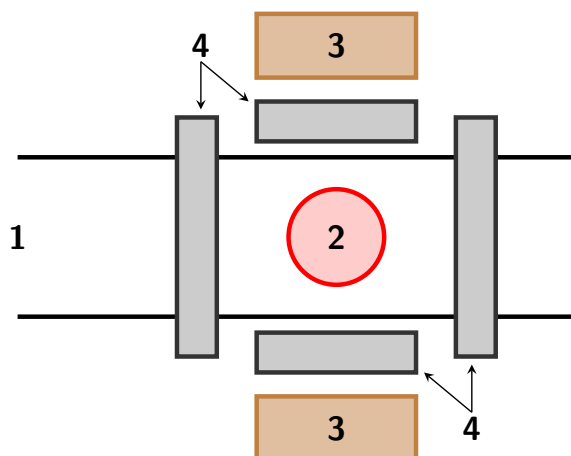
4.7.1 Viskózní manometr s rotujícím kotoučem

Jedním z typů viskózních manometrů je Langmuirův–Dushmanův manometr skládající se z jednoho otáčejícího se kotouče, nad kterým je na tenkém vlákně zavěšen druhý kotouč. Vlivem viskozity plynu se rotační pohyb přenáší na zavěšený kotouč. Z úhlu natočení tohoto kotouče můžeme měřit tlak. Měřicí obor tohoto manometru je asi 10^{-5} – 10^0 Pa.

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 zpomalení 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 zpomalí. Měření je závislé na akomodačním koeficientu pro přenos tečné složky hybnosti pro daný plyn a kuličku. Akomodační koeficient α 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: Viskózní 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 jejich část. To určuje koeficient γ , pro který platí vztah $n_i = \gamma n$, kde n je koncentrace plynu a n_i je koncentrace vzniklých iontů.

Iontový proud je mírou tlaku a musí být tvořen výlučně ionty, které vznikly ionizací plynu. Nesmí obsahovat žádné jiné vedlejší, tzv. parazitní proudy. Veličinou úměrnou velikosti tlaku je iontový proud, který měříme v ionizačních manometrech.

Nevýhodou ionizačních manometrů je fakt, že ovlivňují tlak v měřeném systému. Vykazují čerpací efekt a vlivem vyšší teploty dochází k desorpci plynů ze stěn a elektrod. Jedná se o nepřímé manometry závislé na druhu plynu ve vakuovém 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

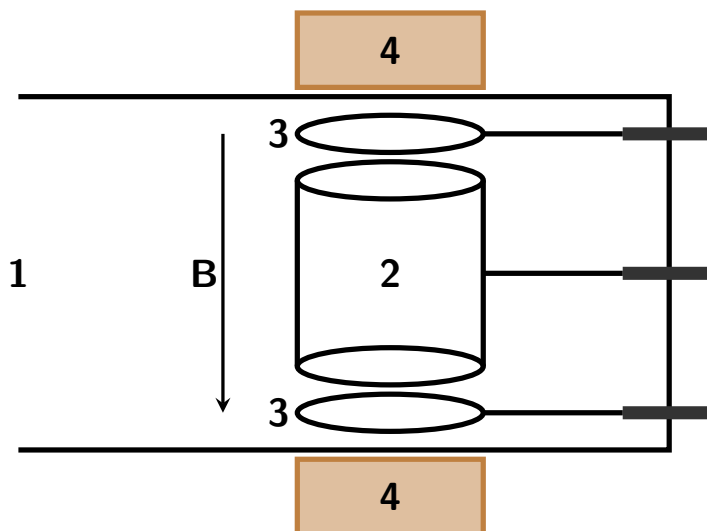
Tento manometr využívá závislosti parametrů elektrického nízkotlakého výboje na tlaku. Princip je založen na samostatném výboji, který vzniká při vysokém napětí. Aby samostatný výboj hořel i při nízkém tlaku, je potřeba prodloužit dráhy elektronů. Tím dochází častěji ke srážkám elektronů s molekulami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

$$I_c \sim N_e L_i d_0^2 p e^{-\frac{U_i d_0}{kTE}} \quad (4.10)$$

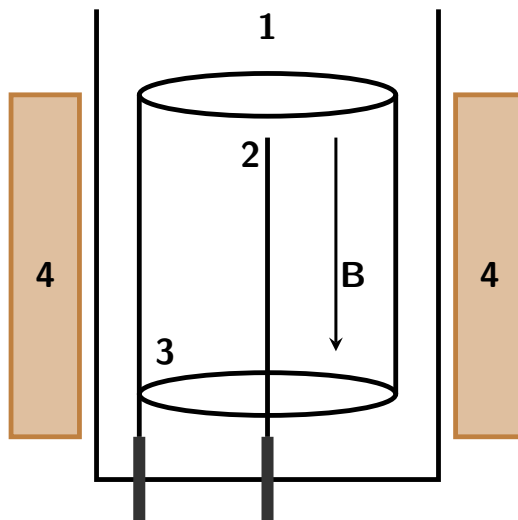
N_e je počet elektronů emitovaných katodou za 1 s, L_i je dráha, na které dochází k ionizaci, d_0 je efektivní průměr molekuly plynu, U_i je ionizační potenciál plynu, E je intenzita elektrického pole mezi katodou a anodou a p je tlak plynu. Tento vztah můžeme upravit na:

$$I_c = Kp \quad (4.11)$$

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 nevdí 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).

Výbojové manometry mají dolní hranici měřeného tlaku $\sim 10^{-7}$ Pa. Speciální konstrukční úpravou můžeme posunout dolní hranici měřeného tlaku až na 10^{-9} Pa. Horní hranice měřeného tlaku je asi 10^0 Pa. Chyba měření se pohybuje v rozmezí $\sim 10\text{--}30\%$.

4.8.2 Ionizační manometr se žhavenou katodou

Tyto manometry využívají k ionizaci plynu proud elektronů, které emituje rozžhavaná 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

kladné ionty, jejichž proud spočítáme následovně:

$$I_p = K_0 I_e p \Rightarrow p = \frac{1}{K_0} \frac{I_p}{I_e} \quad (4.12)$$

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 ϵ . Ten vyjadřuje množství iontů vytvořených jedním elektronem na dráze 1 cm v daném plynu při tlaku 133 Pa a teplotě 273 K. Koeficient ϵ je závislý na energii elektronů, a tedy na urychlovacím napětí.

Citlivost ionizačního manometru závisí na tvaru elektrod měrky a napájecích napětích. Citlivost měrky vzrůstá 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:

$$I_p = \sum_j S_j p_j \quad (4.13)$$

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. Odchýlení drah iontů u něj není podstatné, protože všechny ionty dopadají na kolektor. Tyčkovitý kolektor je tvořen tyčiči 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.

$$I_c = I_p + \sum_i I_i = K_0 I_e p + \sum_i I_i \quad (4.14)$$

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:

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

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) Proud vyvolané elektronovou desorpcí

Při bombardování povrchu elektrony se z něj mohou uvolňovat plyny ve formě neutrálních atomů a molekul, ionizovaných atomů a molekul, disociovaných 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 elektrod. 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 ionty 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 prsteneček, který odděluje kolektor od ostatních elektrod měřky.

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.

