

DAUGAVPILS UNIVERSITĀTE

Fizikas katedra

Edmunds Tamanis

**VAKUUMA IEGŪŠANAS
METODES**

2003

Anotācija

Mācību palīglīdzeklī ir apskatīti vakuumma iegūšanas principi un vairāku vakuumsūkņu uzbūve. Tas ir paredzēts studentiem, apgūstot molekulārfizikas kursu. To var izmantot arī skolēni un skolotāji.

Saturs

Ievads	4
I Vakuuma fizika	6
1.1. Galvenie jēdzieni	6
1.2. Vakuuma pakāpes	9
1.3. Atsūknēšanas procesa teorija	11
II Vakuumsūkņi	14
2.1. Tilpuma sūkņi	14
2.2. Strūklas sūkņi	17
2.3. Molekulārie sūkņi	18
2.4. Sorbcijas sūkņi	20
2.4.1. Absorbēcijas (ceolīta) sūkņi	20
2.4.2. Jonu iztvaicēšanas sūkņi	22
2.4.3. Magnētiskie gāzizlādes sūkņi – magnetroni	23
2.5. Kondensācijas (kriogēnie) sūkņi	25
III Spiediena mērišanas iekārtas - manometri	26
Literatūra	28

Ievads

Mūsdienu tehniskā pasaule nav iedomājama bez vakuumtehnikas. Šoti daudzās nozarēs ir nepieciešamas vakuumiekārtas vai arī spiediena mērišanas iekārtas. Tā, piemēram, nevienas elektroniskas iekārtas izveidošana nav iespējama bez vakuuma palīdzības. Visas mikroelektronikas pusvadītāju ierīces (mikroshēmas u.c.) tiek izgatavotas vakuumā uzklājot plānus pārklājumus. Metalurģijā vakuma izmantošana metālu kausēšanā ļauj iegūt tādus metālus kā titāns, niobijs, tantāls, cirkonijs, berilijs un to sakausējumus, kā arī metālus ar uzlabotām īpašībām un tīrības pakāpi. Ķīmijas rūpniecībā ar vakuma palīdzību iegūst sintētiskos materiālus, farmācijā – antibiotikas, pārtikas rūpniecībā – cukuru, hormonus, vitamīnus, viglajā rūpniecībā – plastmasas, foliju, papīru, audumus, optikā – augstvērtīgu optiku, u.t.t. Visbeidzot zinātnisko pētījumu veikšana nav iedomājama bez vakuma.

Vakuumtehnikas vēsture sākas jau I gs.p.m.ē. ar Herona šķirces un Ketezbija ūdens sūkņa izgudrošanu. Turpmāk, līdz pat XVII gs.m.ē., tukšums (vakuums) bija tikai reliģiskas dabas jautājums. XVII gadsimta sākumā par tukšumu sāka interesēties arī zinātnieki – Galileo Galilejs atrada ūdens staba augstumu, kuru var iegūt ar sūcošu sūknī. 1643. g. Evandželisto Toriçelli atklāja, ka atmosfēra rada spiedienu, kurš ir vienāds ar aptuveni 760 mm augsta dzīvsudraba staba spiedienu. Telpa barometriskajā caurulē virs dzīvsudraba, pēc Toriçelli domām, bija absolūti tukša un tika nosaukta par “Toriçelli tukšumu”. 1650. g. vācu fizikis Otto fon Gerike izgudroja pirmo mehānisko gaisa sūknī. Bet līdz pat XIX gs. vakuums tika izmantots vienīgi ūdens pacelšanai no akām.

1825. g. franču ķīmiķis Roberts Batists Dimā ieguva spiediena samazināšanos traukā, izspiežot no tā gaisu ar ūdens tvaikiem un vēlāk kondensējot tos. XIX gs. vidū vācu ķīmiķis Roberts Vilhelms Bunzens veica gāzes atsūknēšanu ar ātri plūstošas šķidruma plūsmas palīdzību.

Vakuuma iegūšana kļuva nozīmīga līdz ar elektrovakuumierīcu – elektronu lampu, kvēlspuldžu u.c. izgudrošanu. Tālākā vakumiekārtu attīstība notika līdz ar tehnikas progresu. Mūsdienās ir iespējams iegūt spiedienu līdz pat 10^{18} [1] reizes mazāku par atmosfēras spiedienu.

I nodala

Vakuuma fizika

1.1. Galvenie jēdzieni

Vakuums ir tāda gāzes retinājuma pakāpe, kad gāzes molekulu brīvā ceļa garums ir lielāks par trauka (kurā atrodas gāze) izmēriem. Skaitliski vakuumu raksturo kā starpību starp atmosfēras spiedienu un absolūto spiedienu vakuumsistēmā. Tāpēc vakuumu mērā tādās pašās mērvienībās kā spiedienu.

Galvenie jēdzieni vakuumfizikā tiek balstīti uz šādām molekulāri - kinētiskās teorijas hipotēzēm:

- gāze ir molekulu kopa, kuras nepārtraukti un haotiski kustās;
- mijiedarbība starp molekulām notiek tikai tām saduroties, pie tam sadursmes ir absolūti elastīgas;
- siltums ir mehāniskās enerģijas forma – molekulu kinētiskā enerģija;
- eksistē laikā konstants molekulu sadalījums pa ātrumiem;
- gāze ir izotropa.

Izmantojot šīs hipotēzes, var iegūt gāzes molekulu sadalījuma pa ātrumiem funkciju – Maksvela-Bolcmaņa sadalījumu:

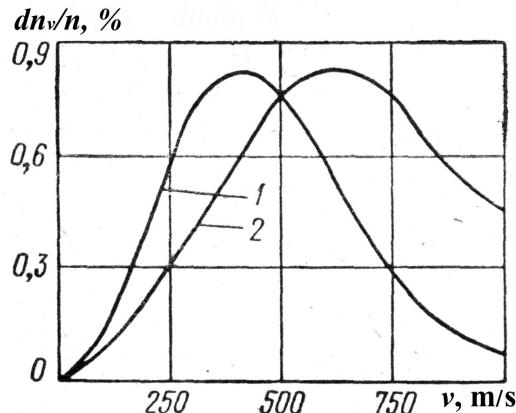
$$dn_v = n \sqrt{\frac{2m^3}{\pi k^3 T^3}} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2 dv, \quad (1.1)$$

kur dn_v - molekulu skaits ar ātrumiem intervālā no v līdz $v+dv$; n - molekulu skaits tilpuma vienībā; m - molekulas masa; k - Bolcmaņa konstante; T - absolūtā temperatūra.

