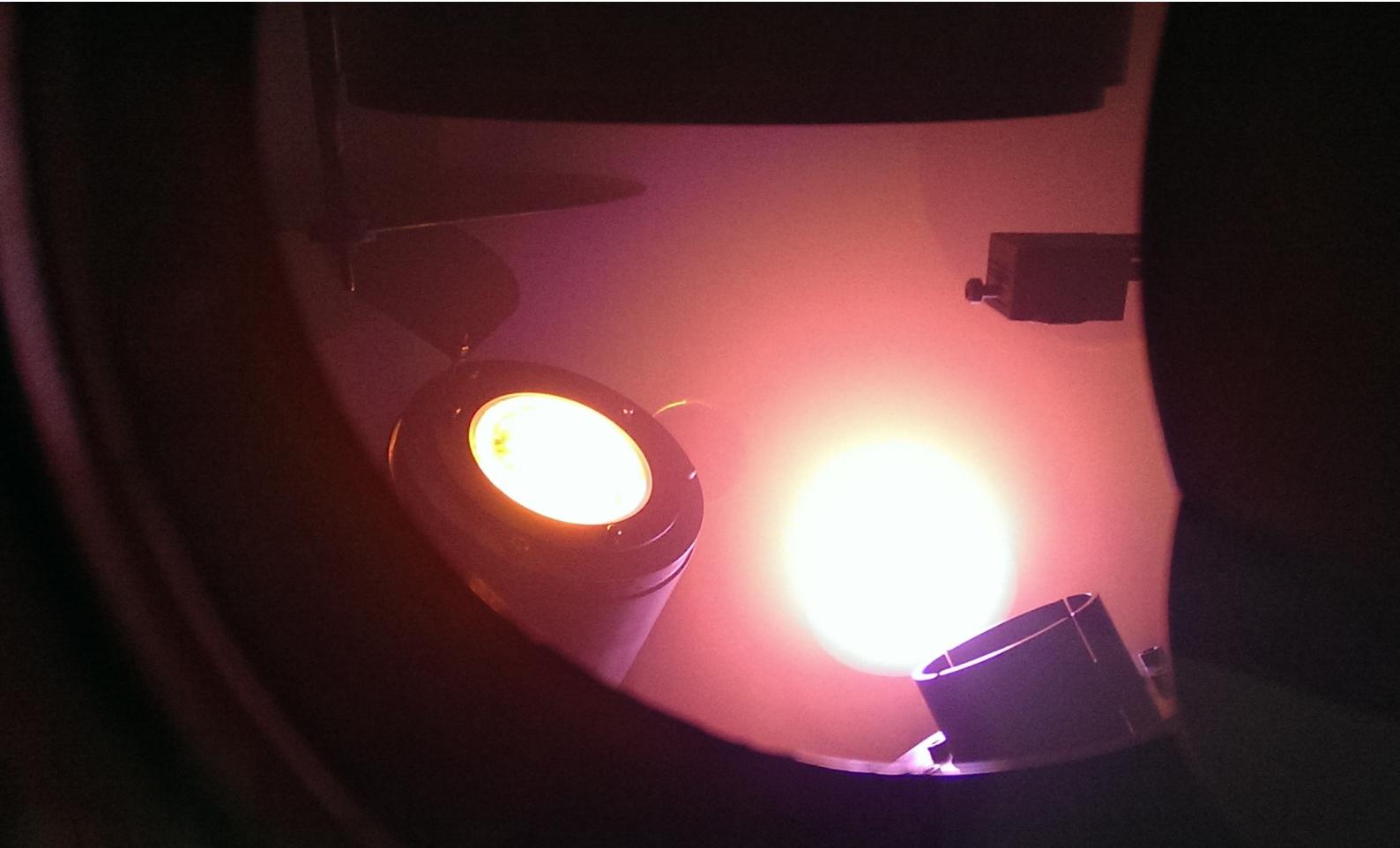




VAKUUMS IESĀCĒJIEM

Dr.phys. Edmunds Tamanis



Anotācija

“Vakuums iesācējiem” ir uzskatāms par šī paša autora darba “Vakuuma iegūšanas metodes” pilnveidotu un atjaunotu versiju. Mācību palīglīdzeklī ir apskatīti vakuuma iegūšanas principi, vairāku vakuumsūkņu uzbūve un vakuuma mērišanas ierīču darbības principi. Tas ir paredzēts studentiem, apgūstot molekulārfizikas kursu, kā arī iepazīstoties ar vakuumtehniku. To var izmantot arī skolēni, skolotāji un jebkurš interesents.