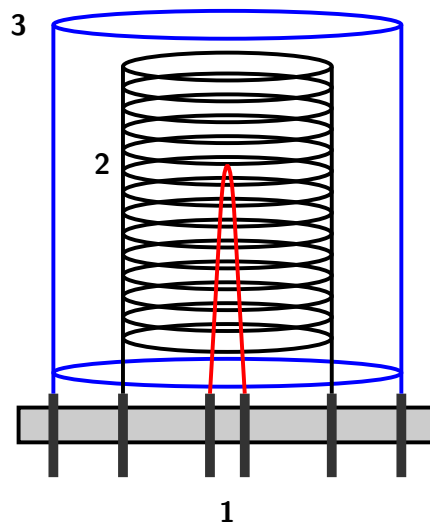
Nejčastěji používané uspořádání je Bayard–Alpert, (obr. 4.16), které umožňuje snížení spodní hranice měřícího oboru tlaků až na 10^{-9} Pa. Spodní hranice měřitelného tlaku je dána zejména parazitními proudy. Existuje celá řada konstrukčních provedení těchto manometrů, které se snaží eliminovat parazitní proudy a ještě snížit spodní hranici měřeného tlaku. Některá konstrukční provedení dokáží měřit až do tlaku 5×10^{-12} Pa. Horní hranice měřitelného tlaku je asi 10^0 Pa.

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

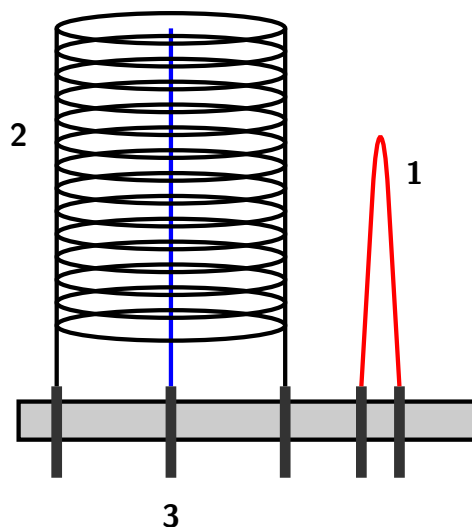
Tyto manometry jsou přesnější ve srovnání s manometry se studenou katodou. Nevyužívají žádné magnetické pole, ale jsou citlivější na provoz, proto je nelze prudce zavzdušnit.

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

	He	Ne	H ₂	N ₂	CO	O ₂	Ar	Hg
ϵ_{max}	1,2	3	3,7	10	11	12	13	19
U_{max} [V]	110	170	65	95	100	120	90	85



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 plynů ve vakuovém systému a na to, jestli je kalibrovaný manometr absolutní, nebo nepřímý.

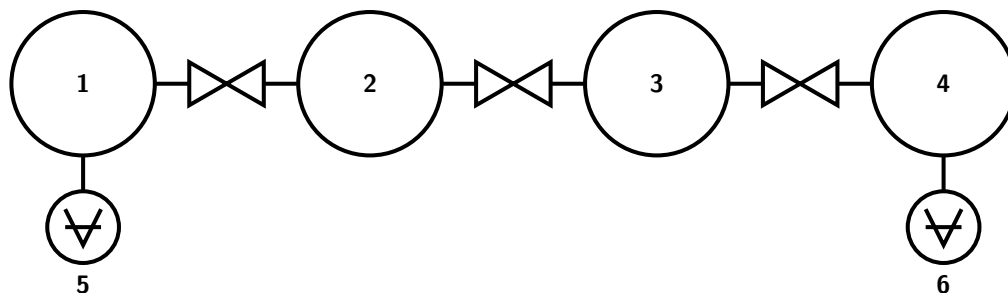
Nejjednodušší metoda kalibrace je přímé porovnání s referenčním manometrem. Tato metoda se dá využít zejména pro vyšší tlaky. Další metodou je definované snížení tlaku v kalibrační komoře vakuového systému. To lze provést několika způsoby.

Jedním z nich je tzv. **statická expanze plynu** (obr. 4.17). Používá se pro rozsah tlaků 10^{-6} – 10^{-1} Pa. Využívá několik vakuových komor, které jsou spojeny pomocí ventilů. Postup je následující: všechny komory vyčerpáme na velmi nízký tlak. Do první komory napustíme plyn a změříme jeho tlak. Otevřením ventilu tento plyn expanduje do další komory a tím se zvětší jeho objem a sníží tlak. Jeho nový tlak můžeme spočítat pomocí stavové rovnice pro ideální plyn. Tuto expanzi můžeme provést několikrát, podle počtu vakuových komor.

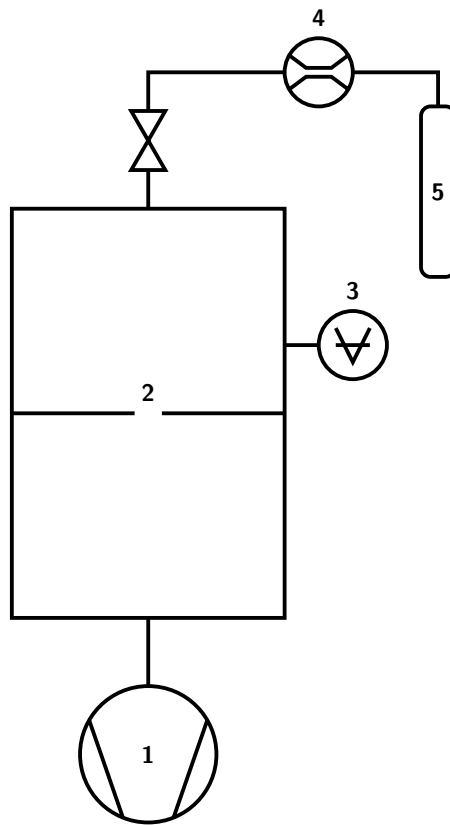
Další metodou definovaného snížení tlaku je tzv. **dynamická expanze plynu** (obr. 4.18). Používá se pro rozsah tlaků 10^{-7} – 10^{-4} Pa. Je to standardní metoda pro kalibraci manometrů. Pracuje na principu konstantního proudu plynu. Vakuová komora je přepážkou s malým otvorem rozdělena na dvě části.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

vývěvy. Do horní komory napouštíme přes jehlový ventil definovaný proud plynu. Jeho velikost potřebujeme znát, můžeme ho změřit pomocí vhodného průtokoměru. Musíme zajistit, že proudění plynu přes otvor v přepážce je molekulární a potřebujeme znát vakuovou vodivost tohoto otvoru. Při splnění těchto podmínek pak můžeme při ustáleném proudění, známém plynu a teplotě vypočítat tlak v horní komoře.

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 schopni 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 plynů: 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 H_2 , CO , Ar , N_2 , O_2 , CO_2 , 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 H_2 , přepážka ze stříbra propouští O_2 , 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 plyny je v tab. 5.1.

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

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 sestaven v USA v roce 1943.

