

Vakuumske črpalke

Stanko Manojlovič, 28030341
Mentor: dr. Primož Ziherl
Fakulteta za matematiko in fiziko

10. maj 2008

1. Uvod

Vakuumske črpalke so nujen del vsakega raziskovalnega laboratorija ob pravilni uporabi in tesnjenju komore. Aplikacije so mogoče na mnogih področjih, kot so: elektronsko varjenje, hladno varjenje, vakuumsko pakiranje, naprevanje tankih slojev, toplotna izolacija, elektronska mikroskopija, vakuumska destilacija... Seminar opisuje principe delovanja vakuumskih črpalk in sposobnosti doseganja nizkih tlakov [1].

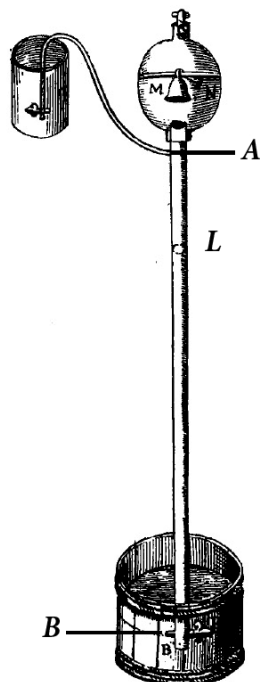
2. Zgodovina

Vakuumske črpalke so naprave, s katerimi lahko odstranimo molekule plinov iz zaprtega prostora. S tem lahko ustvarimo delni vakuum.

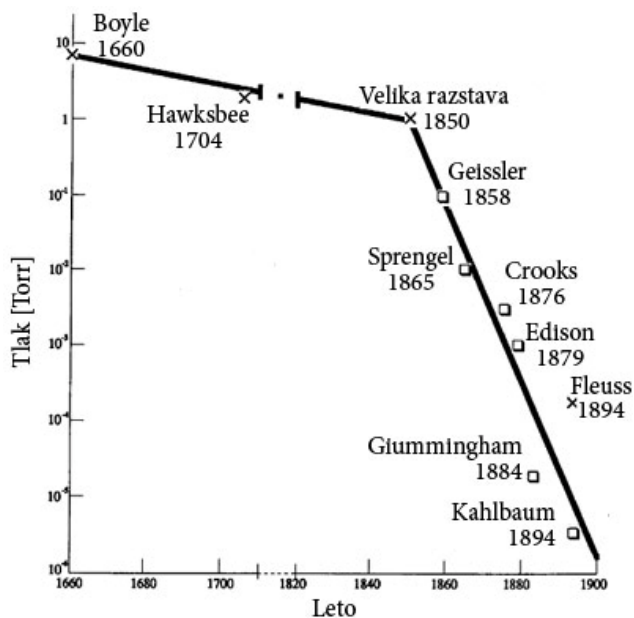
Zgodovina vakuumskih črpalk je dolga, saj so se prve ideje pojavila leta 1631. Deset let pozneje je Reneri iz Leidena naredil prvo vakuumsko črpalko (slika 1). Delovala je po sledečem principu:

Bučka na vrhu je bila napolnjena z zrakom, v njej pa je bil zvonec. Iz bučke je do dna lesenega soda potekala 11 metrov dolga cev. Ko je odprl ventil B, se je gladina vode spustila na višino L, s čimer je nad seboj ustvarila podtlak. Nato je Reneri premaknil napravo, da je premaknil zvonec. Zvonec je vseeno zazvenel, zato so eksperiment imeli za neuspeh. Dejansko se zvok ni širil po zraku znotraj buče, ampak je zavibrirala celotna konstrukcija [2].

Razvoj vakuumskih črpalk in njihovih doseženih podtlakov prikazuje slika 2. Hitra osvežitev spomina: 1 torr = 133.3 Pa.



Slika 1: Shema prve vakuumske črpalke iz leta 1631. Črpalka je sestavljena iz treh delov. Na vrhu je bučka, nato sledi dolga votla palica, na dnu pa čeber vode. Palico so napolnili z vodo do točke A. Ko so odprli ventil B, se je gladina vode spustila na višino L [2].



Slika 2: Razvoj vakuumskih črpal in njihovi izumitelji do leta 1900. Na vodoravni osi je navedeno leto izuma, na navpični osi pa dosežen tlak v torrjih [3].

3. Vakuum

Vakuum je prostor, ki ne vsebuje snovi. Besedo vseeno uporabljamo že za tlake, ki so nižji od normalnega zračnega tlaka $1 \text{ bar} = 101300 \text{ Pa}$ [4].

Tako ločimo vakuum v 4 podkategorije:

Nizek oz. grobi vakuum	100 kPa – 3 kPa
Srednji vakuum	1 kPa - 100 mPa
Visok vakuum	100 mPa – 100 nPa
Ultravisok vakuum	100 nPa – 100 pPa

V vesolju je tlak $100 \text{ }\mu\text{Pa} - 3 \text{ fPa}$, kar navadno imenujemo »deep space vacuum« [4].

Idealni vakuum ni dosegljiv niti nikjer ne obstaja. Če bi obstajal, bi bila tam tudi temperatura enaka 0, kar pa vemo, da ni mogoče [5].

Za doseganje vseh stopenj vakuuma uporabljamo različne vrste črpalk, ki so obravnavane v naslednjem poglavju.