Autortiesības © 2019 Edmunds Tamanis

DAUGAVPILS UNIVERSITĀTE

<http://de.du.lv/fizika.html>

Saturs

Ievads	5
1 Vakuuma fizika	7
1.1 Galvenie jēdzieni	7
1.2 Vakuuma pakāpes	10
1.3 Atsūknēšanas procesa teorija	11
2 Vakuumsūkņi	14
2.1 Pārvietojuma sūkņi	14
2.1.1 Tilpuma sūkņi	14
2.1.2 Strūklas sūkņi	17
2.1.3 Molekulārie sūkņi	19
2.2 Sorbcijas sūkņi	20
2.2.1 Kriosorbcijs (ceolīta) sūkņi	20
2.2.2 Jonu iztvaicēšanas sūkņi	20
2.2.3 Magnētiskie gāzizlādes sūkņi – magnetroni	21
2.2.4 Kondensācijas (kriogēnē) sūkņi	23
3 Spiediena mērišanas iekārtas	25
3.1 Gāzes radītā spiediena manometri	25
3.2 Gāzes viskozitātes manometri	26

3.3	Impulsa pārneses manometri	26
3.4	Siltumvadītspējas manometri	26
3.5	Jonizācijas manometri	27
4	Vakuumiekārtu apkope	29
	Literatūra	32



levads

“Parādi man vakuumu!” – lūdza man kāds centīgs TV operators, mēģinot iegūt maksimāli labu materiālu raidījumam. Mans mēģinājums parādīt vakuumkameras iekšpusi caur lodziņu beidzās ar neveiksmi. “Tur nekā nav! Vai var atvērt valā?” Atvērt valā varēja. “Tas ir vakuums?” Nu, principā, vairs nav...

Šis atgadījums man lika aizdomāties – kāda ir mūsu līdz biedru izpratne par to, ko mēs saucam šajā interesantajā vārdā – “vakuums”. Ar jēdziena neizpratni dažreiz sastapos arī studentu vidū, piemēram, bieži vien atsevišķiem studentiem jēdziens “vakuums” ir salīmējies kopā ar jēdzienu “bezsvara stāvoklis”. Respektīvi, nezināmu iemeslu dēļ ir radies maldīgs priekšstats par vakuumā brīvi lidojošiem priekšmetiem un par to, ka priekšmetu brīvās lidošanas iemesls ir tieši vakuums! Un, starp citu, kāpēc ir “vakuums”, nevis “vakūms” vai “vakums”? Šo interesanto fenomenu Latviešu valodas aģentūras valodas konsultantes skaidroja šādi: “Tā kā vārds jau latīnu valodā tiek rakstīts ar diviem uu burtiem vacuum (viens u burts saknē, otrs - galotnē), tad, visticamāk, ar starpniekvalodu vai bez tās vārds pārņemts ļoti tuvu oriģinālam, pievienojot latviešu valodas galotni. Līdzīgi ar diviem patskaņiem tiek rakstīts arī svešvārds koordināta”. Lūk tā! Un latīnu valodā vārds “vacuum” nozīmē “tukšums”. Iespējams, ka šis darbs lasītājam var dod kādu skaidrību arī par jēdzienu “vakuums” fizikālo pusi.

Mūsdienu tehniskā pasaule nav iedomājama bez vakuumtehnikas. ļoti daudzās nozarēs ir nepieciešamas vakuumiekārtas vai arī spiediena mērišanas iekārtas. Tā, piemēram, nevienas elektroniskas iekārtas izveidošana nav iespējama bez vakuma palīdzības, piemēram, radiolampas (jā - joprojām tiek izmantotas noteikta veida skaņas aprīkojumā un citur), apgaismes ķermenī – gan kvēlspuldzes, gan gāzizlādes lampas. Visas mikroelektronikas pusvadītāju ierīces (mikroshēmas u.c.) tiek izgatavotas vakuumā, uzklājot plānus