KAPITOLA 5. MĚŘENÍ PARCIÁLNÍCH TLAKŮ

Tabulka 5.1: Tlak některých plynů čerpaných stěnou chlazenou různými kapalnými plyny.

plyn	bod varu [K]	tlak čerpaného plynu [Pa]			
		He (4,2 K)	H ₂ (20,4 K)	Ne (27,2 K)	N ₂ (77,3 K)
He	4,2	>101 000	>101 000	>101 000	>101 000
H ₂	20,4	$4,6 \times 10^{-5}$	101 000	>101 000	>101 000
Ne	27,2	–	60000	101 000	>101 000
N ₂	77,3	–	3×10^{-9}	10^{-4}	101 000
CO	81,6	–	5×10^{-11}	10^{-5}	68000
Ar	87,3	–	7×10^{-11}	10^{-5}	31000
O ₂	90,2	–	$1,3 \times 10^{-11}$	10^{-6}	24000
CH ₄	112	–	–	10^{-8}	10^3
Kr	121	–	–	–	133
NH ₃	140	–	–	–	10^3
Xe	165	–	–	–	10^{-1}
CO ₂	195	–	–	–	10^{-6}
H ₂ O	373	–	–	–	–
Hg	630	–	–	–	–

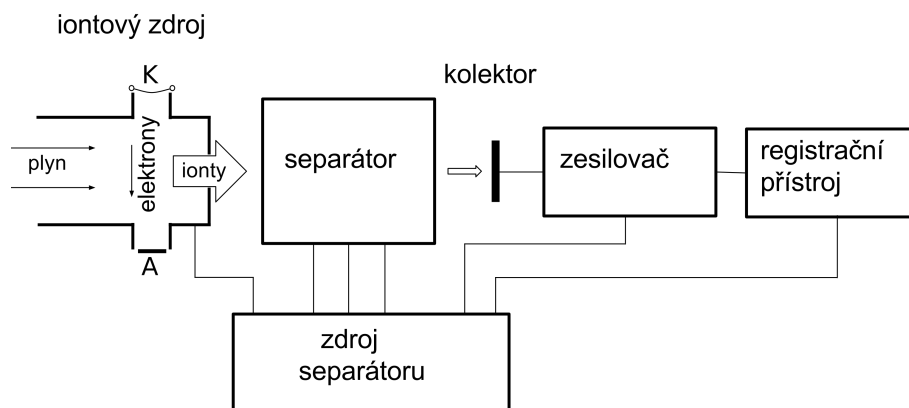
V roce 1948 byla realizována první iontová cyklotronová rezonance. Od roku 1955 známe průletové spektrometry. Od roku 1958 pak kvadrupólové spektrometry, v současné době jedny z nejpoužívanějších hmotnostních spektrometrů.

Ionty v hmotnostních spektrometrech můžeme vytvářet několika různými způsoby ionizace. Nejznámější je ionizace pomocí elektronů. Příklad takového iontového zdroje je na obr. 5.2. Dalšími metodami jsou například chemická ionizace, desorpce a ionizace laserem či plazmatem. Svazek elektronů a iontů je tvarován pomocí elektronové a iontové optiky. Výsledný svazek iontů vstupuje do separátoru a pak na detektor iontového proudu. Nejjednodušším detektorem iontového proudu je jednoduchá elektroda, které říkáme kolektor (Faradayův kalíšek).

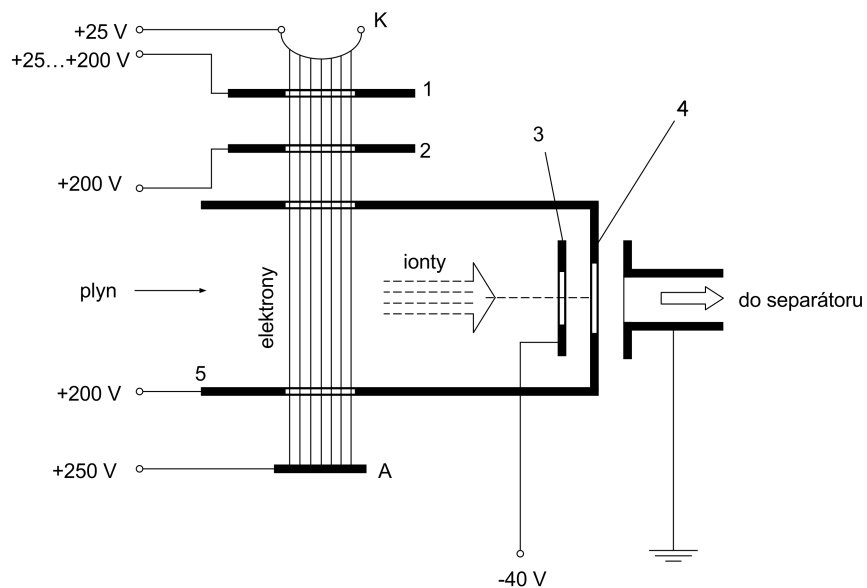
Hmotnostní spektrometry dělíme do několika kategorií podle různých parametrů. Vzhledem k závislosti měření na čase dělíme spektrometry na statické a dynamické. Měření statických spektrometrů není závislé na čase, na rozdíl od těch dynamických. Podle dráhy iontů dělíme spektrometry na kruhové, cykloidální,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

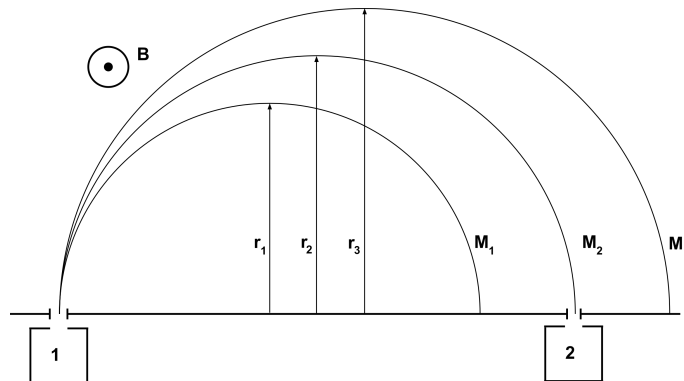
Statické hmotnostní spektrometry nejčastěji používají k separaci iontů magnetické pole. Dráhy iontů jsou v tomto případě kruhové nebo cykloidní. Tyto spektrometry jsou schopny měřit i malé parciální tlaky. V rámci této skupiny hmotnostních spektrometrů jsou významné spektrometry s kruhovými dráhami. Jejich princip spočívá ve změně dráhy iontů o různých hmotnostech pomocí magnetického pole, které je kolmé ke směru pohybu iontů. Síla působící na tyto ionty je úměrná rychlosti částic. Výsledkem tohoto procesu je pak separace iontů na základě jejich hmotnosti (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 drahách. 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 drahami: 1 - zdroj iontů, 2 - kolektor iontů.

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:

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

r je vzdálenost iontů od osy, B je magnetická indukce, E_0 je amplituda intenzity elektrického pole, ω je úhlová frekvence elektrického pole, τ je čas a ω_c je tzv. cyklotronová frekvence, pro kterou platí:

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

v je rychlost iontu a e je náboj iontu.

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

$$r = \frac{1}{2} \frac{E_0}{B} \tau \quad (5.5)$$

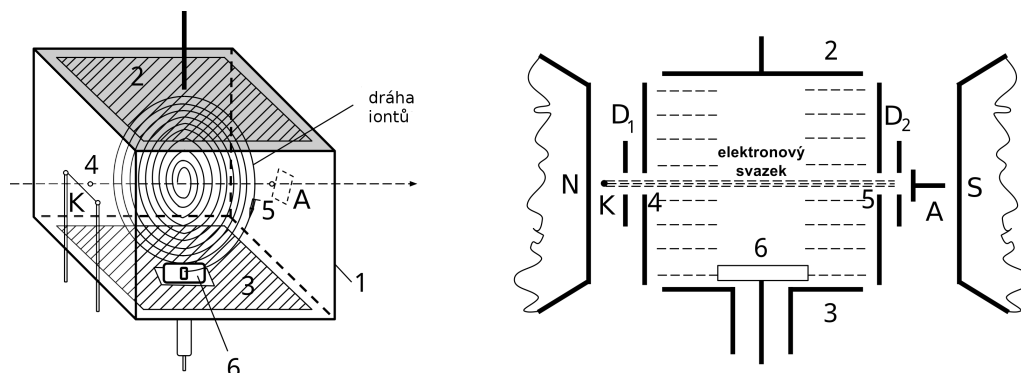
V tomto případě mají tedy dráhy iontů tvar rozvíjející se spirály. To znamená, že poloměr dráhy roste s časem τ a iont odebírá z vysokofrekvenčního pole energii.