Sadalījuma funkcijai (1.1) maksimums ir tad, ja

$$v_{var} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}.$$

Šo ātrumu sauc par par visvarbūtīgāko molekulu ātrumu. Zīmējumā 1.1. ir redzama slāpekļa sadalījuma funkcija.



1.1. zīmējums. Slāpekļa molekulu sadalījums pa ātrumiem. 1 - $T = 25^\circ\text{C}$,
2 - $T = 400^\circ\text{C}$.

Izņemot visvarbūtīgāko ātrumu, var atrast arī vidējo aritmētisko molekulu ātrumu

$$v_{ar} = \frac{1}{n} \int_0^\infty v dn_v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad (1.2)$$

un vidējo kvadrātisko molekulu ātrumu

$$v_{kv} = \sqrt{\frac{1}{n} \int_0^{\infty} v^2 dn_v} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}. \quad (1.3)$$

Formulu, molekulu spiediena vai mijiedarbības spēka ar vakuumkameras sienas laukuma vienību izskaitlošanai, var iegūt izmantojot divas pirmās hipotēzes un otro Nūtona likumu:

$$p = \frac{mnv_{kv}^2}{3} = \frac{\rho v_{kv}^2}{3}, \quad (1.4)$$

kur ρ - gāzes blīvums, $\rho = mn$.

Ja kamerā atrodas dažādu gāzu maisījums, tad, lai noteiktu spiediena lielumu, ir nepieciešams atrast visu maisījuma molekulu kustības daudzuma (impulta) izmaiņu laika vienībā:

$$p_{mais} = \sum_{j=1}^K \frac{1}{3} m_j n_j v_j^2, \quad (1.5)$$

kur m_j , n_j , v_j - j -tās gāzes molekulu masa, koncentrācija un vidējais kvadrātiskais ātrums atbilstoši, K - maisījuma gāzu skaits. No (1.4) un (1.5) var iegūt:

$$p_{mais} = \sum_{j=1}^K p_j. \quad (1.6)$$

Izteiksmi (1.6) sauc par Daltona likumu: savstarpēji ķīmiski nereagējušu gāzu maisījuma kopīgais spiediens ir atsevišķu maisījuma gāzu parciālo spiedienu summa.

Vienādojumus (1.5) un (1.6) var izmantot tikai gadījumā, kad izpildās pirmās divas molekulāri - kinētiskās teorijas hipotēzes par molekulu vienādi varbūtīgu kustību un elastīgām sadursmēm ar kameras sienām. Loti zemu spiedienu apgabalā šie nosacījumi neizpildās.

Izmantojot molekulu sadalījumu pa ātrumiem (1.1) var iegūt arī tādu vakuumtehnikā svarīgu lielumu, kā molekulu skaitu, kas laika vienībā triecas pret kameras sienas laukuma vienību:

$$N_q = \frac{nv_{ar}}{4}. \quad (1.7)$$

Praktiski bieži ir svarīgāk zināt nevis molekulu skaitu N_q , bet gāzes tilpumu V_q litros, ko aizņem molekulās, kuras vienā laika vienībā triecas pret kameras sienas laukuma vienību. Tad (1.7) abas puses izdalām ar n un iegūsim:

$$V_q = \frac{v_{ar}}{4} = 36,38 \sqrt{\frac{T}{M}}, \quad \text{l}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}). \quad (1.8)$$

kur M - gāzes molmasa. Acīmredzami, gāzes tilpums, kas vienā laika vienībā trieksies uz kameras laukumu A (m^2), būs:

$$V_A = 36,38 A \sqrt{\frac{T}{M}}, \quad \text{l/s}. \quad (1.9)$$

Formulu (1.8) praktiski izmanto lai noteiktu tvaika strūklas sūkņu, dažādu slazdu, sorbcijas sūkņu ātrdarbību u.c.

Izplatītākā vakuuma mērvienība ir dzīvsudraba staba milimetri jeb Torr – Toričelli. 1 mmHg (Torr) ir spiediens, ko rada 1 mm augsts dzīvsudraba stabs, ja dzīvsuraba blīvums ir $13595,1 \text{ kg/m}^3$ (pie $t = 0^\circ\text{C}$) un brīvās krišanas paātrinājums ir normāls – $9,80665 \text{ m/s}^2$. 1 Torr = $133,32239 \text{ N/m}^2$.

1.2. Vakuuma pakāpes

No iepriekš teiktā zinām, ka vakuuma definīcijā svarīga loma ir molekulu brīvā ceļa garumam ar kura palīdzību mēs varam definēt dažādas vakuuma pakāpes. Bet sakarā ar to, ka molekulās kustās haotiski, vienas molekulās ceļš no sadursmes līdz sadursmei būs ļoti dažāds. Taču pēc analogijas ar vidējiem molekulu ātrumiem, mēs varam atrast vidējo molekulu brīvā ceļa garumu λ . Saskaņā ar kinētisko teoriju to var izteikt:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2\pi n \sigma^2 (1 + \frac{C}{T})}}, \quad (1.10)$$

kur σ - molekulās efektīvais diametrs, C - konstante, kas atkarīga no gāzes veida.

Ir redzams, ka λ ir apgriezti proporcionāls molekulu koncentrācijai n un molekulās efektīvajam diametram, kuru raksturo lielums $\pi\sigma^2$. Reizinātājā

$(1 + \frac{C}{T})$ tiek ņemta vērā molekulu efektīvā diametra samazināšanās pieaugot temperatūrai, kā rezultātā palielinās vidējais brīvā ceļa garums. No (1.10) arī redzams, ka λ ir apgriezti proporcionāls molekulu koncentrācijai n . Ja temperatūra nemainās, tad λ ir apgriezti proporcionāls arī spiedienam p , bet reizinājums λp ir konstants:

$$\lambda p = \lambda'. \quad (1.11)$$

Ir redzams, ka λ' ir vidējais molekulu brīvā ceļa garums, ja $p = 1$.

Ja vakuumkamerā tiek veikta gāzes atsūknēšana, tad samazinās spiediens un, no (1.10) un (1.11) redzams, ka arī vidējais molekulu brīvā ceļa garums. Var iestāties tāds brīdis, kad λ kļūst lielāks par attālumu starp kameras sienām d . Ja $\lambda \gg d$, tad molukelas bez sadursmēm var nolidot no vienas kameras sienas līdz otrai. Acīmredzot, jo mazāks ir attālums d starp kameras sienām, jo ātrāk, t.i., pie lielāka spiediena, šāds stāvoklis iestājas.