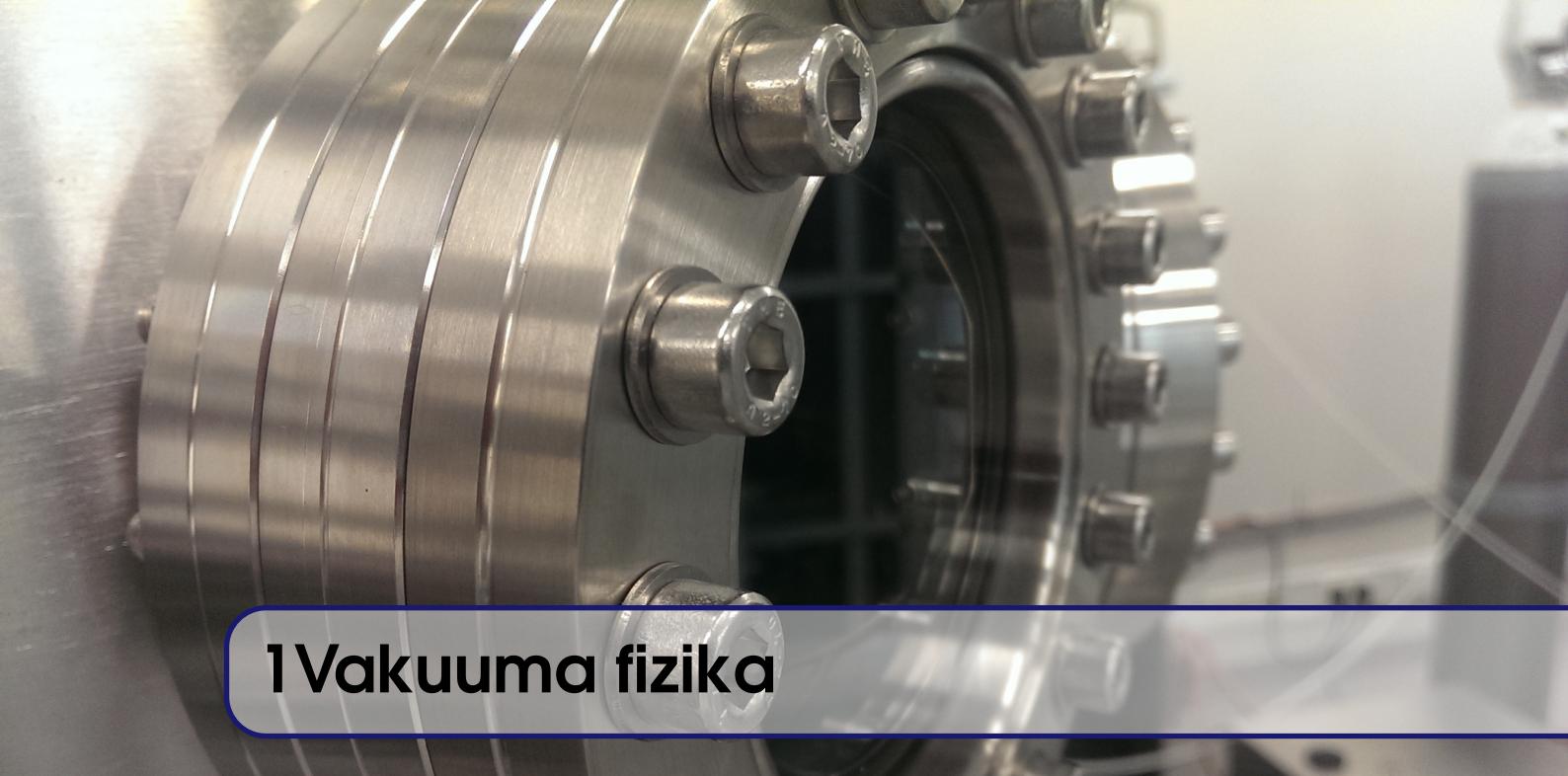
pārklājumus. Metalurģijā vakuma izmantošana metālu kausēšanā ļauj iegūt tādus metālus kā titāns, niobijs, tantāls, cirkonijs, berilijs un to sakausējumus, kā arī metālus ar uzlabotām īpašībām un tīrības pakāpi. Ķīmijas rūpniecībā ar vakuma palīdzību iegūst sintētiskos materiālus, farmācijā – antibiotikas, pārtikas rūpniecībā – cukuru, hormonus, vitamīnus, vieglajā rūpniecībā – plastmasas, foliju, papīru, audumus, optikā – augstvērtīgu optiku, lauksaimniecībā – iegūst pienu u.t.t. Visbeidzot, zinātnisko pētījumu veikšana nav iedomājama bez vakuma.

Arī ikdienā mēs izmantojam un sastopamies ar vakuumu vai iekārtām, kuras izmanto vakuma iegūšanas principus, piemēram, pārtika u.c. lietas vakuma iepakojumā, putekļu sūkšana un citur. Ir arī interesanti vakuma pielietojumi - piemēram, bišu medus sviešanai, pieminēts grāmatā “Biškopība” [1] kā inženiera I. Akmens ideja.

Vakuumtehnikas vēsture sākas jau I gs.p.m.ē. ar Herona šlīrces un Ketezbija ūdens sūkņa izgudrošanu. Turpmāk, līdz pat XVII gs.m.ē., tukšums (vakums) bija tikai reliģiskas dabas jaufajums. Vakuumtehnikas vēsturi interesanti apraksta P.A. Redhead darbā “History of Vacuum Devices” [2]. Autors norāda, ka pirmos eksperimentus vakuma iegūšanā veica Leidenes Reneri sadarbībā ar Dekartu 1631. gadā un pirmo pierakstīto eksperimentu vakuma iegūšanai veica Gasparo Berti 1641. gadā. Tie bija eksperimenti ar ūdens barometru, kurus vēlāk atkārtoja Vinčenco Viviani 1644. gadā, ūdens vietā izmantojot dzīvsudrabu. Iespējams, ka šo eksperimentu izplānoja Evandželisto Toričelli jau 1643. gadā, kuram vēsturnieki arī piedēvē šo eksperimentu.

Dažus gadus vēlāk - 1650. gadā vācu fizikis Otto fon Gerike izgudroja pirmo mehānisko gaisa sūkni, un tieši šeit var runāt par vakuumtehnikas kā tādas rašanos [3, 4]. Taču līdz pat XIX gs. vakums tika izmantots vienīgi ūdens pacelšanai no akām.

Aktīva vakuumtehnikas attīstība sākas ap 1850. gadu, jo vakums kļūst nepieciešams zinātnei un vēlāk arī radiolampu izgatavošanai. Tālākā vakuumiekārtu attīstība notika līdz ar tehnikas progresu. Mūsdienās vakuumiekārtas kļūst jaudīgākas un pieejamākas, taču vakuma iegūšanas principi ir nemainīgi kopš atklāšanas, arī augstākā iegūtā vakuma pakāpe faktiski nemainās kopš 1964. gada [5] $\sim 10^{-15}$ tori.