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

$$r_{max} = \frac{E_0}{B(\omega - \omega_c)} \quad (5.6)$$

Kolektor iontů se umísťuje do vzdálenosti větší než r_{max} od osy Omegatronu, takže na něj mohou dopadat jen ionty, které jsou v rezonanci s elektrickým polem. Změnou frekvence elektrického pole ω 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.



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

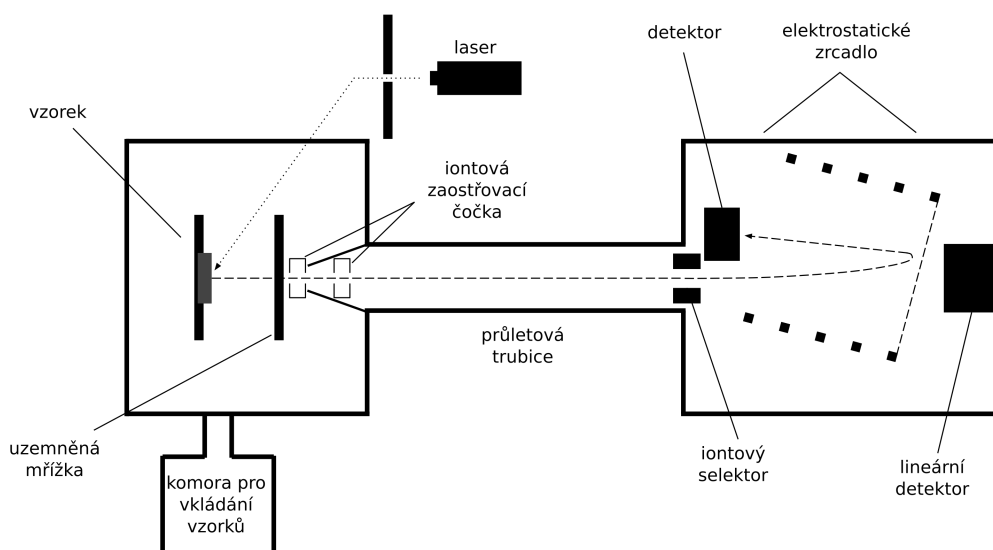
Průletové hmotnostní spektrometry patří k dynamickým spektrometrům. Jejich principem je separace iontů na základě jejich rozdílných rychlostí letu. Ionty jsou urychleny stejně velkým urychlovacím napětím a v závislosti na své hmotnosti získají různě velké rychlosti. Schéma tohoto spektrometru je na obr.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

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m_0}U} \quad (5.7)$$

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 τ závisí na rychlosti v a délce L driftového prostoru podle vztahu:

$$\tau = \frac{L}{v} = L\sqrt{\frac{m_0}{2eU}} \quad (5.8)$$

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

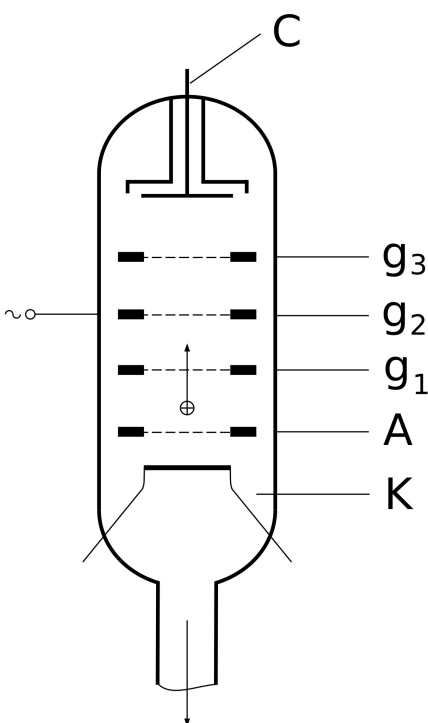
Dalším a v minulosti velice oblíbeným dynamickým hmotnostním spektrometrem je tzv. Bennettův spektrometr. Jeho funkce je v podstatě odvozena od přímého lineárního urychlovače. Dnes je tento spektrometr znám v několika variantách. V původní úpravě Bennett použil elektrody ve tvaru koaxiálních válcových mřížek, podobně jako tomu bylo u běžných elektronek. V současnosti jsou tyto elektrody nahrazeny spíše elektrodami rovinného kruhového profilu. Schéma tohoto spektrometru je na obr. 5.6.

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 průchodem 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:

$$M = \frac{0,266 \times 10^{12} U}{s^2 f^2} \quad (5.9)$$

KAPITOLA 5. MĚŘENÍ PARCIÁLNÍCH TLAKŮ

U [V] je urychlovací 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 N při pohybu mezi mřížkami má maximum pro $N = 0,74$ cyklu. Mezi poslední mřížku a kolektor přivedeme brzdný potenciál o takové velikosti, aby jej překonaly pouze ionty s nejvyšším přírůstkem energie. Pak na kolektor dopadnou pouze ionty s určitou hmotností vyhovující rovnici Bennettova spektrometru.



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

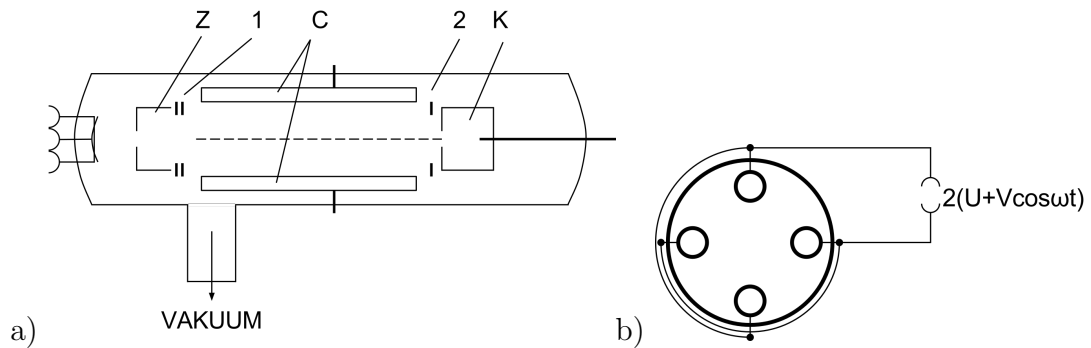
5.5 Kvadrupólový spektrometr

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

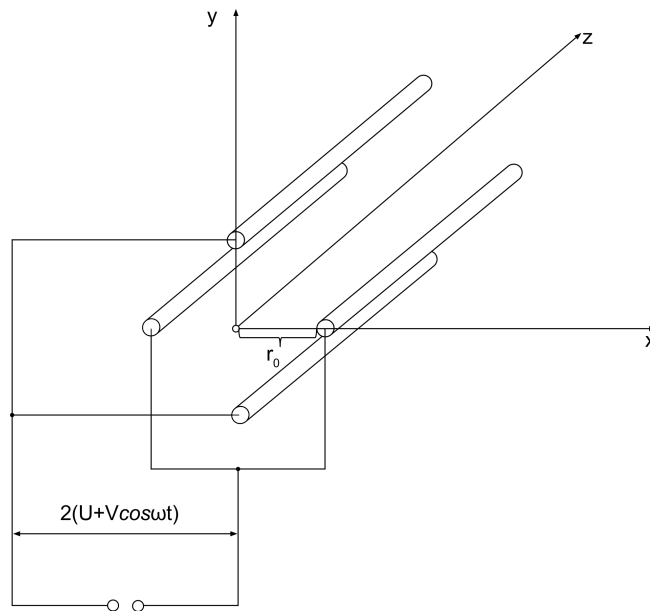
Pro tento spektrometr je charakteristický především separátor tvořený čtyřmi rovnoběžnými kovovými válcovými elektrodami. Ty jsou napájeny kombinací stej-