Daudzas svarīgas gāzu īpašības ir stipri atkarīgas no attiecības λ/d , kur d ir tas lineārais izmērs, kas katrā atsevišķā gadījumā ir svarīgākais.

Šī attiecība ir pamatā arī vakuuma pakāpju definēšanā. Vakuumtehnika izšķir trīs vakuuma pakāpes:

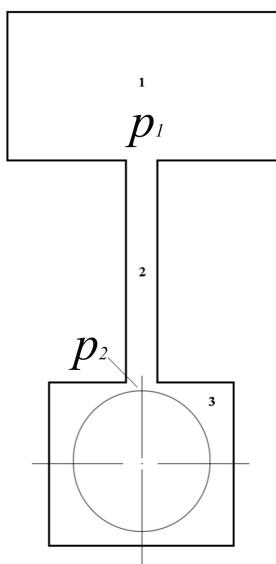
- zems vakuums – vidējais molekulu brīvā ceļa garums ir daudzkārt mazāks par kameras izmēriem ($\lambda \ll d$);
- vidējs vakuums – vidējais molekulu brīvā ceļa garums ir samēram ar kameras izmēriem;
- augsts vakuums – vidējais molekulu brīvā ceļa garums ir daudzkārt lielāks par kameras izmēriem ($\lambda \gg d$);

No šīm definīcijām redzams, ka vakuuma pakāpes ir relatīvs jēdziens, jo vienam un tam pašam spiedienam var atbilst dažādi brīvā ceļa garumi. Piemēram, ja gaiss nokļūst telpā, kuras lineārie izmēri ir mazāki par $0,06 \mu\text{m}$, tad, pat ja šajā traukā ir atmosfēras spiediens, gāze uzvedīsies kā augsta vakuuma gadījumā. Tas var notikt kāda materiāla porās. Un otrādi – jo lielāki ir trauka izmēri, jo zemāks spiediens ir nepieciešams, lai iegūtu augstu vakuumu.

Tiek lietots arī jēdziens ultraaugsts vakuums – spiedienu diapazons virs 10^{-9} Torr.

1.3. Atsūknēšanas procesa teorija

Apskatīsim vienkāršāko vakuumsistēmu, attēlotu 1.2. zīmējumā. Pienem-



1.2. zīmējums. Vienkārša vakuumsistēma.

1 - vakuumkamera, 2 - vakuumcaurule, 3 - sūknis.

sim, ka gāzes daudzums kamerā nepalielinās – neieplūst no ārienes un neizdalās no kameras sienām, un temperatūra ir konstanta.

Līdz sūkņa darbības sākumam, visā sistēmā ir vienāds spiediens, un gāze kopumā paliek nekustīga (nav gāzes plūsmas). Sākot darboties sūknim, rodas gāzes plūsma no kameras uz sūkni, gāzes daudzums sistēmā nepārtraukti samazinās. Tā kā tilpums un temperatūra sistēmā nemainās, tad samazinās spiediens. Pie tam, spiediens p_2 sūkņa ieejā samazinās ātrāk nekā p_1 vakuumkamerā, jo vakuumcaurule rada pretestību gāzes plūsmai. Starpību ($p_1 - p_2$) sauc par spiedienu dzinējstarpību.

Tā kā spiedieni p_1 un p_2 atšķirās, ir nepieciešams nošķirt jēdzienus – vakuumkameras atsūknēšanas ātrums un sūkņa atsūknējošās darbības ātrums. Vakuumkameras atsūknēšanas ātrums ir gāzes tilpums, kas vienā laika vienībā ioplūst vakuumcaurulē pie spiediena p_1 vakuumkamerā. Tā kā spiediens kamerā mainās, tad arī atsūknēšanas ātrums mainās un katrā laika momentā tas būs cits. Apskatīsim bezgalīgi mazu laika momentu dt . Tad šajā laika momentā vakuumcaurulē ioplūst gāze ar tilpumu dV_0 un dotajā spiedienā p_1 vakuumkameras atsūknēšanas ātrums būs:

$$S_0 = \frac{dV_0}{dt}. \quad (1.12)$$

Sūkņa atsūknējošās darbības ātrums dotajā spiedienā p_2 ir gāzes tilpums, kurš vienā laika vienībā ioplūst sūknī. Analoģiski, sūkņa darbības ātrums:

$$S_s = \frac{dV_s}{dt}. \quad (1.13)$$

Reāli sūkņi tiek raksturoti ne tikai ar darbības ātrumu, bet arī ar ciņiem lielumiem – maksimālais sākuma (iejas) spiediens, maksimālais izejas spiediens, paliekošais spiediens un produktivitāte.

Maksimālais ieejas spiediens p_{ie} ir lielākais iespējamais spiediens sūkņa iejā, pie kura sūknis var sākt darbu. Ne visi sūkņi var sākt darbu atmosfēras spiedienā.

Maksimālais izejas spiediens p_{iz} ir maksimālais spiediens sūkņa izejā, pie kura sūknis vēl var normāli darboties. Visiem sūkņiem, kuriem izejas spiediens ir mazāks par atmosfēras, izejai ir jāpievieno tā saucamie priekšvakuma (forvakuma) sūkņi, kas rada nepieciešamo priekšvakuumu sūkņa izejā.

Paliekošais spiediens p_{pal} ir maksimāli zemākais spiediens, ko var iegūt ar doto sūkni darbojoties bez slodzes, t.i. ja sūkņa iejā neieplūst gāze no ārienes (vai no cita sūkņa). Ar reāliem sūkņiem nav iespējams sasniegt pēc patikas augstu vakuumu, jo katrs sūknis rada kaut kādu atpakaļ sūkņa iejā ejošu gāzes plūsmu. Šī gāze var būt darba šķidruma tvaiki, gāzes, kas izplūst no konstrukciju materiāliem, kā arī gāzes, kas ioplūst pa blīvējumu vietām.

Sūkņa produktivitāte ir gāzes plūsma, kas ioplūst sūknī, un to atrod:

$$Q = p_2 S_s.$$

Jāpiebilst, ka sūkņa darbības ātrums darba spiedienu diapazonā faktiski nemainās, tas var samazināties spiedienam tuvojoties paliekošajam spiedienam. Daudziem sūkņiem darbības ātrums ir atkarīgs no atsūknējamās gāzes veida.