1 Vakuuma fizika

1.1 Galvenie jēdzieni

Kas tad ir vakuums? Vai “tukšums” – kā tas izriet no vārda latīniskās nozīmes? Bet izmantojamais vakuums ir ļoti tālu no pilnīga tukšuma, arī ultra augstā vakuumā ir pilns ar molekulām katrā kubikcentimetrā telpas. Visbiežāk atrodamā definīcija:

- ! vakuums kādā dotajā tilpumā ir tad, ja šajā tilpumā gāzes spiediens ir mazāks par atmosfēras spiedienu zemes līmenī [6, 7].

Analoģiska iepriekšējai, bet izmantojot citus parametrus, ir šāda definīcija:

- ! vakuums kādā dotajā tilpumā ir tad, ja šajā tilpumā ir mazāks skaits gāzes daļiņu – atomu un molekulu, nekā apkārtējā atmosfērā [8].

Vēlāk noskaidrosim, ka vakuumu iespējams definēt arī izmantojot vidējo molekulu brīvā ceļa garumu.

Skaitliski vakuumu raksturo kā starpību starp atmosfēras spiedienu un absolūto spiedienu vakuumsistēmā. Tāpēc vakuumu mēra tādās pašās mērvienībās kā spiedienu, tomēr visbiežāk izmanto mērvienību Torr (tors), par godu Toricelli, kas ir tas pats vecais labais dzīvsudraba staba milimetrs jeb mmHg. Tas 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 = $133,32239 \text{ N/m}^2$.

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

- gāze ir molekulu kopa, kuras nepārtrauki un haotiski kustas;
- 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.

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**

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

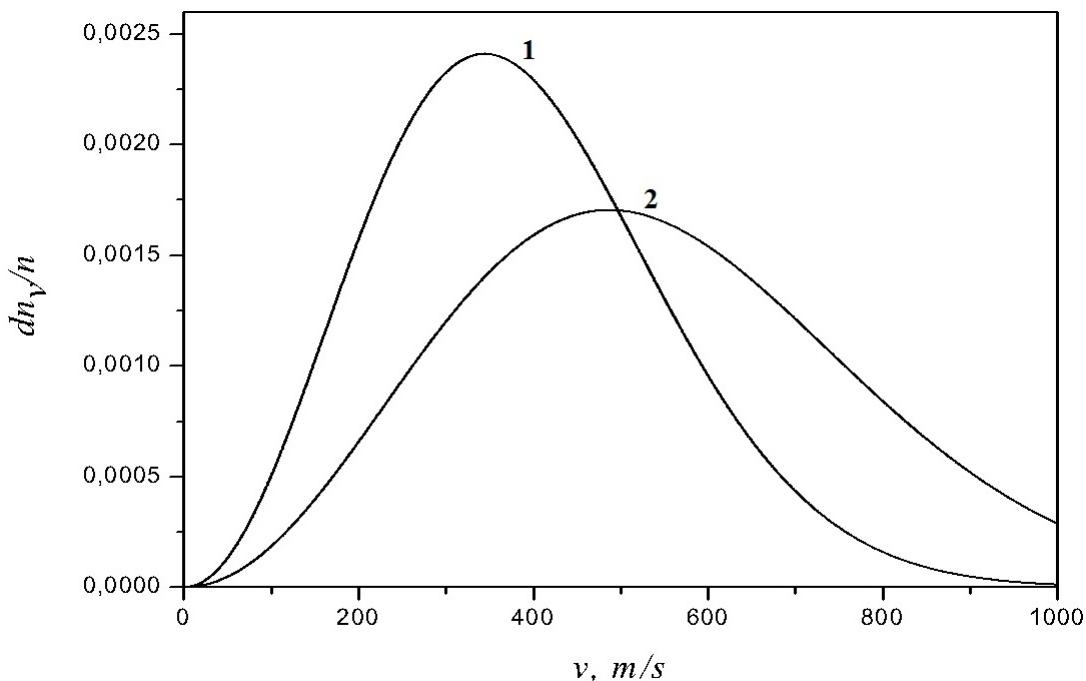
Formulu, molekulu spiediena vai mijiedarbības spēka ar vakuumkameras sienas laukuma vienību izskaitlošanai, var iegūt, izmantojot divas pirmās hipotēzes un otro Nūtona likumu:

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

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:

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



1.1. zīmējums. Slāpekļa molekulu sadalījums pa ātrumiem.

1 - $T = 200\text{K}$, 2 - $T = 400\text{K}$.

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 kīmiski nereāgējušu 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. Šoti zemu spiedienu apgabalā šie nosacījumi neizpildās [7].

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:

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

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:

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

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

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

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

1.2 Vakuuma pakāpes

No iepriekš teiktā zinām, ka vakuumu definē, izmantojot spiediena jēdzienu. Tomēr vakuumtehnikā svarīga loma ir molekulu brīvā ceļa garumam, ar kura palīdzību mēs varam definēt dažadas vakuuma pakāpes. Bet, sakarā ar to, ka molekulās kustas 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 molekulās 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 vakuma pakāpju definēšanā. Izšķir trīs vakuma pakāpes [9]:

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

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

Mūsdienu vakuma industrijā tomēr lieto vakuma pakāpes, kuras definē ar spiediena palīdzību:

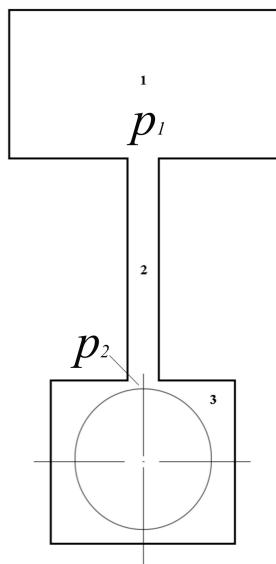
- zems (coarse) vakuums – $760\text{--}1 \text{ Torr}$;
- vidējs (rough) vakuums – $1\text{--}10^{-3} \text{ Torr}$;
- augsts (high) vakuums – $10^{-4}\text{--}10^{-8} \text{ Torr}$;
- ultra augsts (ultra high) vakuums – $10^{-9}\text{--}10^{-12} \text{ Torr}$.

Ir sastopams arī jēdziens “ekstremāli augsts vakuums” (extreme high vacuum) [5] – spiediens mazāks par 10^{-13} Torr .

1.3 Atsūknēšanas procesa teorija

Apskatīsim vienkāršāko vakuumsistēmu, attēlotu 1.2. zīmējumā. Pieņemsim, ka gāzes daudzums kamерā 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



1.2. zīmējums. Vienkārša vakuumsistēma.

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

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 atšķiras, ir nepieciešams nošķirt jēdzienus – vakuumkameras atsūknēšanas ātrums un sūkņa atsūknējošās darbības ātrums.

- !** Vakuumkameras atsūknēšanas ātrums ir gāzes tilpums, kas vienā laika vienībā ieplūst 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 ieplūst 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 ieplūst 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 citiem 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 ieplūst pa blīvējumu vietām.

- !** Sūkņa produktivitāte ir gāzes plūsma, kas ieplūst 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.

2 Vakuumsūknī

Visus vakuumsūknus var iedalīt divas grupās – atkarībā no tā, vai sūknī notiek gāzes pārvietojums vai arī gāzes absorbcija. Pārvietojuma sūknos gāzes molekulas tiek pārvietotas noteiktā virzienā, izmantojot spiedienu starpību vai molekulām piešķirto momentu. Sorbcijas sūknos gāzes molekulas tiek “notvertas” sistēmas virsmās. Šīs divas sūknī grupas dala arī sīkākās apakšgrupās – pēc to darbības principa. Izvēloties sūknī vakuumsistēmai, svarīgi izsvērt veicamos uzdevumus un nepieciešamības. Piemēram, vai ir svarīgi ātri iegūt vakuumu, vai arī ir nepieciešams “tīrs” vakuums - bez eļļas piesārņojuma, vai arī sistēmā nedrīkst rasties mehāniskas vibrācijas u.t.t. Nemazāk svarīgas ir arī izmaksas.

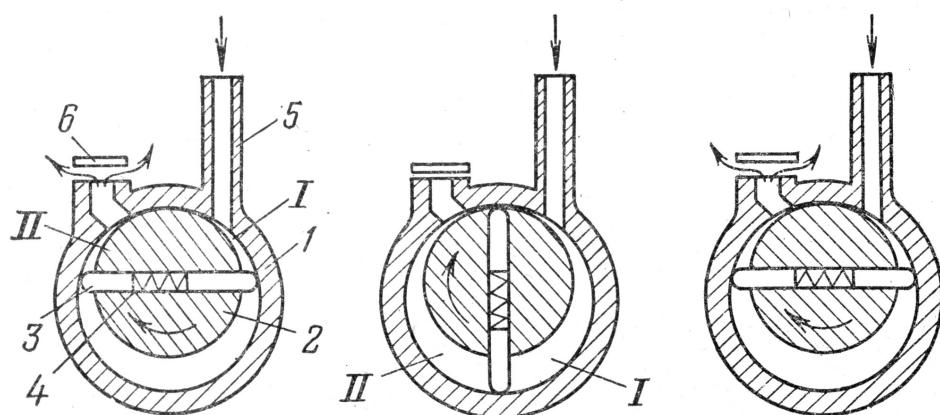
Apskatīt visu sūknī veidu darbības principus nav šī darba uzdevums, tādēļ tiks apskatīta neliela daļa no visiem sūkniem, sniedzot lasītājam priekšstatu par vakuumsūknī uzbūvi un darbību.

2.1 Pārvietojuma sūknī

2.1.1 Tilpuma sūknī

Tilpuma sūknī atsūknē gāzi mainot darba kameras tilpumu. Pie šīs klasses pieder tilpuma oscilāciju sūknī (virzuļu, membrānu (diafragmu), spirāles sūknī) un rotācijas sūknī (plākšņu-rotora, trohoidālie, divrotoru, spirāles, skrūves u.c. sūknī). sūknī. Pārsvarā šos sūknus izmanto priekšvakuma iegūšanai. Darbības principi tiem ir līdzīgi, tāpēc apskatīsim tikai dažus.

2.1. zīmējumā ir redzama **plākšņu-rotora** sūknīa shematiska 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



2.1. zīmējums. Plākšņu-rotora sūknis.