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: Kvadrupólový 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: Kvadrupólový 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

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

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

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

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

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

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

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

Z toho pak pohybové rovnice pro ionty jsou

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

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

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = 0 \quad (5.16)$$

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

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

Pohybové rovnice pro x a y poté přejdou na zjednodušený tvar

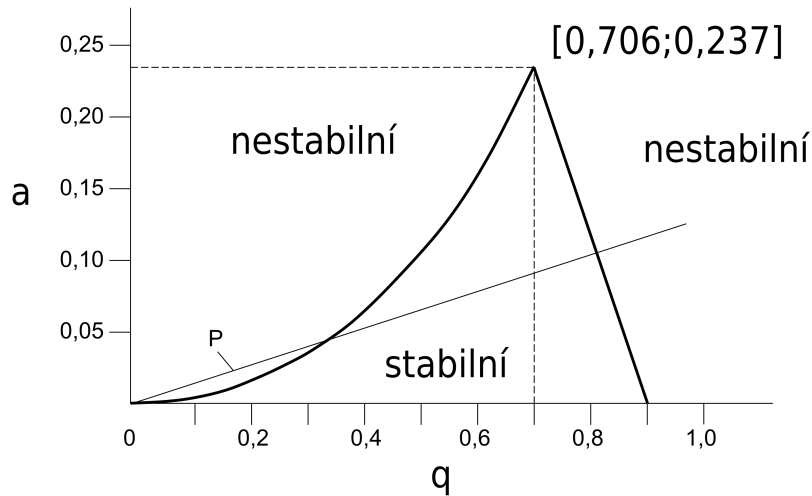
$$\frac{d^2 x}{d\epsilon^2} + (a + 2q \cos 2\epsilon)x = 0 \quad (5.18)$$

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

Toto jsou tzv. Mathieuovy diferenciální rovnice s periodickými koeficienty. Řešení se hledá ve tvaru nekonečných řad. Dvěma druhům řešení (stabilnímu a nestabilnímu

KAPITOLA 5. MĚŘENÍ PARCIÁLNÍCH TLAKŮ

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 spolu s příčnými 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 kvadrupólový spektrometr: P - pracovní přímka.

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 $\frac{a}{q} = 2\frac{U}{V}$. 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 drahách a dopadnou na kolektor. Sklonem pracovní přímky můžeme tento úsek zvětšovat nebo zmenšovat. Pro hodnoty

$$\frac{U}{V} = 0,168; a_0 = 0,237; q_0 = 0,706 \quad (5.20)$$

KAPITOLA 5. MĚŘENÍ PARCIÁLNÍCH TLAKŮ

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

$$\frac{m}{e} = \frac{4V}{q_0\omega^2 r_0^2} \quad (5.21)$$

Provedené odvození platí přesně pouze pro hyperbolické pole vytvořené hyperbolickými elektrodami. S dostatečnou přesností však platí i pro kruhový průřez elektrod. Kvadrupólové hmotnostní spektrometry mají velkou rozlišovací schopnost a malé rozměry. Ke své funkčnosti nepotřebují magnetické pole, což je výhoda pro některé typy aplikací.

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 příčinu. Pojmeme 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, zátavů 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 a obtížnou 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 plyn 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.

KAPITOLA 6. HLEDÁNÍ VAKUOVÝCH NETĚSNOSTÍ

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.

metoda	tlak [Pa]	min. netěsnost [$\text{Pa m}^3\text{s}^{-1}$]
bublínky ve vodě	2×10^5	10^{-7}
	4×10^5	10^{-8}
	9×10^5	10^{-9}
halogenový hledač	2×10^5	3×10^{-8}
	4×10^5	7×10^{-9}
	6×10^5	3×10^{-9}
heliový hledač	2×10^5	5×10^{-9}

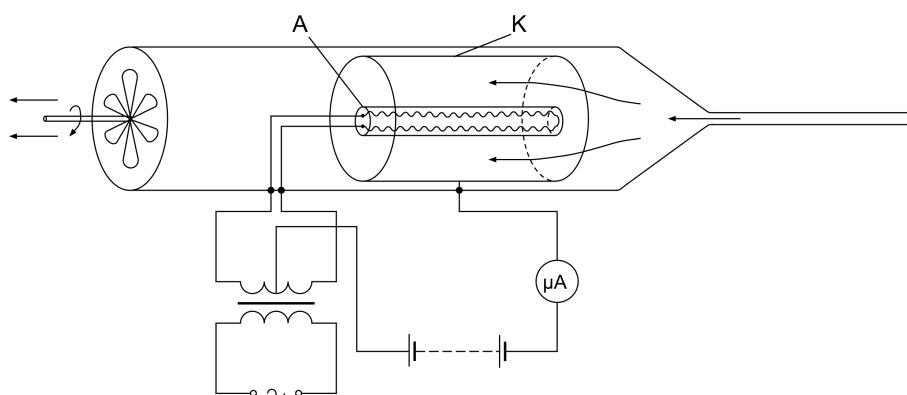
KAPITOLA 6. HLEDÁNÍ VAKUOVÝCH NETĚSNOSTÍ

Tabulka 6.2: Citlivost metod hledání netěsností - vakuový mód.

metoda	tlak [Pa]	min. netěsnost [$\text{Pa m}^3\text{s}^{-1}$]
ionizační manometr dif. zap.	10^{-6} – 10^{-1}	10^{-10}
ionizační manometr s palladiovou membránou	10^{-6} – 10^{-1}	10^{-8}
halogenový hledač	10^{-4} – 10^5	10^{-8}
heliový hledač	$< 10^{-2}$	10^{-13}

6.1 Halogenový hledač

Halogenový hledač netěsností využívá plyn s obsahem chloru (například freon). Může pracovat jak v číhacím módu, tak ve vakuovém módu. K detekci chloru se využívá efektu zvětšení emise kladných iontů z povrchu horké platiny, jsou-li v okolí sloučeniny chloru. Schéma tohoto hledače v číhacím módu je na obr. 6.1. Platinový váleček je zapojen jako anoda a je zahříván na teplotu 1120–1220 K, což z něj dělá účinný zdroj kladných iontů, které pak proudí na katodu. Obvod elektrod je napájen stejnosměrným napětím a proud kladných iontů měříme mikroampérmetrem. Zkušební plyn se napustí do testované aparatury tak, aby byl v přetlaku. Plyn uniká netěsností ven a pomocí zkušební trubičky a ventilátoru je nasáván k detektoru. Halogenové hledače se v dnešní době příliš nepoužívají, zejména proto, že jako testovací plyn používají freon.