4. Vrste vakuumskih črpalk

Črpalke v osnovi ločimo glede na način delovanja. Te so:

Črpalke na pozitivni izmik (positive displacement pump) delujejo tako, da plin v komoro preide ciklično, ventil nato zatesni dovodno cev. Zaradi različnih mehanskih procesov se v komori poveča tlak, kar iztisne plin v ozračje.

Molekularne črpalke (momentum transfer pump, molecular pump) izkoriščajo curke zelo viskoznih tekočin pri velikih hitrostih, ki odnašajo molekule iz komore. Nekatere delujejo tudi po principu hitro vrtečih se lopatic, ki izbijajo molekule iz vakuumske komore.

Črpalke na zajem (entrainment pumps) ujamejo molekule plina v trdno ali tekočo snov. Poznamo jih tudi kot ionske črpalke, kriočrpalke [6]...

Črpalke na pozitivni izmik

Fiziko teh črpalk lahko v prvem približku popišemo z enačbo stanja idealnega plina

$$p_1 V_1 = nRT, \quad (1.1)$$

kjer je p_1 tlak, V_1 prostornina, n število molov snovi, T temperatura, R plinska konstanta $8,314 \text{ J / mol K}$.

Kompresijsko razmerje, ki ga črpalka premore, je navadno podano s strani proizvajalca, lahko pa ga tudi sami izmerimo. Definirano je kot razmerje med maksimalno in minimalno prostornino.

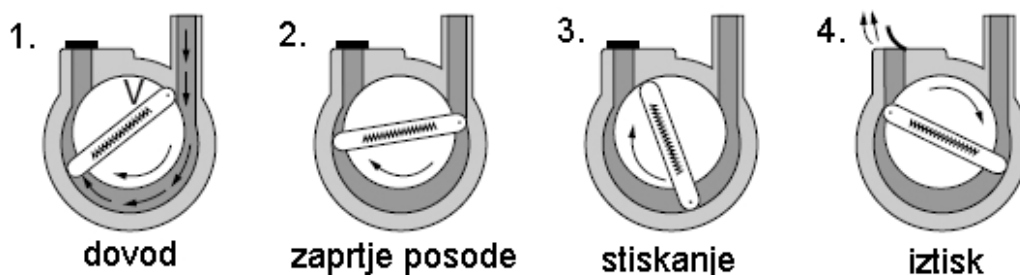
V primeru, ko imamo izotermno razpenjanje plina, je tlak za vsak cikel podan kot

$$p_n = \frac{V_1 p_{n-1}}{V_2}. \quad (1.2)$$

Tu je p_n tlak pri n-tem koraku, V_1 prostornina na začetku stiskanja in V_2 prostornina na koncu stiskanja. V_1 in V_2 se ne spreminjata. V idealnem primeru (vsi deli stroja popolnoma tesnijo) bi tako lahko vsaka črpalka dosegla popoln vakuum, a zaradi fizičnih preprek to ni mogoče.

Lopatične črpalke

Znotraj velikega cilindra je postavljen rotor (slika 3). Ta nima enakega osišča kot valj, torej je postavljen ekscentrično glede na valj. Na rotorju so pomične lopatice, ki imajo možnost gibanja v radialni smeri. Vzmeti znotraj lopatic potiskajo lopatice v radialni smeri, da zatesnijo stik med rotorjem in valjem. Rotor z lopaticami tako deli valj na dve komori. Vsaki od teh komor se v enem delu obrata prostornina povečuje, pri čemer komora sesa plin skozi dovodno cev, v drugem delu pa se komora manjša in iztiska plin v okolico. Ta proces se izvede dvakrat (enkrat za vsako komoro) na vsak obrat rotorja [6].

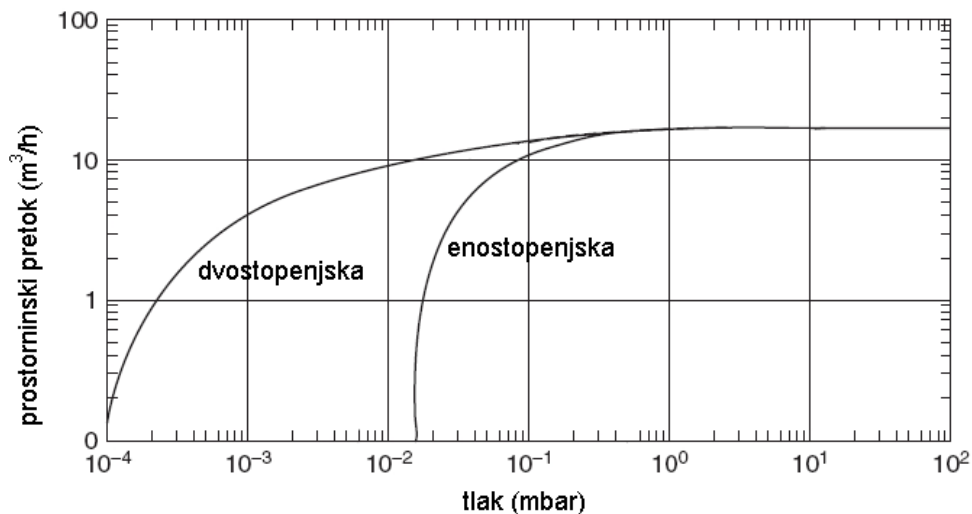


Slika 3: Shema delovanja enostopenjske lopatične črpalke. 1. Vstop plina v sistem. 2. Notranja vzmet potisne lopatico ven, ta zapre posodo 3. Plin zgrabijo lopatice in ga potiskajo v smeri rotacije, prostornina komore se manjša. 4. Prostornina komore se zmanjša, zato se poveča tlak, kar povzroči iztisk plina iz črpalke [6].

