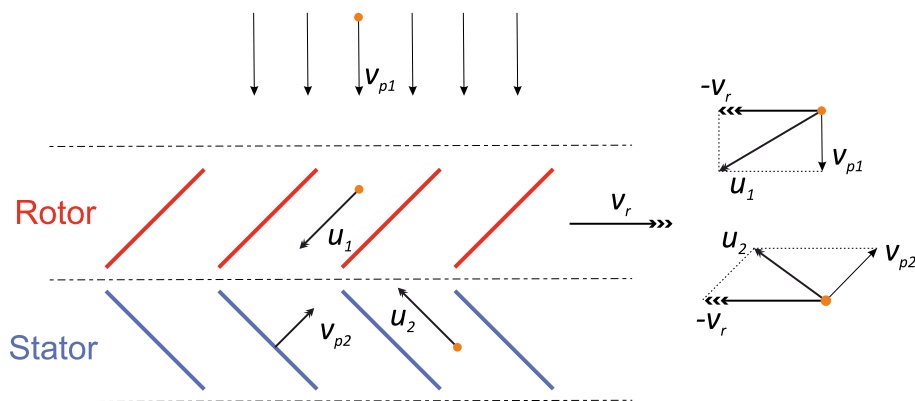


Vakuum turbomolekulární vývěvy

Úloha č. 5

1. Teoretický úvod

Turbomolekulární vývěva (TMV) je transportní vývěva, v níž molekuly získávají přídatnou složku rychlosti přenosem impulsu od povrchu lopatek rychle se pohybujícího rotoru. Lopatky rotoru a statoru jsou skloněny vůči ose otáčení v opačném směru a jejich uspořádání, Obrázek 1, umožňuje převládající tok molekul jedním směrem – směrem čerpání. Pro normální funkci TMV je podstatný molekulární režim proudění čerpaného plynu mezi lopatkami, a proto musí být na výstupu zajištěno dostatečné pomocné vakuum.



Obrázek 1: Schéma uspořádání lopatek rotoru a statoru TMV a kinematika molekuly s pravděpodobnou rychlostí v_p vůči lopatkám rotoru (letící rychlostí v_r). Osa otáčení je svislá a čerpání probíhá shora dolů.

Sklon a rychlý pohyb lopatek rotoru umožňuje, aby velká část molekul, které k nim z jedné strany přilétají, na ně vůbec nedopadla, ale volně mezi nimi prolétla. Zatímco téměř všechny molekuly, přilétající z opačné strany, na lopatky dopadnou a nemohou rotorem přímo proletět. Na lopatkách statoru se pohyb molekul chaotizuje a termalizuje, na další dvojici rotor/stator se proces opakuje.

Aby impuls předaný lopatkou rotoru molekule měl patřičný vliv na proudění plynu, musí být svou velikostí srovnatelný s impulsem tepelného pohybu molekuly. Tedy rychlost lopatek musí být srovnatelná s rychlostí tepelného pohybu čerpaného plynu. Tato podmínka se snadněji splní pro hlavní složky vzduchu, než pro lehké plyny. V Tabulce 1 jsou shrnuty střední rychlosti tepelného pohybu pro jednotlivé plyny vzduchu. TMV mají velmi vysoké otáčky rotoru, desítky tisíc až 90 tisíc otáček za minutu, čemuž při průměru rotoru 10 cm odpovídá obvodová rychlost 470 m/s . Na poměru rychlostí lopatek rotoru a tepelného pohybu molekul závisí dosažitelný kompresní poměr TMV a to výrazným způsobem. Pro dusík dosahuje hodnot řádu 10^8 až 10^{11} , pro vodík jenom kolem 10^3 až 10^4 (pro TMV s různými rozměry). Nízký kompresní poměr pro vodík je slabou stránkou turbomolekulárních vývěv. Aby mohly úspěšně čerpat ultravakuumovou aparaturu, musí pomocná vývěva zajistit co nejnižší parciální tlak vodíku v prostoru pomocného vakua a na výstupu z TMV. Silná závislost kompresního poměru na hmotnosti molekul čerpaného plynu má však naopak tu výhodu, že prakticky chrání čerpaný prostor před proniknutím těžkých molekul par mazacích olejů z ložisek, která jsou umístěna v prostoru výstupu plynu z TMV. Případně také před proniknutím par oleje z pomocné čerpací vývěvy. Čerpací rychlost je prakticky nezávislá na druhu čerpaného plynu a závisí na geometrii lopatek a jejich rychlosti. V závislosti na výstupním tlaku se dosáhne maximální čerpací rychlosti, když všechny stupně rotorů pracují v podmínkách molekulárního proudění. Proto na rozhraní vysokého a středního vakua závisí čerpací rychlost TMV na čerpací rychlosti pomocné vývěvy. Tedy na tom, jak rychle dovede odčerpávat plyn a udržovat nízký tlak na výstupu TMV. V oblasti velmi vysokého vakua je čerpací rychlost TMV prakticky konstantní až do úrovně, kde se projevuje konečný