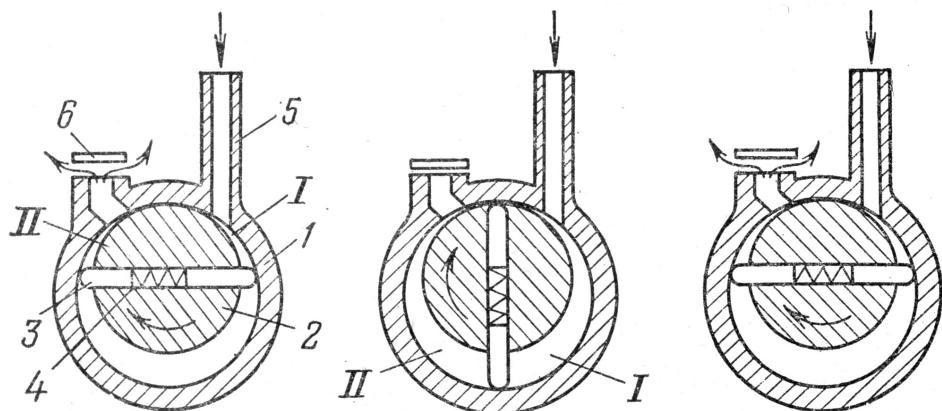
II nodaļa

Vakuumsūkņi

2.1. Tilpuma sūkņi

Tilpuma sūkņi (izspiešanas, arī mehāniskie eļļas sūkņi) atsūknē gāzi mainot darba kameras tilpumu. Pie šīs klases pieder tilpuma oscilāciju sūkņi – virzuļu sūkņi, membrānu sūkņi; un rotācijas sūkņi – plākšņu-rotora sūkņi, trohoidālie, divrotoru sūkņi, u.c. Pārsvarā šos sūkņus izmanto priekšvakuuma iegūšanai. Darbības principi tiem ir līdzīgi, tāpēc apskatīsim tikai dažus.

2.1. zīmējumā ir redzama plākšņu-rotora sūkņa shematsiska uzbūve. Šeit cilindriskā kamerā 1 rotē ekscentriski novietots rotors 2. Tajā ir urbums 4, kurā ir novietotas plāksnītes 3, spējīgas brīvi pārvietoties. Rotoram griežoties, šīs plāksnītes slīd pa cilindra virsmu, un kamerā izveidojas divi mainīga tilpuma dobumi: I – iesūkšanas dobums un II – saspiešanas dobums. Iesūkšanas dobums I rotācijas laikā palielina savu tilpumu un tajā caur ieejas cauruli 5 ieplūst gāze no atsūknējamā tilpuma. Tilpums II samazinās, un tajā notiek gāzes sapiešana. Šis tilpums ir savienots ar izejas vārstu 6. Kad spiediens tilpumā II būs pietiekams, vārts atvērsies un notiks gāzes izplūde. Šis vārsts atrodas zem eļļas līmeņa, tāpēc atmosfēras gaiss neiekļūst sūknī. Viss kameras tilpums arī atrodas eļļā, kas līdz minimumam samazina gāzes plūsmu atpakaļ no izejas ieejā. Vienlaicīgi eļļa nodrošina sūkņa rotējošo daļu



2.1. zīmējums. Plākšņu-rotora sūknis.

1 - korpuiss, 2 - rotors, 3 - plāksnītes, 4 - urbums, 5 - ieeja, 6 - izejas vārststs.

ellosanu. Tāda pati loma ēļļai ir arī citos mehāniskajos sūkņos.

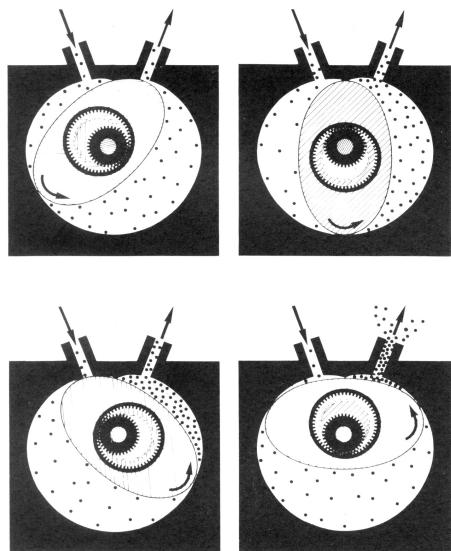
Paliekošais spiediens šādos sūkņos ir $\approx 1,5 - 5 \cdot 10^{-2}$ Torr. Lai panāktu labākus rezultātus, bieži tiek izmantoti divpakāpju plākšņu-statora sūknī, kuros otra atsūknēšanas kamera rada retinājumu pirmās izejā.

Trohoidālajos¹ sūkņos darba kamerai un rotoram ir īpaša forma (2.2. zīm.). Iesūkšanas un izsūkšanas dobuma tilpums mainās īpašā veidā rotējot elipsveida rotoram trohoidālās formas kamерā.

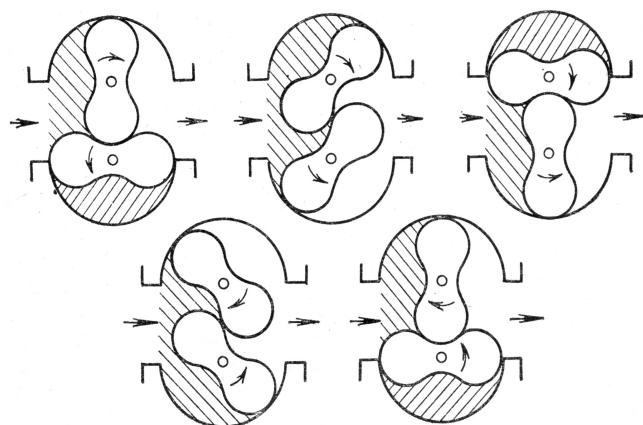
Paliekošais spiediens šādos sūkņos ir $\approx 5 \cdot 10^{-2}$ Torr.