Lopatične črpalke proizvajalci izdelujejo v enostopenjski in dvostopenjski izvedbi. Dvostopenjska črpalka je sestavljena iz dveh zaporedno vezanih enostopenjskih črpalk, delovanje posamezne črpalke pa je popolnoma enako. Enostopenjske črpalke lahko v najboljšem primeru dosežejo tlake do 1 Pa, dvostopenjske pa vse do 0.01 Pa (slika 4) [6].

Maksimalen prostorninski pretok se razlikuje glede na velikost lopatične črpalke. Laboratorijske črpalke navadno prečrpajo nekaj 10 m^3 plina na uro, industrijske črpalke, ki so večje, pa omogočajo pretok do nekaj $100 \text{ m}^3/\text{h}$ [6].

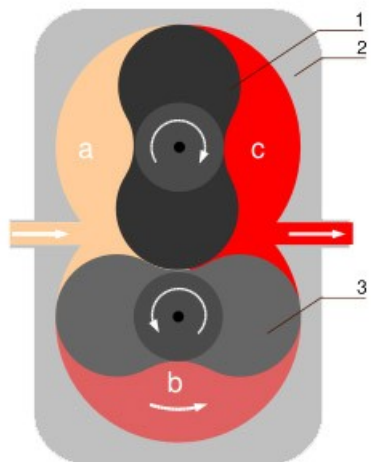
Minimalen dosežen tlak je omejen zaradi tesnenja določenih komponent znotraj črpalke. Plin navadno uhaja na mestih, kjer se lopatice stikajo z zunanjim ogrodjem. Prav tako je zelo težko zatesniti vrh rotorja in ogrodja.



Slika 4: Hitrost črpanja za tipično enostopenjsko in dvostopenjsko črpalčko. Na vodoravni osi je podan tlak na dovodni strani črpalke, na navpični osi je podan prostorninski pretok [6].

Rootsov pihalnik

Osnovni mehanizem je zgrajen iz dveh rotirajočih delov (številki 1 in 3 na sliki 5). Ta pri rotaciji ustvarjata zatesnjeno komoro c, v kateri se zaradi manjšanja prostornine večja tlak. Ko tlak v komori preseže zunanjega, iztisne plin iz črpalke.



Slika 5: Osnovni koncept Rootsovega pihalnika. Komore so označene s črkami, komponente s številkami. Na levi strani je narisan dovod plina, na desni odvod. S številčkama 1 in 3 sta označena rotorja, ki se vrtita v nasprotnih smereh [7].

Rootsov pihalnik doseže veliko hitrost črpanja, zato je idealen za industrijske aplikacije (poglavje 5). V idealnem primeru bi količino pretočenega plina lahko izračunali kot:

$$V_c = 3V_0vt, \quad (2.1)$$

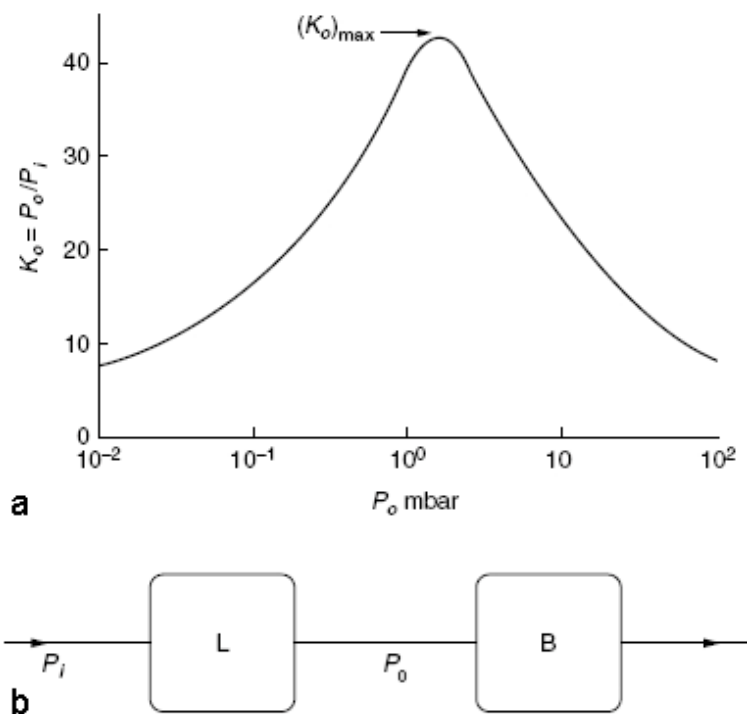
kjer je V_c celotna pretočena prostornina v nekem času t , V_0 maksimalna prostornina komore a (slika 5), v frekvenca rotacije, t čas obratovanja črpalke. V enačbi (2.1) nastopi faktor 3, saj črpalka v vsaki rotaciji zajame dovodni plin trikrat [6].