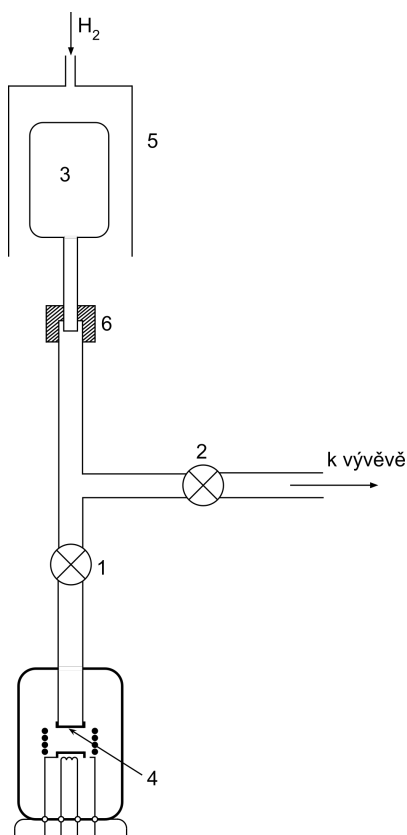


Obrázek 6.1: Halogenový hledač netěsností v číhacím módu: A - anoda, K - katoda.

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.

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 módech, 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.

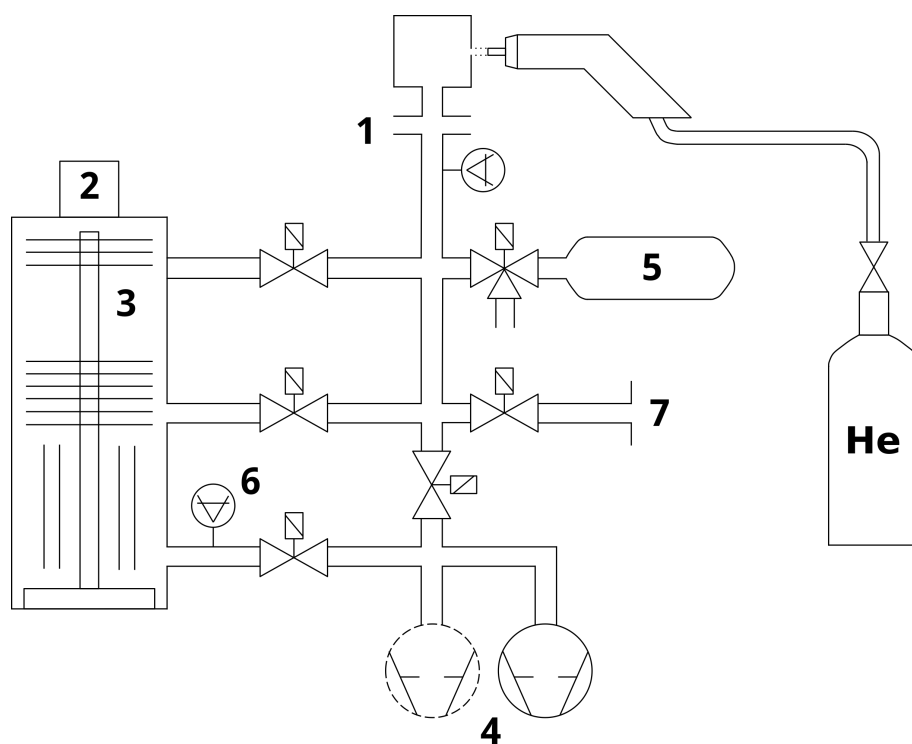
Schéma heliového hledače netěsností je na obr. 6.3. Hledač obsahuje vlastní čerpací systém, ventily pro připojování testovaného systému, vývěv a hmotnostní spektrometr jako detektor helia. Hmotnostní spektrometr zpravidla měří jen do hmotového čísla 4, které má helium. Heliový hledač ve vakuovém módu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

Systém ventilů a bočních větví slouží především 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 módu. 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.

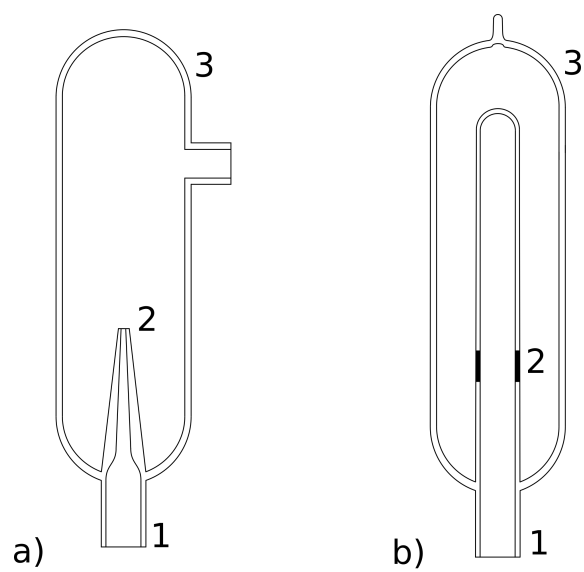
Součástí většiny heliových hledačů netěsností je i kalibrovaná vakuová netěsnost. Její možné konstrukční provedení je na obr. 6.4. Kalibrovaná netěsnost je nutná pro kalibraci hledače, abychom dokázali určit nejen místo, kde je netěsnost, ale i jak velká je to netěsnost.

KAPITOLA 6. HLEDÁNÍ VAKUOVÝCH NETĚSNOSTÍ



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.

KAPITOLA 6. HLEDÁNÍ VAKUOVÝCH NETĚSNOSTÍ



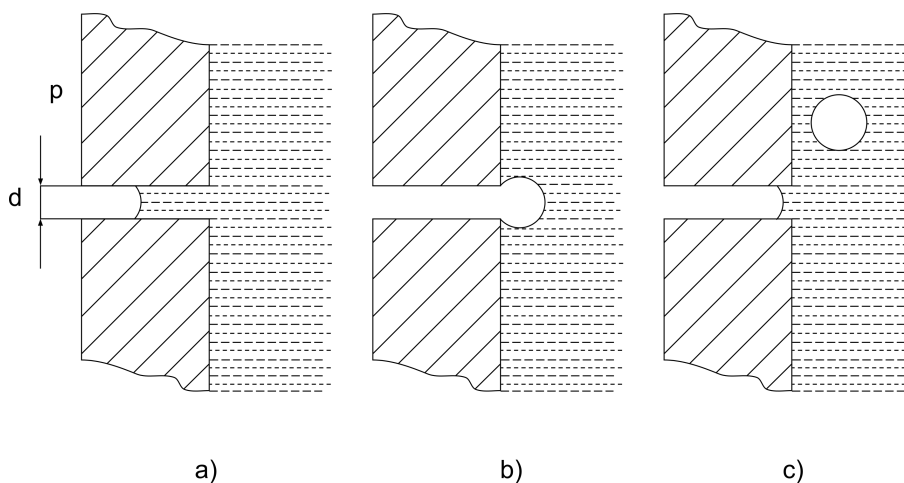
Obrázek 6.4: Kalibrovaná vakuová netěsnost: a) netěsnost s kapilárou, b) netěsnost s přepážkou z křemenného skla, 1 - připojení k hledači netěsností, 2 - prvek s velmi malou vakuovou vodivostí pro helium (tenká kapilára, přepážka z křemenného skla) a 3 - zásobník s heliem.

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 bubliny, nebo bublinky unikající do kapaliny (viz obr. 6.5). Tato metoda je vhodná pro hledání větších netěsností.