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

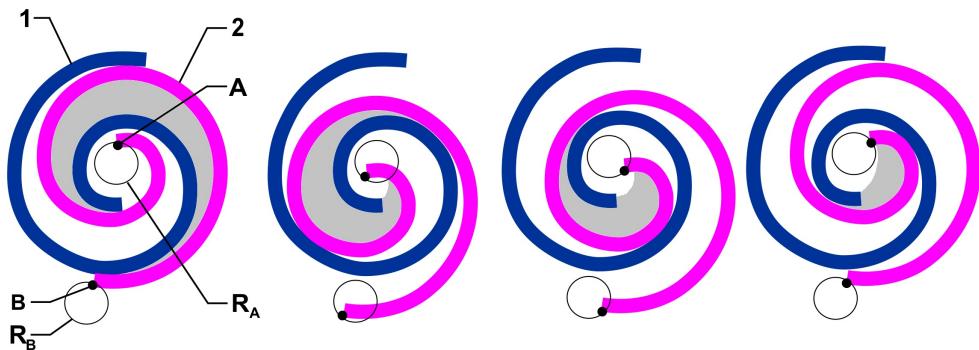
dobums. Iesūkšanas dobums I rotācijas laikā palielina savu tilpumu, un tajā caur ieejas cauruli 5 ieplūst gāze no atsūknējamā tilpuma. Tilpums II samazinās, un tajā notiek gāzes saspiešana. Šis tilpums ir savienots ar izejas vārstu 6. Kad spiediens tilpumā II būs pietiekams, vārsts atvērsies un notiks 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 ellošanu. Tāda pati loma eļļai 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 otrs atsūknēšanas kamera rada retinājumu pirmās izejā.

Spirāles sūknī tiek izmantotas divas spirāles (2.2. zīmējums), no kurām viena ir nekustīga (zilā krasā), bet otra (roza krāsā) pārvietojas attiecībā pret pirmo - tās centrs A apraksta nelielu riņķa līniju R_A , sākumpunts B apraksts riņķa līniju R_B , bet pati spirāle nerotē. Kustīgā spirāle vairākās vietās pieskaras nekustīgajai, un šīs kontakta vietas nepārtraukti pārvietojas, veidojot "kabatas" (pelēkā krāsā) gāzei. Kabatas arī pārvietojas, reizē virzot kabatā esošo gāzi uz izeju. Paliekošais spiediens spirāles sūkņos ir $\approx 10^{-2}$ Torr, šajos sūkņos neizmanto eļļu, tāpēc tie nerada eļļas piesārnojumu kamerā.

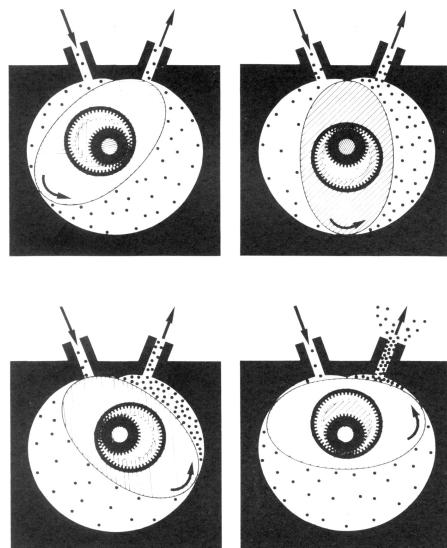
Trohoidālajos¹ sūkņos darba kamerai un rotoram ir īpaša forma (2.3. zīm.). Iesūkšanas un izsūkšanas dobuma tilpums mainās, īpašā veidā rotējot elipsveida rotoram trohoidālās formas kamerā. Paliekošais spiediens šādos sūkņos ir $\approx 5 \cdot 10^{-2}$ Torr.

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



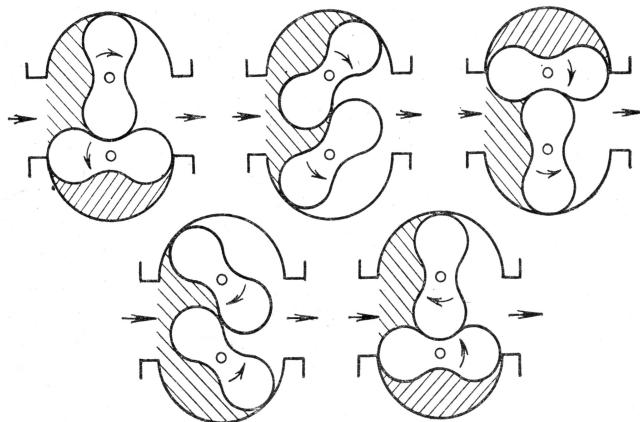
2.2. zīmējums. Spirāles sūkņa darbība.

1 - nekustīgā spirāle, 2 - kustīgā spirāle, A - kustīgās spirāles centrs, B - kustīgās spirāles sākumpunkts, R_A , R_B - atbilstošo punktu aprakstītās riņķa līnijas.



2.3. zīmējums. Trohoidālā sūkņa darbības fāzes.

Divrotoru sūkņa darbības shēma redzama 2.4. zīmējumā. Sūkņa darba kamerā atrodas divi rotori, kuru forma atgādina astotnieku. Šie rotori griežas sinhroni viens pretī otram. Darba gaitā rotori nepieskaras 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 priekšvakuumu sūknis. Divrotoru sūkņiem (ar pievienotu priekšvakuumu sūknī) paliekošais spiediens var būt līdz pat $5 \cdot 10^{-5}$ Torr.