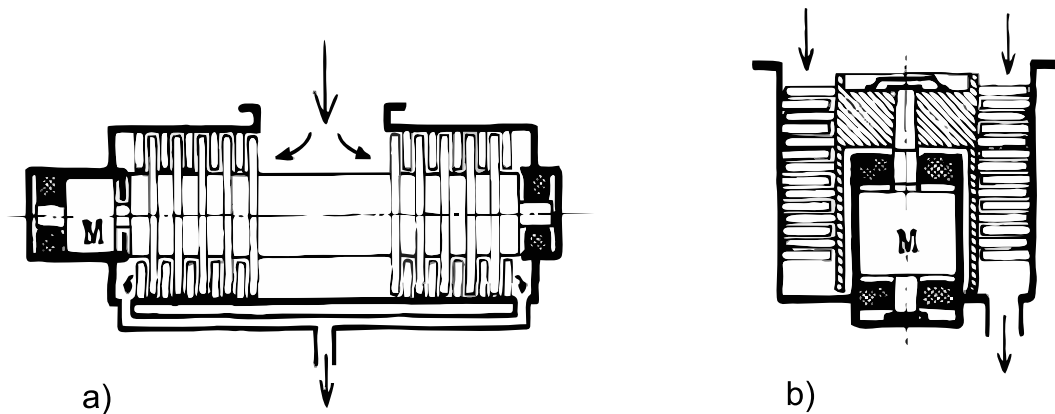
kompresní poměr. To je když molekulární tok proti směru čerpání, úměrný rozdílu výstupního a vstupního tlaku, se přiblíží toku ve směru čerpání.

H ₂	He	H ₂ O (pára)	N ₂	O ₂	Ar	CO ₂
1754 m/s	1245 m/s	585 m/s	470 m/s	460 m/s	394 m/s	375 m/s

Tabulka 1: Přibližné hodnoty středních rychlostí tepelného pohybu pro vybrané plyny

Hlavní výhodou TMV je prakticky čisté vakuum bez olejových par. Aby se omezilo vztlínání oleje po odstavení vývěvy, napouští se vývěva suchým vzduchem nebo dusíkem. K omezení kontaminace olejem směřuje uložení rotoru v magnetických ložiscích. Pro zajištění čistého pomocného vakua slouží rovněž místo ROV membránová vývěva, tou ale nelze dosáhnout tak nízkého tlaku. Tento problém řeší zařazení dalšího čerpacího stupně mezi TMV a membránovou vývěvu. Jedná se o molekulární vývěvu v provedení podle Holwecka. Tu představuje hladký válec – rotor, který se otáčí vysokou rychlostí ve statoru, v jehož vnitřním povrchu je kanál ve tvaru šroubovice. Stěna mezi jednotlivými závitmi tohoto kanálu má jen nepatrně větší průměr, než je průměr hladkého válce. Plyn v kanálu je v kontaktu s rychle se točícím válcem a je transportován ve směru rotace válce. Podél kanálu vzrůstá tlak plynu, který vede k jeho prosakování mezi sousedními závitmi kanálu štěrbinou mezi rotorem a státorem. Proto tato štěrbinina musí být co nejmenší, aby měla pro stlačovaný plyn malou vodivost. Tato molekulární vývěva pracuje (čerpá plyn) i v oblasti viskózního proudění při tlaku, který již několikastupňová membránová vývěva dokáže zajistit. Konstrukčně je tento Holweckův stupeň součástí TMV, s nímž je na společné hřídeli a jeho rotor se otáčí spolu s rotorem TMV.