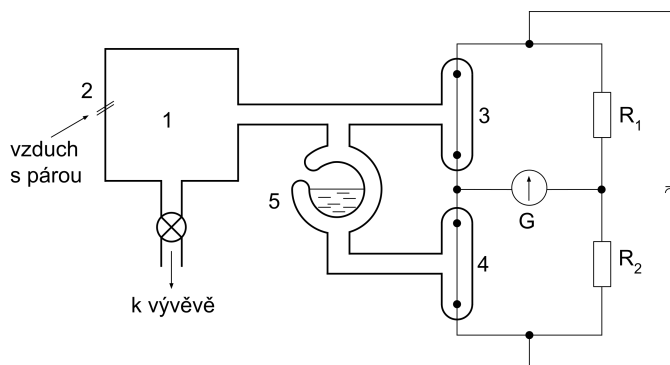
U skleněných vakuových aparatur a dílů, které se v minulosti často ve vakuové fyzice používaly, můžeme využít metody doutnavého a jiskrového výboje. Princip spočívá v tom, že se pomocí velké intenzity elektrického pole zapálí výboj v kanálku, který tvoří vakuovou netěsnost.

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 netěsností proudit do aparatury testovací plyn, 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: Bublínková metoda, plyn s tlakem p ve vakuovém systému prochází netěsností s průměrem d a vytváří bublinku v kapalině.

KAPITOLA 6. HLEDÁNÍ VAKUOVÝCH NETĚSNOSTÍ



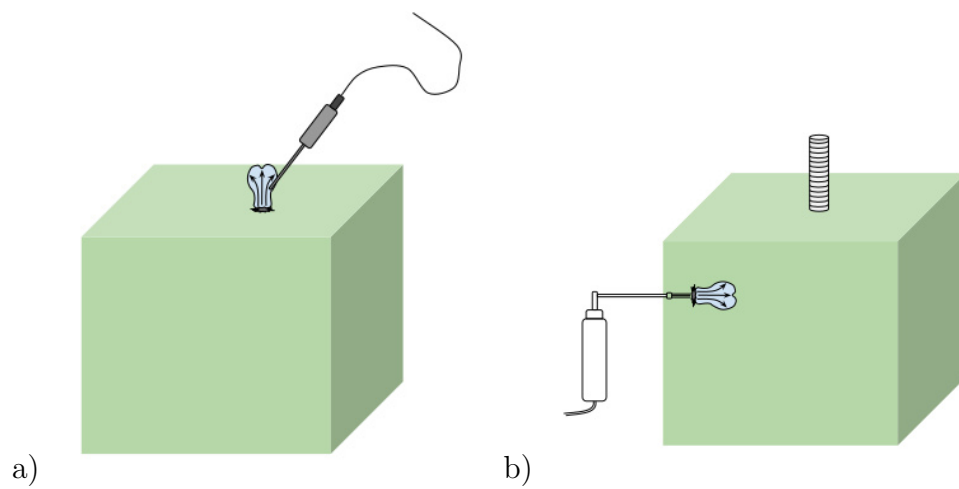
Obrázek 6.6: Hledání netěsností pomocí diferenciálního zapojení dvou Piraniových manometrů: 1 - vakuová komora, 2 - netěsnost, 3 - Piraniový manometr bez vymrazovačky, 4 - Piraniový manometr s vymrazovačkou a 5 - vymrazovačka.

6.5 Metody hledání netěsností v průmyslu

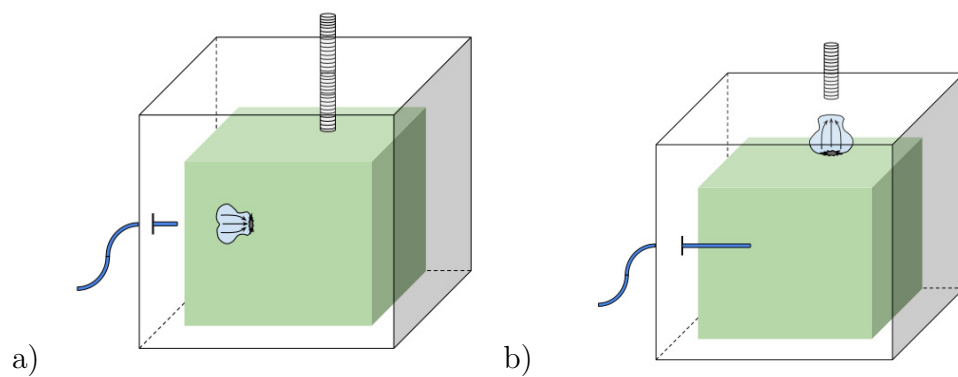
V průmyslových podmínkách je často využíváno kombinace různých výše zmíněných technik za použití širokého spektra detektorů. Jako testovací plyn se používá helium i vodík. O vhodné volbě metody hledání netěsností rozhodují okolnosti, a to jestli potřebujeme znát přesnou polohu netěsnosti, nebo pouze 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.

Pokud potřebujeme určit místo, kde se netěsnost nachází, tak použijeme vakuový, nebo čichací test – viz obr. 6.7. Pokud nás jen zajímá, jestli je nějaký prvek dostatečně těsný, tak můžeme použít tzv. integrální testy. Prvním z nich je integrální vakuový test, kdy je testovaný díl připojen na hledač netěsností a vložen do vakuové komory. Komora je naplněna zkušebním plynem (viz obr. 6.8a). Druhý je integrální čichací test. V tomto případě je testovaný díl natlakován zkušebním plynem a vložen do vakuové komory, ke které je připojen hledač netěsností (viz obr. 6.8b). Další metodou je integrální čichací test za atmosférického tlaku. Testovaný prvek je natlakován zkušebním plynem a vložen do komory s atmosférickým tlakem, ke které je připojena čichací sonda hledače netěsností (viz obr. 6.9a). Posledním způsobem je tzv. bombový test (viz obr. 6.9b). Ten probíhá ve dvou krocích. V prvním kroku umístíme zkoumaný díl na určitý čas do uzavřené komory, kterou napustíme testovacím plynem. Pak tento díl přemístíme do vakuové komory, ke které je připojen hledač netěsností.

KAPITOLA 6. HLEDÁNÍ VAKUOVÝCH NETĚSNOSTÍ

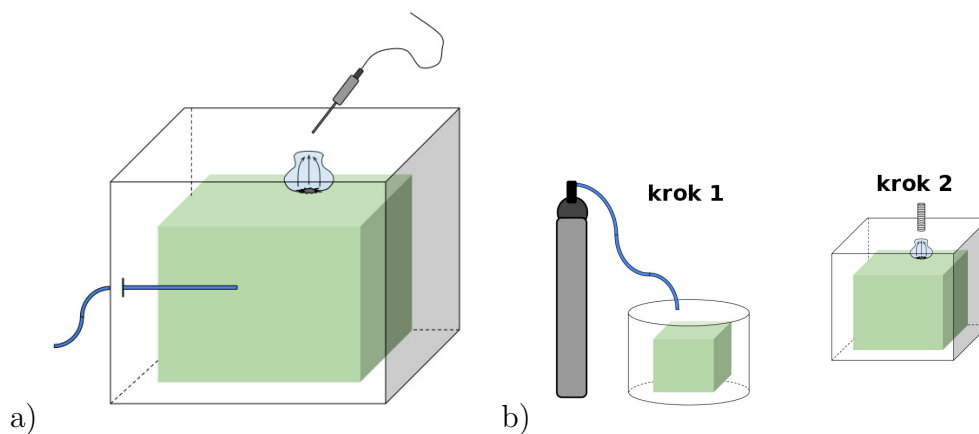


Obrázek 6.7: Hledání netěsností: a) čichací mód, b) vakuový mód.