Črpalka deluje odlično v ozkem tlačnem območju (slika 6a). Kompresijsko razmerje je

$$K = \frac{p_0}{p_i}, \quad (2.2)$$

kjer je p_0 izhodni tlak, p_i vhodni tlak.

Zaradi dobrega kompresijskega razmerja v določenem območju je potrebno za hitro in učinkovito doseganje nizkih tlakov Rootsov pihalnik uporabiti zaporedno z drugimi vrstami črpalk. Te imenujemo pomožne črpalke. Kot pomožno črpalke lahko uporabimo tudi lopatično črpalke (slika 6b) [6].



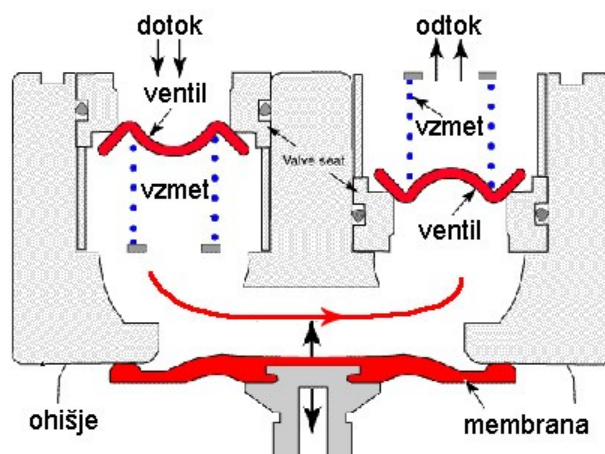
Slika 6: Tipično kompresijsko razmerje za Rootsovo črpalke. (a) Na vodoravni osi je podan tlak v milibarjih, na navpični osi pa kompresijsko razmerje. Zaporedna vezava Rootsove črpalke L in pomožne črpalke B (b). P_i je tlak vakuumske komore, P_o je pa izhodni tlak črpalke L [6].

Na sliki 6 lahko opazimo vrh pri tlaku približno 1 mbar, ki je enak za vse Rootsve črpalke. Pri višjih tlakih pade kompresijsko razmerje zaradi povratnega uhajanja plinov med stiskanjem. Pri nizkih tlakih (manj od 0.1 mbar) pa pade K_0 zaradi uhajanja plinov zaradi prevelike razlike med tlakom v komori in zunanjim (kamor črpamo plin).

Membranske črpalke

Membranske črpalke delujejo na principu premikajoče se membrane. Ta se upogiba, kar veča in manjša sesalno komoro. Med raztezanjem kapljevina vstopa v komoro. Zaradi nižjega tlaka kot v vakuumski komori se dovodni ventil odpre. Nato se membrana napne v drugo smer, poviša tlak nad zunanjega in iztisne plin iz komore. Tlak znotraj sesalne komore, ki je po stisku višji od zunanjega povzroči, da se odpre odvodni in zapre dovodni ventil. Osnovna shema je prikazana na sliki 7 [8].

Črpalke se ločijo po kategorijah še glede na način premikanja membrane. Silo na membrano lahko povzroči mehansko gibanje delov ali hidravlična tekočina na drugi strani membrane [8].



Slika 7: Osnovna shema delovanja membranske črpalke. Membrana se giblje v navpični smeri, kar povzroča večanje in manjšanje komore, s čemer se spremeni tlak. Smer plina je označena z rdečo puščico [9].

Omogočajo tudi precej nizke tlake, vendar se karakteristike ločijo v odvisnosti od velikosti membrane.

Odlična lastnost membranskih črpalk je tudi ta, da je mehanizem za premik membrane popolnoma ločen od sesalne komore. Tako nikoli ne pride do kontaminacije komore z drugimi delci [6].

Te vrste črpalk se navadno uporabljajo za laboratorijske namene. Prostorninski pretok je ponovno odvisen od velikosti črpalke oziroma membrane. Membrana je lahko teflonska ali gumijasta [6].

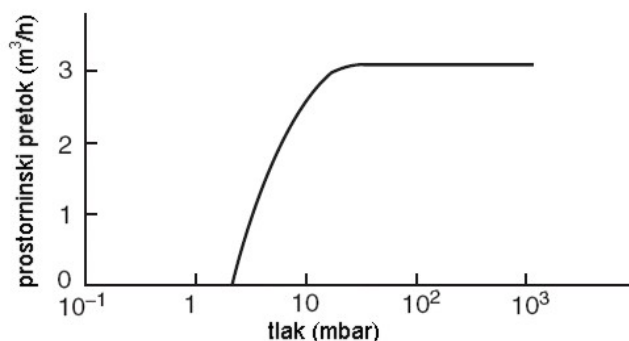
V času t lahko idealna črpalka prečrpa prostornino

$$V_{\max} = \frac{4}{3} \pi r^3 \nu t, \quad (3.1)$$

kjer je V_{\max} maksimalna prečrpana prostornina, r polmer membrane, ν frekvenca cikla in t čas prečrpavanja. Prostorninski pretok se pri določenem tlaku ustavi (slika 8). Pri tem minimalnem tlaku je razlika med tlakom znotraj sesalne komore in zunaj nje prenizka, da bi povzročila odprtje dovodnega ventila. Tako plin ne more več vdirati v sesalno komoro. Torej mora biti izpolnjen sledeči pogoj $F_v < F_p$. Sila vzmeti, ki zapre ventil F_v mora biti manjša od sile plina, ki vdira v komoro:

$$kx = F_v < F_p = \pi r^2 \Delta p = \pi r^2 |p_2 - p_1|, \quad (3.2)$$

kjer je p_1 tlak znotraj sesalne komore, p_2 tlak znotraj vakuumske komore in r polmer dovodnega ventila [6]. Načeloma bi lahko bila vzmet mehkejša, ampak potem bi se dovodni ventil prepočasi zapiral.