Základní konstrukční uspořádání vlastní TMV je buď jedno- nebo dvouproudé, viz Obrázek 2, přičemž v současnosti převládá jednoproudové uspořádání. Čisté TMV mívají výstupní tlak řádu 1 až 10 Pa. Běžně se setkáme s TMV s Holweckovým stupněm, který umožňuje předčerpání na řádově vyšší tlak, kterým do plného čerpání od zapnutí stačí několik minut. Ve srovnání s difuzní olejovou vývěvou má TMV několikrát menší příkon, ale podstatně složitější konstrukci, což značně zvyšuje jejich cenu.



Obrázek 2: Schéma uspořádání turbomolekulární vývěvy; a) dvouproudové, b) jednoproudové, M – motor

2. Měření na aparatuře s turbomolekulární vývěvou

Měření provedete na kovové aparatuře, její schéma je na Obrázku 3. Recipient (nerezový kříž) aparatury čerpá kombinovaná TMV s Holveckovým stupněm, předčerpávána membránovou vývěvou. Čerpací jednotka, včetně membránové vývěvy má automatické řízení čerpacího procesu. Tlak v aparatuře je měřen v plném rozsahu kombinovaným manometrem (Piraniho a Penningův vakuometr). To umožňuje nepřetržité sledování tlaku od atmosférického až do velmi vysokého vakua. Jiný Piraniho vakuometr umožňuje měřit tlak na úrovni pomocného vakua, do kterého je možné řízeně napouštět plyn přes jehlový ventil. Celokovová komora, těsněná kovovým těsněním (Con-flat), je obalena topnými pásky, které umožňují její vyhřátí na teplotu cca 100 °C. Ke komoře je z jedné strany připojen kvadrupólový hmotnostní analyzátor, ovládaný přes počítač.

Před samotným měření si prostudujte návod k programu TalkStar, zejména jak funguje ukládání a konverze dat pro následné zpracování!

2.1. Úkol 1: Čerpací proces turbomolekulární vývěvy s vypékáním aparatury

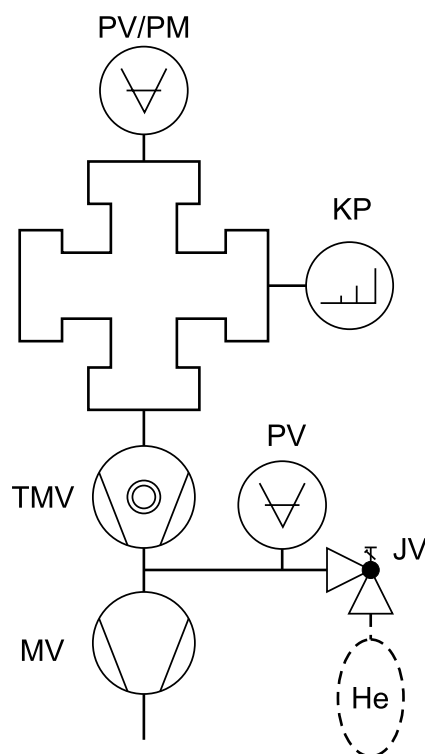
1. Seznamte se s aparaturou a návodem k obsluze TMV.
2. Komoře je zavzdušněna, aparatura odstavena, vakuometry vypnuty.
3. Zkontrolujte uzavření napouštěcího a jehlového ventilu.
4. Zapněte počítač a vakuometr.
5. V následujícím budete sledovat pokles tlaku v závislosti na čase a zaznamenávat hodnoty.
6. Stiskněte tlačítko start ($t = 0$).
 - Tím se zapne membránová vývěva a současně i TMV.
7. Tlak v čerpané aparatuře bude klesat pozvolna do hodnoty ~ 100 Pa.
8. Následně dojde prudkému poklesu tlaku do řádu 10^{-3} , kdy TMV vyčerpá většinu plynu z aparatury.
9. Po dosažení maximálních otáček se značně zpomalí pokles tlaku v závislosti na čase – nastává odplyňování aparatury.
10. Pokračujte v záznamu poklesu tlaku i během dalších úkolů.