Divrotoru sūkņa darbības shēma redzama 2.3. zīmējumā. Sūkņa darba kamерā atrodas divi rotori, kuru forma atgādina astotnieku. Šie rotori griežas sinhroni viens pretī otram. Darba gaitā rotori nepieskarās viens otram un sienām, kā rezultātā rotācijas mehānismā nav berzes. Līdz ar to, šādos sūkņos var panākt lielu rotoru griešanās ātrumu un lielu atsūknēšanas ātrumu. Bet spraugas rotora mehānismā rada iespēju ieplūst gāzei atpakaļ, tāpēc šāda sūkņa izejā ir nepieciešams priekšvakuma sūknis. Divrotoru sūkņiem (ar pievienotu priekšvakuma sūknī) paliekošais spiediens var būt līdz pat $5 \cdot 10^{-5}$ Torr.

¹Trohoīda - trajektorija punktam uz riņķa līnijas, kura rotē pa citu riņķa līniju.



2.2. zīmējums. Trohoidālā sūkņa darbības fāzes.



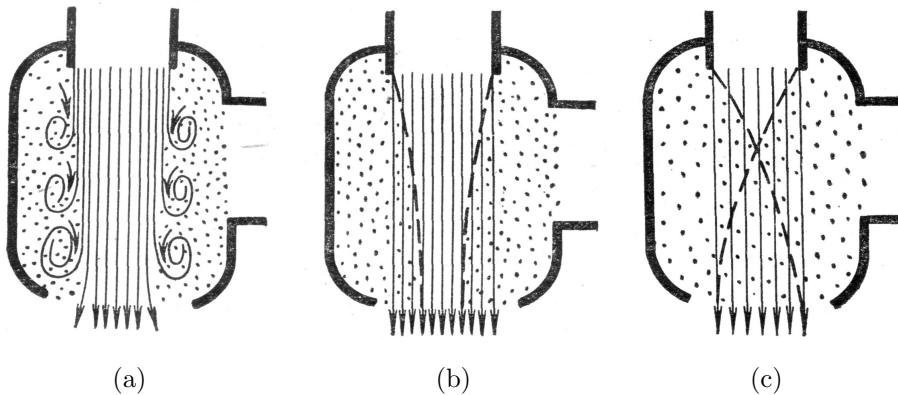
2.3. zīmējums. Divrotoru sūkņa darbības fāzes.

2.2. Strūklas sūkņi

Strūklas sūkņos gāzi no vakuumkameras atsūknē izmantojot ātri plūstošu šķidruma vai gāzes (tvaika) strūklu. Praksē tiek izmantoti galvenokārt tvaika strūklas sūkņi, tāpēc apskatīsim tikai šo sūkņu darbības principu. Gāzes atsūknēšanas mehānisms ar tvaika strūklu ir atkarīgs no atsūknējamās gāzes plūsmas veida un no tvaika strūklas plūsmas veida. Atkarībā no darba spiediena apgabala izšķir trīs tvaika strūklas sūkņu veidus, kuri atšķiras gan pēc gāzes atsūknēšanas mehānisma, gan pēc konstrukcijas:

- ežektorsūkņi ($760 - 10^{-2}$ Torr);
- brjūstersūkņi ($10^{-1} - 10^{-4}$ Torr);
- difūzijsūkņi (zem 10^{-4} Torr).

Zīmējumā 2.4. ir shematiski attēloti trīs gāzes atsūknēšanas ar tvaika strūklu mehānismi. Liela ieejas spiediena gadījumā ($760 - 10^{-2}$ Torr) tvaika



2.4. zīmējums. Gāzes atsūknēšanas ar tvaika strūklu mehānismi.

strūklai jābūt pietiekoši blīvai, un, atkarībā no tās izplūšanas apstākļiem, šī plūsma var būt vai nu turbulentā (2.4. (a) zīm.) vai lamināra (2.4. (b) zīm.). Turbulentā plūsmā gāzes “aizraušana” notiek galvenokārt tādēļ, ka gāze sajaucas ar virpuļveidā plūstošo tvaika massu. Samazinoties tvaika strūklas blīvumam, turbulentā mehānisma loma mazinās, bet palielinās viskoza gāzes

aizraušana – starp tvaika strūklas robežslāniem un gāzes slāniem ir berze. Lamināras tvaika plūsmas gadījumā galvenokārt notiek viskoza gāzes aizraušana, kā arī daļēja gāzes difūzija tvaika strūklā.

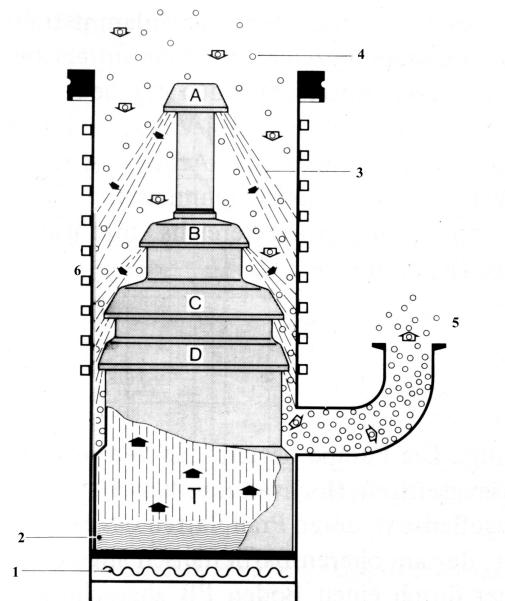
Zemākos spiedienos tvaika plūsmai jābūt vēl mazāk blīvai (2.4. (c) zīm.), un seit gāzes atsūknēšanas iemesls ir gāzes difūzija tvaika strūklā, kur gāzes molekulas sadursmju rezultātā iegūst ātruma komponenti, kas ir vērsta tvaika plūsmas virzienā.

Tādā veidā, tvaika stūklas sūknī darbības spiedienu diapazons galvenokārt ir atkarīgs no tvaika plūsmas blīvuma, kurš, savukārt, ir atkarīgs no sūknī konstrukcijas. Šādu sūknī īpašības un konstrukciju nosaka arī darba šķidrums, kas visbiežāk ir vakuumēļla. Visiem tvaika strūklas sūknīem izejā ir jārada priekšvakuumi.

Vakuumiekārtās visbiežāk tiek izmantoti difūzijsūknī (2.5. zīm.). Šādu sūknī paliekošais spiediens ir līdz $4 \cdot 10^{-7}$ Torr, ja sūknī ieejā tiek izmantoti slazdi.