Slika 8: Prostorninski pretok v odvisnosti od tlaka za membransko črpalko. Iz grafa je vidno, da ima prostorninski pretok neodvisen od tlaka do meje 10 mbar. Pod približno 3 mbar pa ne deluje več, saj je razlika tlakov premajhna, da bi odprla dovodni ventil [6].

Molekulske črpalke

Turbomolekularna črpalka

Te črpalke delujejo na principu prenosa gibalne količine. Poševne vrteče se lopatice zadevajo v prosto leteče molekule in jim dajo določeno smer (slika 9). Te nato letijo do statorja, kjer se ponovno odbijejo navzdol.

Turbina je sestavljena iz serij rotorjev in stratorjev. Rotor je del črpalke, ki se vrti, stator pa miruje. Vsaka serija naj bi znižala tlak za faktor ~ 10 . Slika 9 prikazuje črpalko tega tipa v prerezu. Črpalka na sliki ima 10 sklopov. Na dovodni strani so lopatice večje in debelejše ter pod večjim kotom. Na njih prav tako deluje večja centrifugalna sila, zato morajo biti tudi močnejše.

V idealnem primeru bi bila črpalka v obliki stožca, vendar je takšna izdelava bistveno bolj zahtevna in dražja. Širši del stožca bi bil zgoraj, tako bi zajeli več molekul, katerim bi se nato večala kinetična energija do dna. Tako so na izhodni strani črpalke že dovolj veliki tlaki.



Slika 9: Prerez industrijsko proizvedene turbomolekularne črpalke. Opazna je razlika med kotom in velikostjo lopatic, ko potujejo molekule iz nižjih do višjih tlakov [10].

Tipična črpalka obratuje z 20000-80000 vrtljaji na minuto, torej s frekvenco 300 – 1200 Hz. Pri teh hitrostih trenje v ležajih ni zanemarljivo. V nekatere črpalke so vgrajeni magnetni ležaji ravno zaradi trenja in možnosti oljne kontaminacije vakuumske komore [6]. Najnižji doseženi tlaki so lahko tudi do 10^{-8} Pa. Vendar ta podatek variira v odvisnosti od mase molekul, ki jih odstranjujemo [6].

Analitično ne moremo rešiti problema prečrpavanja turbomolekularnih črpalk. Kruger in Shapiro sta s pomočjo metode Monte Carlo in empiričnih meritev prišla do sledeče odvisnosti

$$K_0 \propto g(\phi) \exp(U / v_\alpha), \quad (4.1)$$

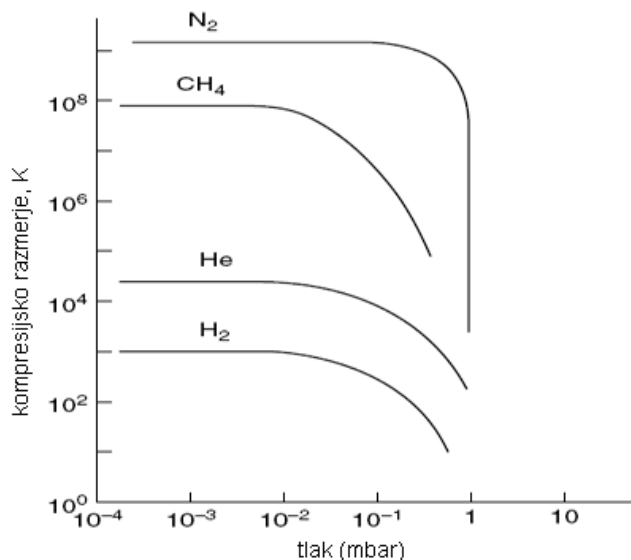
Kjer je $g(\phi)$ funkcija, ki je odvisna od kota pod katerem so lopatice, U hitrost gibanja lopatic, v_α povprečna hitrost molekul po Maxwell-Boltzmannovi porazdelitvi podana kot

$$v_\alpha = \sqrt{2k_B T / m} = \sqrt{2R_0 T / M}. \quad (4.2)$$

Tu je k_B Boltzmannova konstanta, T temperatura, m masa molekule, R_0 plinska konstanta in M molekulska masa [6].

Dobimo, da je kompresijsko razmerje eksponentno odvisno od kvadratnega korena molekulske mase ($K \propto \exp\sqrt{M}$). Helij in vodik, elementa z majhnim masnim številom, sta zato manj primerna za črpanje (slika 10) [6].

Če preidemo nad določen tlak, črpalke nimajo več sposobnosti prečrpavanja, saj rotacija rotorjev povzroči le turbulenco plina znotraj komore [6].