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

KAPITOLA 6. HLEDÁNÍ VAKUOVÝCH NETĚSNOSTÍ



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

Tabulka 6.3: Kritéria pro netěsnosti.

Název kritéria	[Pa m ³ s ⁻¹]
vodotěsnost	10 ⁻³
parotěsnost	10 ⁻⁴
těsnost pro bakterie	10 ⁻⁵
těsnost pro ropné produkty	10 ⁻⁶
těsnost pro viry	10 ⁻⁷
plynotěsnost	10 ⁻⁸

KAPITOLA 6. HLEDÁNÍ VAKUOVÝCH NETĚSNOSTÍ

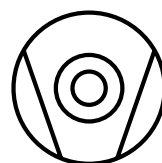
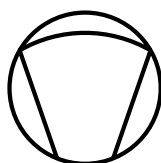
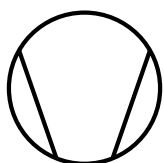
Tabulka 6.4: Kritéria netěsností pro různé objekty a prvky.

Název kritéria podle objektu	[Pa m ³ s ⁻¹]
těsnost nádrží a potrubí	10 ⁻¹ –10 ⁻³
těsnost výměníků tepla	10 ⁻⁴
těsnost nádob pro zkapalněné plyny	10 ⁻⁶
těsnost elektronických součástek	10 ⁻¹⁰
těsnost pouzdra baterie kardiostimulátoru	min. 10 ⁻¹⁰

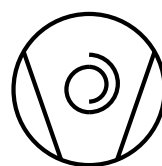
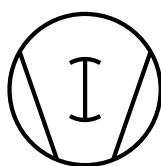
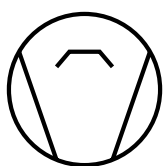
Kapitola 7

Dodatky

7.1 Vakuové značky



vývěva - obecný symbol membránová vývěva turbomolekulární vývěva

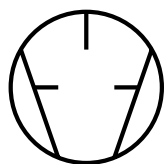


difuzní vývěva

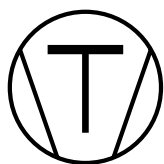
Rootsova vývěva

Scroll vývěva

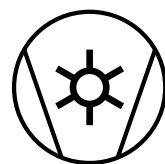
Tabulka 7.1: Značky pro vakuové prvky ve schématech [1].



rotační lopatková vývěva



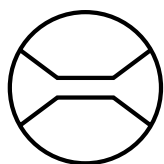
pístová vývěva



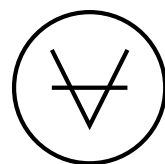
vodokružní vývěva



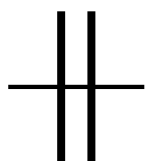
sublimační vývěva



průtokoměr



manometr



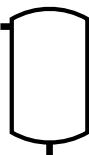
rozebíratelný spoj



flexibilní spoj



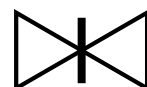
vymrazovačka



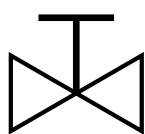
vakuová komora



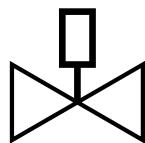
ventil - obecný symbol



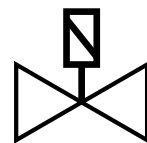
deskový ventil



ventil ovládaný ručně



pneumatický ventil



elektromagnetický ventil

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

7.2 Fyzikální konstanty

náboj elektronu	$e = 1,602177 \times 10^{-19} \text{ C}$
hmotnost elektronu	$m_e = 9,109389 \times 10^{-31} \text{ kg}$
hmotnost protonu	$m_p = 1,672623 \times 10^{-27} \text{ kg}$
měrný náboj elektronu	$e/m_e = 1,758819 \times 10^{11} \text{ C kg}^{-1}$
atomová hmotnostní jednotka	$m_u = 1,660539 \times 10^{-27} \text{ kg}$
univerzální plynová konstanta	$R = 8,314510 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Planckova konstanta	$h = 6,626075 \times 10^{-34} \text{ J s}$
Stefanova–Boltzmannova konstanta	$\sigma = 5,67051 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
Boltzmannova konstanta	$k = 1,380658 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
Avogadrova konstanta	$N_A = 6,022136 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
permitivita vakua	$\epsilon_0 = 8,854187 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$
permeabilita vakua	$\mu_0 = 1,256637 \times 10^{-6} \text{ H m}^{-1}$

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 vnějšku chlazena vodou.	34
3.10	Molekulární vývěva.	35
3.11	Turbomolekulární vývěva - horizontální uspořádání: 1 - rotor, 2 - vstup a 3 - výstup.	36

SEZNAM OBRÁZKŮ

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 vztažená 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 měřící kapiláry.	44
4.4	Membránový manometr: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - membrána a 3 - mechanický ukazatel se stupnicí.	46
4.5	Trubičkový manometr: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - Bourdonova trubice a 3 - mechanický ukazatel se stupnicí.	46
4.6	Vlnocový manometr: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - pružný vlnovec 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	Piraniho manometr: 1 - připojení měřeného tlaku, 2 - tenké kovové vlákno a 3 - elektrické průchodky.	51
4.10	Termočlánekový 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	Viskózní 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

SEZNAM OBRÁZKŮ

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 plynů: 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 plynů: 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	Kvadrupólový 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	Kvadrupólový spektrometr: souřadnicový systém pro odvození funkce separátoru.	71
5.9	Stabilní a nestabilní řešení pro kvadrupólový spektrometr: P - pracovní přímka.	73
6.1	Halogenový hledač netěsností v čichacím módu: A - anoda, K - katoda.	77
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.	78

SEZNAM OBRÁZKŮ

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 λ je střední volná dráha.	25
4.1	Přehled manometrů pro měření celkových tlaků.	40
4.2	Maximální hodnota koeficientu specifické ionizace ϵ 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 číhací mód 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

Literatura

- [1] T. A. Delchar. *Vacuum Physics and Techniques*. Chapman & Hall, 1993.
- [2] J. F. O'Hanlon. *A User's Guide to Vacuum Technology*. Wiley, 2003.
- [3] A. Roth. *Vacuum technology*. Elsevier, 1990.
- [4] J. Groszkowski. *Technika vysokého vakua*. SNTL, 1981.
- [5] L. Pátý. *Fyzika nízkých tlaků*. Academia, 1968.
- [6] W. Espe. *Technologia hmot vákuovej techniky I,II,III*. SAV, 1960.
- [7] W. H. Kohl. *Handbook of materials and techniques for vacuum devices*. AIP, 1995.
- [8] M. H. Hablanian. *High-vacuum technology a practical guide*. TaWiley & Francis, 1997.
- [9] V. Dubravcová. *Vákuová a ultravakuová technika*. Alfa, 1992.
- [10] A. Berman. *Vacuum engineering calculations, formulas, and solved exercises*. Academic Press, 1992.
- [11] W. Jorisch. *Vacuum Technoloy in the Chemical Industry*. Wiley, 2015.
- [12] A. Tálský a J. Janča. *Speciální praktikum z vysokofrekvenční elektroniky a fyziky plazmatu*. UJEP Brno, 1975.
- [13] P. Lukáč a V. Martišovitš. *Netesnosti vákuových systémov*. Alfa, 1980.

Vakuová fyzika 1

Pavel Slavíček, Vlasta Štěpánová, Jakub Kelar

Vydala Masarykova univerzita
Žerotínovo nám. 617/9, 601 77 Brno
1., elektronické vydání, 2016

ISBN 978-80-210-8473-5

muni
PRESS

ISBN 978-80-210-8473-5