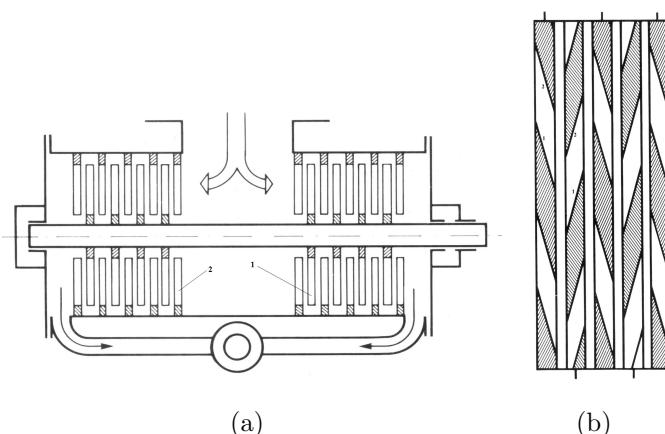
2.3. Molekulārie sūknī

Molekulārajos sūknos gāze tiek pārvietota ar nepārtraukti kustībā esošām cietām virsmām. Turpmāk runāsim tikai par turbomolekulārajiem sūknīem, jo molekulārie sūknī izrādījās ekspluatācijā nedroši, un to izmantošana tika pārtraukta. Zīmējumā 2.6. (a), ir redzama turbomolekulārā sūknīa shematiska uzbūve. Šāda sūknīa galvanās sastāvdaļas ir rotoru diskī 1 un statoru diskī 2. Gan rotoriem, gan statoriem ir radīali slīpi (attiecībā pret diska plakni leņķī $40 - 15^\circ$) kanāli, pie tam, rotora kanāli ir spoguļveidā attiecībā pret statora kanāliem (2.6. (b) zīm.). Šāda konstrukcija nodrošina gāzes kustību atsūknēšanas virzienā. Molekulas, kas iziet caur statora kanāliem un nonāk rotora kanālos no kreisās puses, ar lielu varbūtību izies caur rotora kanālu, jo kanāla sānu siena 1 virzās prom no molekulas, bet siena 2 – tai virsū. Tai pat laikā, molekulas no labās puses visticamāk tiks atstarotas no sienas 2 atpakaļ atsūknēšanas virzienā. Rezultātā, molekulas pa-



2.5. zīmējums. Difūzijas sūknis.

1 - sildelements, 2 - darba šķidrums, 3 - tvaiks, 4 - atsūknējamās gāzes daļīņas, 5 - izeja uz priekšvakuumu, 6 - ūdens dzesēšana.



2.6. zīmējums. Turbomolekulārais sūknis.

pildus siltumkustības ātrumam iegūst ātrumu, perpendikulāru rotora diska asij. Arī statora kanāli nodrošina molekulu kustību galvenokārt atsūknēšanas virzienā. Tādējādi, katrs disks rada nelielu spiedienu kritumu, un nerodas liela atpakaļejoša gāzes plūsma.

Turbomolekulārie sūkņi ir ātrdarbīgi (līdz pat $10\,000\text{ l/s}$), droši ekspluatācijā, tie nerada vakuumkameras piesārņojumu ar eļļu (eļļa tiek izmantota tikai rotoru gultņu eļļošanai, un smagās eļļas molekulas ļoti labi atstarojas no diskiem, kas nodrošina to nenokļūšanu vakuumkamerā), pie tam paliekošais vakuums tiem ir līdz pat 10^{-11} Torr . Vienīgais šo sūkņu trūkums – to cena.

2.4. Sorbcijas sūkņi

Sorbcijas sūkņos atsūknējamā gāze tiek absorbēta sūkņa darba kamerā. To var panākt dažādām metodēm, kas arī nosaka dažādus sorbcijas sūkņu veidus.

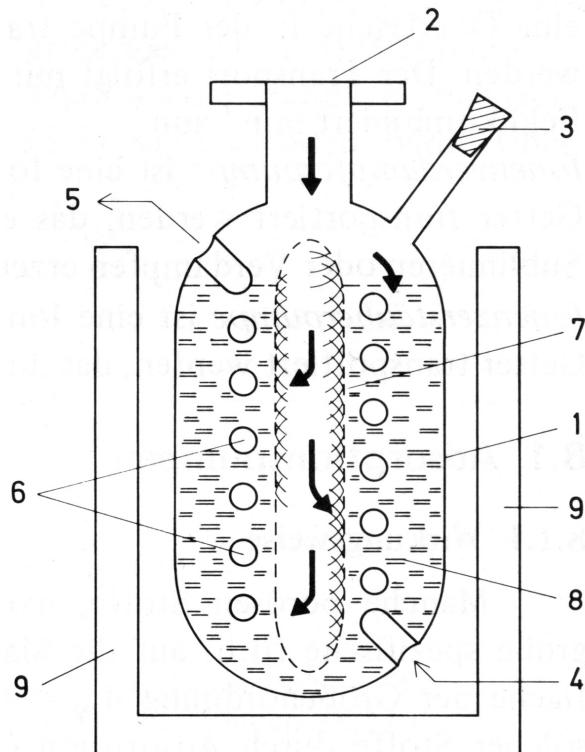
2.4.1. Absorbcijas (ceolīta) sūkņi

Absorbcijas sūkņos izmanto dažu porainu cietvielu spēju zemās temperatūrās absorbēt gāzes un tvaikus. Kā absorbētu šādos sūkņos visbiežāk izmanto ceolītu¹. Porainu struktūru šie materiāli iegūst pēc uzkarsēšanas, pie tam, to kristālrežģis netiek sagrauts. Pēc kristāliskā ūdens izvākšanas tiek iegūtas vienādu izmēru poras, kurās var iekļūt tikai tādas gāzu molekulas, kuru izmēri ir mazāki par poru izmēriem. Tāpēc ceolīti var kalpot arī kā “molekulārie sieti”.

Šāda ceolīta sūkņa uzbūve ir redzama [2.7.](#) zīmējumā.

Nerūsējoša tērauda cilindrā 1 atrodas ceolīts 8. Lai sūkni atdzesētu, to ievieto Djuara traukā 9, ko piepilda ar šķidru slāpekli ($\approx -200^\circ\text{C}$). Samazinoties temperatūrai, spiediens sūkņa kamerā samazinās, gāze no vakuumkameras ieplūst sūkņa kamerā un tiek absorbēta. Beidzot atsūknēšanu, ieejas

¹Ceolīti - sārmu metālu alumīnija silikāti.



2.7. zīmējums. Ceolīta sūknis.