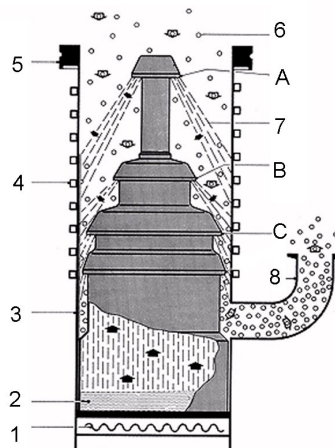
Slika 10: Kompresijsko razmerje v odvisnosti od tlaka za turbomolekularno črpalko. Graf podaja odvisnosti za 4 različne pline [6].

Difuzijska črpalka

Difuzijske črpalke so posebna vrsta črpalk, ki nima gibljivih delov, kar pomeni dolgotrajnejše delovanje. Difuzijske črpalke delujejo po sledečem principu. Na dnu črpalke je grelec (slika 11) in kapljevina. Zaradi segrevanja se poveča tlak kapljevine. Plin kapljevine je usmerjen preko turbin v tesne šobe, ki povzročijo visokotlačne curke. Ti curki sproti odnašajo vse prostoletne molekule. Ko se oljni plin dotakne stene, se kondenzira in steče nazaj v dno posode. Prostim molekulam plina se zaradi usmerjenega gibanja težkih molekul olja poveča hitrost proti izhodu črpalke [11].

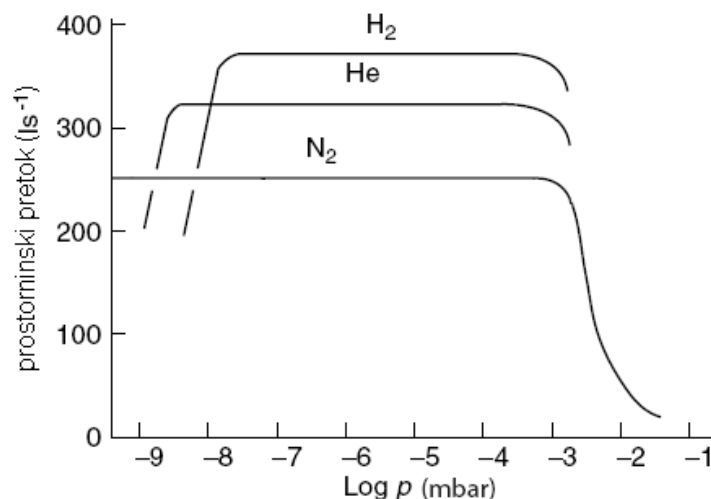
Te črpalke delujejo v zelo širokem območju od 10⁻² do 10⁻¹⁰ Pa. Vse črpalke nujno potrebujejo še vsaj eno predhodno črpalko, navadno Rootsov pihalnik.

Difuzijske črpalke imajo ravno obratno karakteristiko od turbomolekularnih. Prostorninski pretok je večji za lažje molekule, saj prejmejo več gibalne količine. V idealnem primeru lahko dobimo kompresijsko razmerje reda 10⁶ [6].



Slika 11: Standardna oljna molekulska črpalka. Komponente: 1. grelec, 2. olje, 3. odtok in filter, 4. ohlajevalnik, 5. tesnilo, 6. molekule plina, 7. visokotlačni curki plinastega olja, 8. odtok molekul plina, A, B, C, visokotlačne šobe [11].

Slabost difuzijskih črpalk je, da bo nekaj molekul olja vedno pobegnilo v vakuumsko komoro, že zaradi neidealne oblike šob. Te molekule lahko uničijo laboratorijsko opremo in natančne meritve, sploh če so spektroskopske [6].



Slika 12: Prostorninski pretok v odvisnosti od tlaka za 3 različne pline [6].

Črpalke na zajem

Ionska črpalka - Ion pump

Ionske črpalke (ion pump) delujejo po principu elektrostatičnega privlaka. Na komori naredimo električno polje, ki povzroči privlak ionov na elektrodo. V primerih, ko tekočina ne vsebuje ionov, jo moramo ionizirati. To lahko naredimo na dva načina. Lahko dodamo ionizirane molekule, ali pa spustimo skozi tekočino toliko toka, da pride do preboja (v zraku 30 kV/cm).

Na delce deluje sila, ki je po velikosti enaka produktu električnega polja in električnega naboja. Tlak tekočine je tako enak seštevku vseh sil molekul na določeno ploskev.

$$F_1 = q E, \quad (5.1)$$

$$p = \frac{F}{S} = \frac{N q E}{S}, \quad (5.2)$$

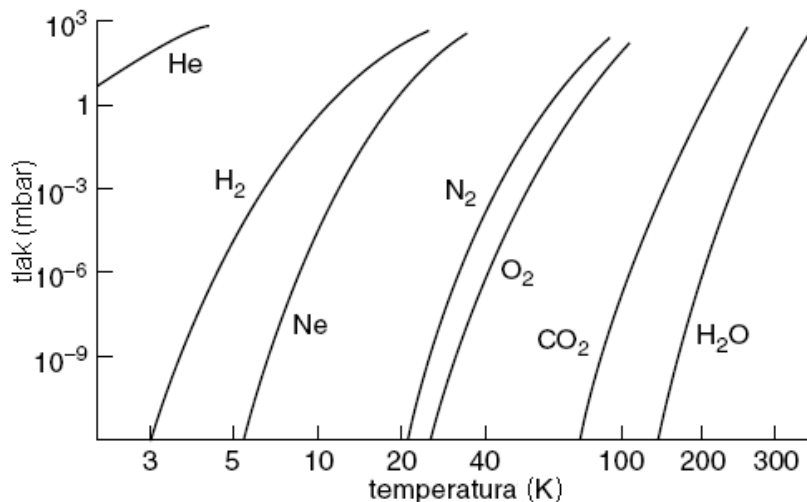
kjer je p je tlak, F_1 sila na eno molekulo, q naboj molekule, N število vseh atomov, S ploskev in E električna poljska jakost.