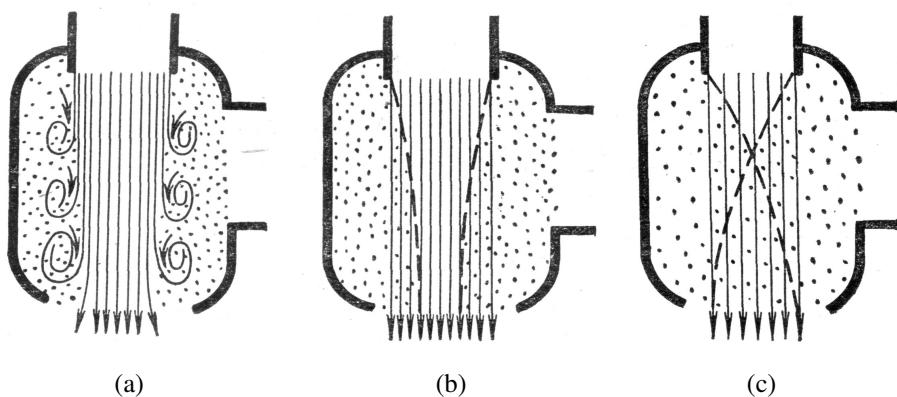
2.4. zīmējums. Divrotoru sūknī darbības fāzes.

2.1.2 Strūklas sūknī

Strūklas sūknos gāzi no vakuumkameras atsūknē, izmantojot ātri plūstošu šķidruma vai gāzes (tvaika) strūklu. Praksē tiek izmantoti galvenokārt tvaika strūklas sūknī, tāpēc apskatīsim tikai šo sūknī 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 sūknī veidus, kuri atšķiras gan pēc gāzes atsūknēšanas mehānisma, gan pēc konstrukcijas:

- ežektorsūknī ($760 - 10^{-2}$ Torr);
- brūustersūknī ($10^{-1} - 10^{-4}$ Torr);
- difūzijssūknī (zem 10^{-4} Torr).

Zīmējumā 2.5. ir shematiiski attēloti trīs gāzes atsūknēšanas ar tvaika strūklu mehānismi. Lielā ieejas spiediena gadījumā ($760 - 10^{-2}$ Torr) tvaika strūklai jābūt pietiekoši blīvai,



2.5. zīmējums. Gāzes atsūknēšanas ar tvaika strūklu mehānismi.

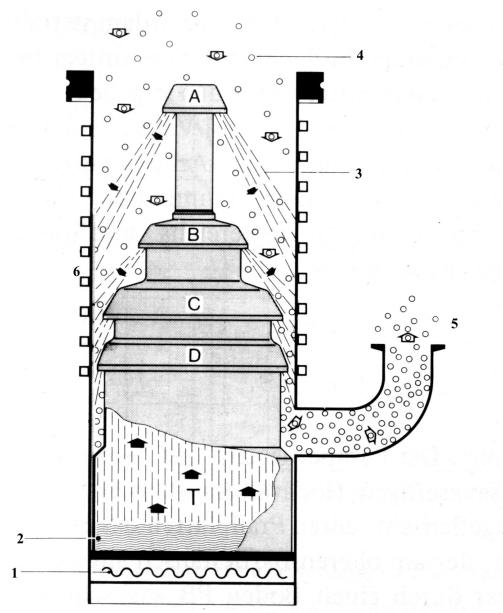
un, atkarībā no tās izplūšanas apstākļiem, šī plūsma var būt vai nu turbulentā (2.5. (a) zīm.)

vai lamināra (2.5. (b) zīm.). Turbulentā plūsmā gāzes “aizraušana” notiek galvenokārt tādēļ, ka gāze sajaucas ar virpuļveidā plūstošo tvaika masu. 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 (2.5. (c) zīm.), un šeit 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 strūklas sūknī darbības spiedienu diapazons galvenokārt ir atkarīgs no tvaika plūsmas blīvuma, kurš, savukārt, ir atkarīgs no sūknī konstrukcijas. Šādu sūkņu īpašības un konstrukciju nosaka arī darba šķidrums, kas visbiežāk ir vakuumella. Visiem tvaika strūklas sūknim izejā ir jārada priekšvakuum.

Agrāk vakuumiekārtās bieži tika izmantoti **difūzijsūknī** (2.6. zīm.). Šādu sūkņu paliekošais spiediens ir līdz $4 \cdot 10^{-7}$ Torr, ja sūknī ieejā tiek izmantoti slazdi.

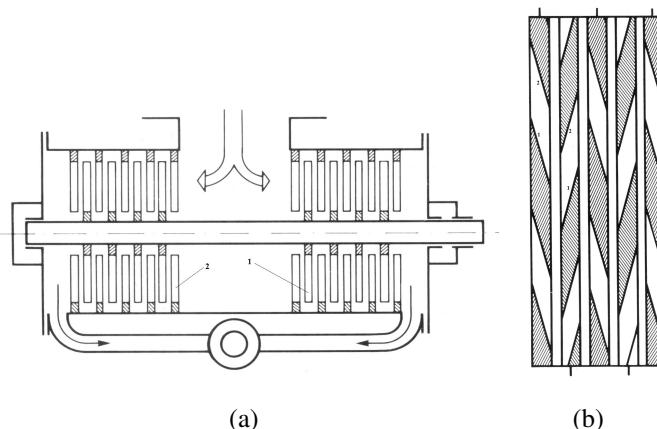


2.6. zīmējums. Difūzijas sūknis.