1 - korpuiss, 2 - ieeja, 3 - korkis, 4, 5, 6 - dzesēšanas atveres, 7 - siets, 8 - ceolīts, 9 - Djuara trauks.

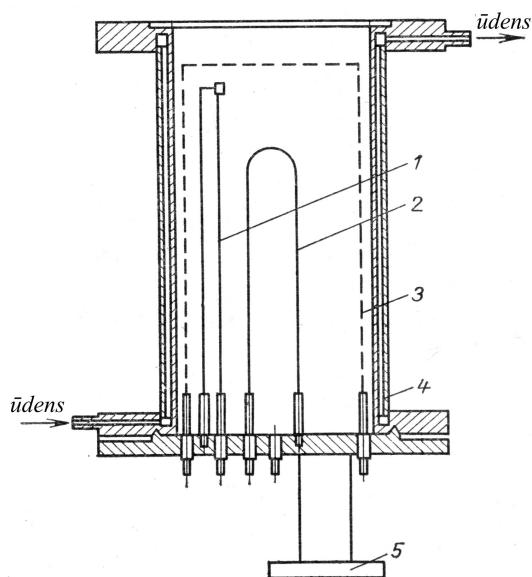
atvere 2 tiek noslēgta, Djuara trauks tiek noņemts un sūknis tiek uzkarsēts. Absorbētā gāze izdalās un sūknī var rasties spiediens, kas ir lielāks par atmosfēras spiedienu. Lai pasargātu sūkni no bojājumiem, šim gadījumam ir paredzēts vārststs (korkis) 3. Pēc uzkarsēšanas sūknis ir gatavs nākošajam atsūknēšanas procesam.

Parasti ceolīta sūknus izmanto gāzes atsūknēšanai spiedienu diapazonā $760 - 10^{-4}$ Torr, bet ir arī augstvakuumu ceolīta sūknī (līdz pat 10^{-8} Torr). Šo sūkņu priekšrocība – tie nerada vakuumkameras piesārnojumu ar eļlu. Trūkumi – tie slikti atsūknē inertās gāzes; nepieciešamība lietot šķidru slāpekli.

2.4.2. Jonu iztvaicēšanas sūkņi

Jonu iztvaicēšanas sūkņos darbojas vairāki gāzu absorbcijas mehānismi – fiziskā absorbcija, ķīmiskā absorbcija, ķīmiskās reakcijas un šķīšana vielas slānītī, kas veidojas kondensējoties iztvaicētam metālam, visbiežāk – titānam.

Šāda sūkņa shematisks attēls redzams **2.8.** zīmējumā.



2.8. zīmējums. Jonu iztvaicēšanas sūknis.

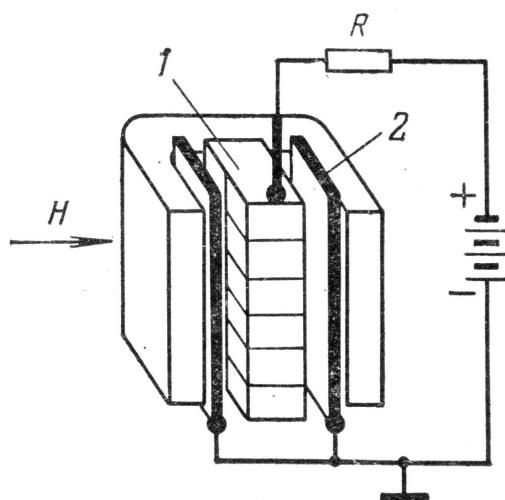
1 - volframa katods, 2 - titāna iztvaicētājs, 3 - anods, 4 - korpuiss, 5 - ieeja.

No U veida iztvaicētāja 2 tiek iztvaicēts titāns, kas kondensējas uz kameras sienām 4 (tās tiek dzesētas ar ūdeni). Titāns ir aktīvs metāls, kurš veido savienojumus ar visām gāzēm, izņemot inertās un oglūdeņražus. Tāpēc atsūknējamā gāze tiek saistīta šajā titāna plēvītē, kura nepārtraukti atjaunojas. Inerto gāzu atsūknēšanu var veicināt tās jonizējot, ko panāk ar volframa elektrodu 1, kas emitē elektronus. Šādu sūkņu darbības diapazons ir no $\sim 10^{-3}$ līdz $\sim 10^{-9}$ Torr, darbības ātrums – līdz pat 450 l/s. Trūkumi – mazefektīvi inerto gāzu atsūknēšanā, periodiski ir jāattīra kameras sienas no uzklātās titāna plēves un jāatjauno iztvaicētājs.

2.4.3. Magnētiskie gāzizlādes sūkņi – magnetroni

Magnētizlādes sūkņi no jonu iztvaicēšanas sūkņiem atšķirās ar to, ka šeit aktīvā viela (titāns) netiek iztvaicēta, bet tiek uzputināta. Šim nolūkam tiek izmantota gāzizlāde. Tātad, nav nepieciešami kvēlelementi.

Sūkņa anods 1 (2.9. zīm.) tiek izgatavots šūnu veidā un novietots starp diviem (diodes shēmā) aktīvā metāla (visbiežāk – titāna) katodiem 2. Šī sistēma tiek ievietota magnētiskajā laukā, kas ir perpendikulārs katodu plaknei.



2.9. zīmējums. Diožu magnētizlādes sūknis.

1 - anods, 2 - katodi.

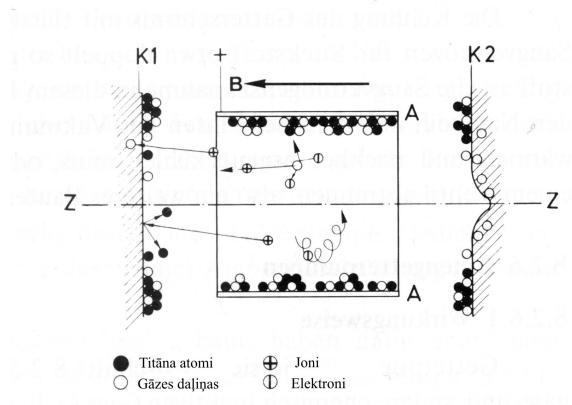
Radot starp anodu un katodiem vairāku tūkstoši voltu spriegumu, anoda šūnās iedegas gāzizlāde. Šeit magnētiskā un elektriskā lauka konfigurācija ir tāda, ka izlāde notiek plašā spiedienu diapazonā – no $\sim 10^{-3}$ līdz pat augstam vakuumam. Pozitīvie gāzes joni, kas veidojas izlādē, paātrinās elektriskajā laukā katodu virzienā un ietriecas tajos – notiek katodu izputināšana. No katodiem tiek izsistīti titāna atomi, kas nosēstas (uzputinās) uz visas elektrodu (galvenokārt – anodu) virsmas. Aktīvās gāzes reaģē ar uzputināto titānu, veidojot stabilus savienojumus. Smagās inerto gāzu molekulas triecoties ka-

todā var tik absorbētas, tomēr arī ar magnētizlades sūkņiem nevar panākt labu inerto gāzu atsūknēšanu.