Obstajajo še izvedbe, kjer uporabljamo snov, ki ujame te molekule (Ion getter pumps). Snov je navadno titan, saj ta kemijsko veže večino drugih snovi.

Kriočrpalka

Kriočrpalke delujejo po principu kondenzacije plinov na hladni površini. Navadno so hlajene s trdnim ogljikovim dioksidom ali tekočim dušikom. Tako so primerne za ustvarjanje vakuumu samo pri določenih pogojih, torej kadar imamo primeren plin. Temperatura plošče mora biti nižja od temperature vrelišča plina (slika 14) [12].

Navadno segrejemo celo komoro do temperature, ki jo lahko prenese. Nato se vklopijo druge vrste črpalk, ki naredijo visok ali ultravisok vakuum. Ko je tlak že zelo nizek ($\sim 10^{-4}$ Pa), se začne ohlajevanje. To poteka do temperature, ki bo nižja od temperature vrelišča snovi, ki jo skušamo izčrpati [6].



Slika 14: Na vodoravni osi lahko odčitamo temperaturo kondenzacije plinov pri različnih tlakih. Tako lahko vemo, do katere temperature moramo ohladiti vakuumsko komoro z kriočrpalko [6].

5. Uporaba vakuumskih črpalk

Vakuumska tehnika je uporabljena v mnogih vejah moderne industrije. Spodaj so navedeni najbolj zanimivi in uporabljeni postopki v industriji.

Vakuumska metalurgija

Nečistoče v jeklu spremenijo njegovo strukturo in tako tudi mehanske lastnosti. Zato moramo že iz taline kovin v čim večji meri odstraniti vodik, kisik, dušik... V industriji se v ta namen uporabljajo vakuumski postopki, ki temeljijo na razplinjevanju med litjem taline (degazacija). Ti postopki potekajo pri tlakih 1 mbar. Z razvojem vakuumskih tehnologij je prišlo do dramatičnih izboljšanj lastnosti nerjavečih jekel (žilavost in korozijska obstojnost) [13].

Obdelava materialov v vakuumu z elektronskim curkom

Elektronski curek lahko uporabljamo za rezanje kovin in zlitin. Operacija rezanja z elektronskim curkom je zelo precizna, poškodbe reznega roba kovin pa so zelo majhne. Naredimo lahko luknjice velikosti od 10 μm do 200 μm , globina reza je največ 1 mm, velikost pa 50–100 $\mu\text{m} \times 1000–2000 \mu\text{m}$ [13].

Vakuumske tanke plasti – naparevanje

Material, ki ga želimo nanesti, uparimo z izparevanjem ali sublimacijo. Izparjeni atomi ali molekule imajo termično energijo 0.1eV pri 1500°C. Značilen tlak v vakuumski posodi je 10^{-5} mbar in zagotavlja izparjenim atomom ali molekulam dovolj veliko prosto pot, da lahko prispejo na podlago brez trkov z molekulami plina [14].

Plazemsko čiščenje

Ioni, ki jih proti podlagam pospeši plazemski potencial, skupaj z elektroni, sevanjem iz plazme in segrevanjem površine odstranijo adsorbirane delce na površini. Ta proces je ponovljiv in ne vsebuje kemijskih preparatov (kot so halogenidni ogljikovodiki, s katerimi so to počeli včasih) [14].

Farmacija in prehrabena industrija - liofilizacija

Večina produktov biološkega izvora je zelo pokvarljivih, če jim ne odvzamemo vode. Liofilizacija je postopek odstranitve vode iz temperaturno občutljivih bioloških in anorganskih snovi z vakuumskim sušenjem iz zamrznjenega stanja. Postopek poteka v dveh korakih. V prvem koraku odstranjujemo vodo s sublimacijo, v drugem pa z desorbicijo. Liofilizirani preparati so stabilni pri sobni temperaturi skozi daljše časovno obdobje. Ta postopek je počasen in zanj potrebujemo trikrat več energije, kot pri konvencionalnem sušenju (segrevanje), zato se upravlja le za sušenje dragih in temperaturno občutljivih vzorcev. Ti vzorci so: farmacevtski izdelki, biološki vzorci, transplantacijski material za kirurške namene in nekaj tudi v prehrabeni industriji [14].

Elektroindustrija, elektronika in mikorelektronika

Vakuuum izkoriščamo za proizvodnjo svetlobnih virov, za izdelavo različnih komponent (močnostna stikala in plinski odvodniki) [13, 14].

Vakuuum v toplotni izolaciji

Prevajanje toplote po plinu (konvekcija) med stenama z različno temperaturo poteka skoraj neodvisno od tlaka. Šele pri tlaku, ko je povprečna prosta pot molekul plina večja od razdalje med ploščama, pride do spremembe. V medprostoru ne obstaja temperaturni gradient,

zato plinu ne moremo pripisati toplotne prevodnosti. V teh primerih uporabljamo akomodacijski koeficient, ki nam samo pove kolikšen del kinetične energije preda molekula pri določeni hitrosti steni [14].