2.2. Úkol 2: Složení zbytkové atmosféry – Hmotnostní spektrum

1. Aparatura je čerpána v blízkosti mezního tlaku bez vypékání recipientu.
2. Spusťte program TalkStar, připojte kvadrupólový analyzátor a zapněte jeho žhavení.
3. Pomocí funkce „Scan“ zaznamenejte hmotnostní spektrum.
4. Toto měření provedete ještě jednou před ukončením praktik, výsledky následně porovnejte v protokolu.

2.3. Úkol 3: Složení zbytkové atmosféry – Parciální tlak

1. Aparatura je čerpána v blízkosti mezního tlaku bez vypékání recipientu.
2. V programu TalkStar spusťte funkci „Trend“ pro záznam parciálních tlaků.
3. Pro dosažení nižších mezních tlaků je potřeba urychlit odplyňování stěn aparatury.



Obrázek 3: Schéma aparatury čerpané TMV a měření složení zbytkové atmosféry; MV – membránová vývěva, KP – kvadrupólový hmotnostní analyzátor, JV – jehlový ventil, He – balonek s heliem, PV/PM – kombinovaný vakuometr, PV – Piraniho vakuometr.

4. Společně zapneme vyhřívání recipientu a v následujícím sledujte a zaznamenávejte změnu parciálních tlaků a pokles celkového tlaku v komoře.

- Aparatura bude vyhřívána po dobu 20 min.
- Následně budete sledovat vývoj tlaku dalších 20 minut během chladnutí recipientu.

2.4. Úkol 4: *Ověření malého kompresního poměru*

1. Od tohoto úkolu nemusíte měřit pokles celkového tlaku.
2. Aparatura je čerpána v blízkosti mezního tlaku bez vypékání recipientu.
3. V programu TalkStar spustíte funkci „Trend“ pro záznam parciálních tlaků.
4. Na jehlový ventil připojte balónek s heliem a pomalu připouštějte helium pod turbomolekulární vývěvu.
5. Současně by se neměl výrazně měnit tlak měřený Piraniho měrkou pod TMV.
6. Sledujte a zaznamenávejte vývoj parciálního tlaku helia v aparatuře.

2.5. Úkol 5: *Závislost tlaku nad TMV na otáčkách rotoru vývěvy*

1. Aparatura je čerpána TMV (při maximálních otáčkách) v blízkosti mezního tlaku.
2. Spustíte záznam programu „Trend“ a následně stisknete start/stop tlačítko na řízení TMV.
3. Sledujte pokles tlaku a vývoj parciálních tlaků lehkých plynů.
4. Tlak nesmí překročit hodnotu 10^{-3} Pa, jinak dojde k poškození kvadrupólového analyzátoru.
5. Při přiblížení k hodnotě 10^{-3} Pa buďte připraveni opět stisknout start/stop tlačítko.

Odstavení aparatury

1. TMV běží na plné otáčky, kvadrupólový hmotnostní analyzátor je zapnutý.
2. Pomocí programu TalkStar vypneme záznam měření, vypneme žhavení a následně odpojíme kvadrupólový hmotnostní analyzátor.
3. Stiskneme tlačítko start na TMV a sledujeme pokles otáček.
4. Po zastavení TMV je možné zavzdušnit aparaturu pomocí napouštěcího ventilu.

3. Požadované výsledky

1. Graf změny celkového tlaku v závislosti na čase s popisem a diskusí jednotlivých jeho částí.
2. Porovnejte a komentujte grafy hmotnostních spekter (na začátku a konci měření), pro 8 - 10 maxim určete o které plyny se jedná.
3. Komentujte změny parciálních tlaků během vyhřívání a chladnutí aparatury.
4. Vysvětlete a diskutujte vzrůst parciálního tlaku helia při jeho připouštění pod TMV. Jak je možné, že heliem naměříte v recipientu, když je připouštěno na výstupu TMV.
5. Vysvětlete a diskutujte změny parciálních tlaků během poklesu otáček TMV. U kterých plynů budou narůstat rychleji hodnoty parciálních tlaků a proč?

Reference

- [1] KRÁL, JAROSLAV: *Cvičení z vakuové techniky*, Skriptum FJFI ČVUT, Praha, 2015
- [2] ČEŠPIRO, ZDENĚK: *Vakuová technika*, Skriptum FJFI ČVUT, Praha, 1973
- [3] JOUSTEN, KARL: *Handbook of Vacuum Technology*, 2nd edition, ISBN 978-3-527-41338-6, Berlin, 2016