Svarīga magnētizlādes sūkņu īpašība – katodu izputināšanas ātruma autoregulācija. Jo lielāks ir spiediens sūknī, jo stiprāk notiks katodu izputināšana. Samazinoties spiedienam, jonu strāva samazinās un katodi tiek izputināti mazāk intensīvi. Tā kā jonu strāva ir proporcionāla spiedienam kamerā, tad šo īpašību var izmantot arī spiediena mērīšanai.

Magnētizlādes sūkņu darbības principa saprašanai ir svarīgi arī noskaidrot gāzes izlādes rakstura maiņu mainoties spiedienam. Spiedienu apgabalā $\geq 10^{-3}$ Torr izlādes strāva ir liela, un lai nesāktos lokizlāde, to samazina, kas izsauc sprieguma samazināšanos. Līdz ar to, samazinās gāzes jonu enerģija, kā rezultātā samazinās arī katodu izputināšana un sūkņa ātrdarbība.

Spiedienam samazinoties līdz $\sim 10^{-4}$ Torr un vairāk, izlāde kļūst raksturīga augstvakuumam – tā saucamā Peninga izlāde jeb izlāde ar oscilējošiem elektroniem (2.10. zīm.).



2.10. zīmējums. Peninga izlāde.

K1, K2 - katodi, A - anods.

Izlādes strāva šādā režīmā nav liela, tā ir proporcionāla spiedienam, anodspriegums pieaug un gāzes jonu enerģija ir liela, kas uzlabo sūkņa ātrdarbību.

2.5. Kondensācijas (kriogēnie) sūkņi

Kondensācijas sūkņos gāzi saista uz cietu vielu virsmām, kuras ir atdzesētas līdz ļoti zemām (kriogēnām) temperatūrām – ~ 20 K. Šādi sūkņi pašlaik vairs faktiski netiek izmantoti, jo ir nepieciešamas dārgas zemu temperatūru uzturēšanas iekārtas. Līdzīgs princips ir zemu temperatūru slazdiem, kas ir domāti, lai uzlabotu “tīrību” vakuumkamerā – galvenokārt, lai nepielāautu sūkņu eļļu nokļūšanu vakuumkamerā. Bet arī šādu slazdu izmantošana ir retums, jo ir iespējams iegūt augstu vakuumu neizmantojot sūkņus, kuri rada eļļas piesārņojumu, piemēram, turbomolekulāros un magnetronus. Līdz ar to, šādu sūkņu uzbūvi neapskatīsim.

III nodala

Spiediena mērīšanas iekārtas - manometri

Neatņemama vakuumiekārtu sastāvdaļa ir spiediena mērīšanas iekārtas, kuras, tāpat kā vakuumsūknji, iedalās atkarībā no darbības principa:

- šķidruma manometri,
- kompresijas manometri,
- deformāciju manometri,
- termoelektriskie (siltuma) manometri,
- jonizācijas manometri,
- viskozitātes manometri,
- radiometriskie manometri.

Šķidruma manometros mērāmais spiediens (vai spiedienu starpība) līdz-svarojas ar šķidruma staba spiedienu. Tie ir visi U veida manometri un to modifikācijas. Mērījumu diapazons ir no 760 līdz $\sim 10^{-1}$ Torr.

Kompresijas manometros darbības princips balstās uz ideālas gāzes izo-termiskas saspiešanas likuma. Mēriju diapazons – no $\sim 10^2$ līdz $\sim 10^{-4}$ Torr.

Deformācijas manometros spiediens ir proporcionāls kāda jūtīgā elementa (membrānas, silfona u.t.t.) deformācijai. Mēriju diapazons – no 760 līdz $\sim 10^{-1}$ Torr.

Termoelektriskajos manometros izmanto gāzes siltumvadītspējas atkarību no spiediena. Manometrā ir ievietots sildelements, kura temperatūra un siltumatdeve mainās atkarībā no spiediena. Izšķir termopāra manometrus (sildelementa temperatūru mēra ar termopāri) un termoelektriskās pretestības manometrus (sildelementa temperatūru nosaka, mērot tā pretestību). Mēriju diapazons – no $\sim 10^2$ līdz $\sim 10^{-2}$ Torr.

Jonizācijas manometros spiedienu nosaka pēc jonu strāvas lieluma. Izšķir elektrojonizācijas (gāzi jonizē elektronu plūsma, ko emitē sakarsēts katods), radioizotopiskos (gāzi jonizē radioaktīvo izotopu izsviestās α daļiņas), magnētizlādes (Peninga šūna u.c.). Mēriju diapazons – no ~ 10 līdz $\sim 10^{-13}$ Torr.

Viskozitātes manometru darbības pamatā ir retinātas gāzes viskozitātes atkarība no spiediena. Izšķir svārstību viskozitātes manometru (vienā vai abos galos iespīlēta kvarca diega svārstību rimšanas atkarība no spiediena) un ar rotējošu elementu, kurā ātri rotējoša elementa spēka momentu gāze pārnes uz nekustīgu elementu, kas iekārts jūtīgā iekarē. Iekares savērpšanās leņķis ir spiediena mērs.

Radiometriskajā manometrā izmanto radiometrisko efektu. Starp divām plāksnītēm, kas vakuumā atrodas dažādā temperatūrā, rodas gāzes spiedienam proporcionāli atgrūšanās spēki.

Manometru uzbūves principus pagaidām neapskatīsim.

Literatūra

- [1] Б. И. Королев, В. И. Кузнецов, А. И. Пипко, В. Я. Плисковский.
Основы вакуумной техники. Энергия, Москва, 1975.
- [2] M. Wutz, H. Adam, W. Walcher. Theorie und Praxis der Vakuumtechnik. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, 1988.
- [3] Л. Н. Розанов. Вакуумные машины и установки. Машиностроение, Ленинград, 1975.