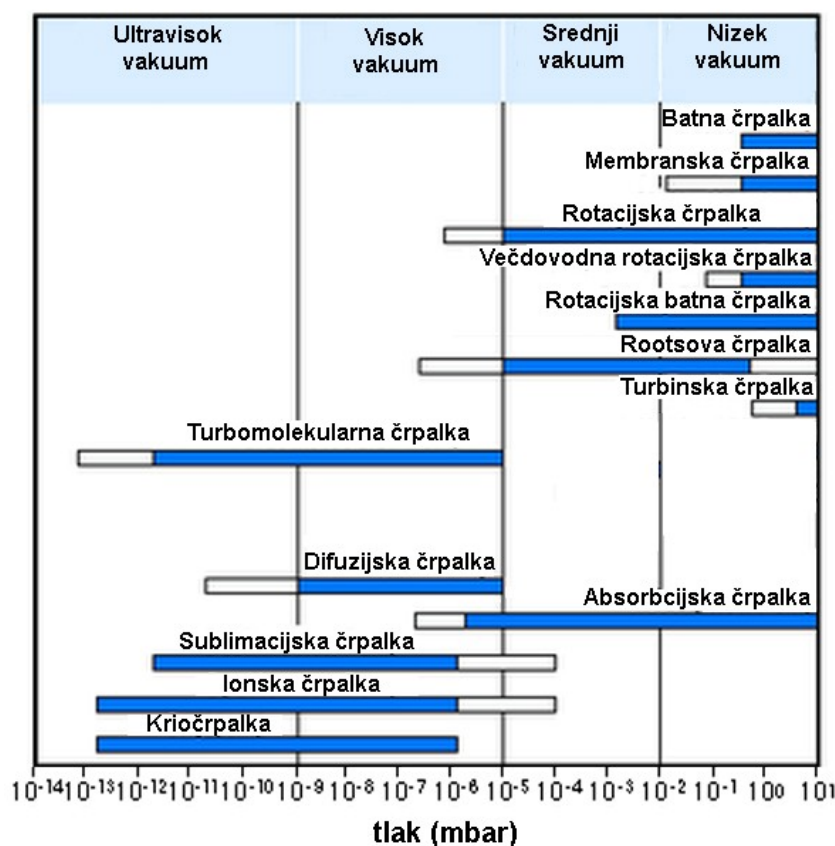
Uporaba vakuumu pri znanstvenih raziskavah

Vakuuum je osnova za delovanje sodobnih analitskih naprav, kot so vrstični, presewni in tunelski elektronski mikroskop, fotonski in masni spektrometer. V večini teh naprav potrebujemo visoke vakuume. Posebej pomembne vakuumske naprave so pospeševalniki delcev (sinhrotroni), kjer potrebujemo ultra visok vakuum, da ne prihaja do interakcij med delci, ki jih pospešujemo, in okoljskim plinom [14].

6. Sklep

Vse črpalke lahko povzamemo z naslednjim diagramom, ki najlepše predstavi območje delovanja (slika 15). Tako lahko tudi ustrezno vežemo več zaporednih črpalk, eno za drugo (navadno dve). Na sliki 15 je vidno, da najnižji tlak lahko dosežemo s turbomolekularno črpalko, ionsko in kriočrpalko.

V seminarju smo predstavili le nekaj vrst najbolj zanimivih ali uporabnih črpalk. Te se ločijo po mnogo karakteristikah zato je njuno potrebno vedeti kako delujejo in za kaj so primerne. Dandanes in v prihodnosti se bodo prodajale črpalke kar v sklopih. Podjetja že ponujajo komplete, ki jih kar vklopimo na komoro in dosežemo dobljeni tlak [15].



Slika 15: Vsi tipi črpalk, povzeti v enem diagramu. Na vodoravni osi je naveden tlak, ki ga dosežajo črpalke. Nato so po vrsticah navedene določene črpalke. Pregledno lahko sestavimo sistem, ki bo ustrezal našim potrebam [16].

7.Viri

- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum_pump
- [2] W. E. K. Middleton, *The History of the Barometer* (Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1964).
- [3] J. A. Bennett, *Science at the great Exhibition* (Whipple Museum, Cambridge, 1983).
- [4] <http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum>
- [5] I. Kuščer in S. Žumer, *Toplota* (DMFA, Ljubljana, 1987).
- [6] N. S. Harris, *Modern Vacuum Practice* (Nigel Harris Publishing, Brighton, 2001)
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Rotary_piston_pump.svg
- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/Diaphragm_pump
- [9] <http://www.gongol.net/sludgeandslurry/howitworks/>
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Cut_through_turbomolecular_pump.jpg
- [11] <http://www.cbem.imperial.ac.uk/>
- [12] <http://en.wikipedia.org/wiki/Cryopump>
- [13] S. Južnič, *Zgodovina raziskovanja vakuuma in vakuumskih tehnik* (Društvo za vakuumsko znanost in tehniko, Ljubljana, 2004).
- [14] F. Breclj in J. Kovač, *Vakuumsko znanost in tehnika* (Društvo za vakuumsko znanost in tehniko, Ljubljana, 2003).
- [15] <http://www.piab.com/Templates/Page.aspx?id=16129>
- [16] <http://www.thinfilmsblog.com/>