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

2.1.3 Molekulārie sūknī

Molekulārajos sūknos gāze tiek pārvietota ar nepārtraukti kustībā esošām cietām virsmām, piemēram, gluds cilindrisks rotors, kurš ātri rotē starp tuvu esošām cilindriskām sienām – viena iekšpusē un viena ārpusē rotoram. Veiksmīgāki ekspluatācijā izrādījās **turbomolekulārie sūknī** – šāda sūkņa shematska uzbūve redzama 2.7. (a) zīmējumā. Sūkņa galvenās sastāvdaļas ir rotoru diskī 1 un statoru diskī 2. Gan rotoriem, gan statoriem



2.7. zīmējums. Turbomolekulārais sūknis.

ir radiāli slīpi (attiecībā pret diska plakni leņķī $40 - 15^\circ$) kanāli, pie tam, rotora kanāli ir spoguļveidā attiecībā pret statora kanāliem (2.7. (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. Tajā pat laikā molekulas no labās puses, visticamāk tiks atstarotas no sienas 2 atpakaļ atsūknēšanas virzienā. Rezultātā, molekulas papildus 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 atpakaļošās gāzes plūsma.

Taču vēl veiksmīgāks par turbomolekulāro sūknī izrādījās turbomolekulārā un molekulārā sūkņa apvienojums – **hibrīdais turbomolekulārais sūknis**. Šiem sūkņiem ieejā ir turbomolekulārais sūknis, bet pirms izejas vēl arī molekulārais sūknis. Rezultātā šādiem sūkņiem ir augstāki atsūknēšanas ātrumi un arī augstāks paliekošais vakuums – līdz pat 10^{-11} Torr. Ja tiek izmantoti magnētiskās levitācijas vai keramiskie gultni, nav arī kameras piesārņojuma ar eļlu. Pašreiz hibrīdie molekulārie sūkņi ir faktiski izspieduši turbomolekulāros sūknus, tāpēc, nosaukums “turbomolekulārais sūknis” visbiežāk nozīmē “hibrīdais turbomolekulārais sūknis”. Visiem molekulārā tipa sūkņiem izejā nepieciešams

priekšvakuma sūknis.

2.2 Sorbcijas sūknī

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

2.2.1 Kriosorbcijas (ceolīta) sūknī

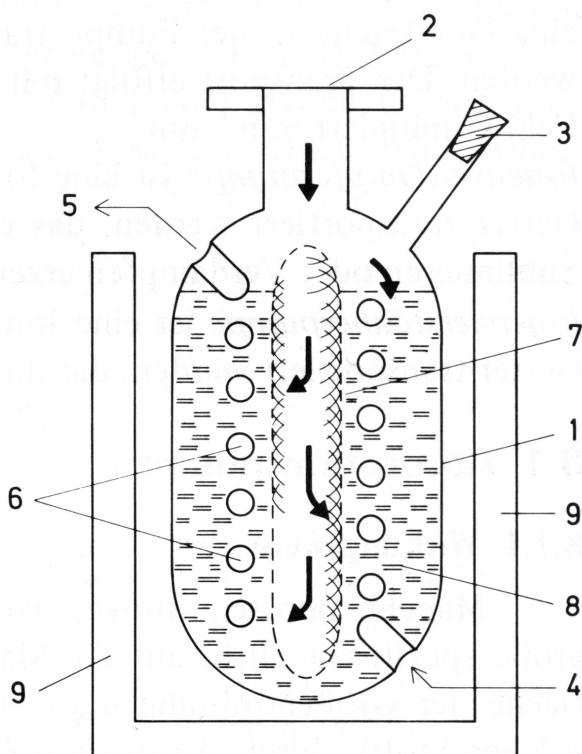
Kriosorbcijas sūknos izmanto dažu porainu cietvielu spēju zemās temperatūrās absorbēt gāzes un tvaikus. Kā absorbētu šādos sūknos visbiežāk izmanto ceolītu¹. Porainu struktūru šie materiāli iegūst pēc uzkarsēšanas, pie tam, to kristālrežģis netiek sagrauts. Pēc kristāliskā ūdens izvākšanas tiek iegūtas vienādu izmēru poras, kurās var ieklūt 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 2.8. zīmējumā. Nerūsējoša tērauda cilindrā 1 atrodas ceolīts 8. Lai sūknī 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 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 sūknī no bojājumiem, šim gadījumam ir paredzēts vārstīs (korkīs) 3. Pēc uzkarsēšanas (reģenerācijas) sūknis ir gatavs nākošajam atsūknēšanas ciklam.

Parasti ceolīta sūknus izmanto gāzes atsūknēšanai spiedienu diapazonā $760 - 10^{-4}$ Torr, bet ir arī augstvakuma ceolīta sūknī (līdz pat 10^{-8} Torr). Šo sūknī priekšrocība – tie nerada vakuumkameras piesārņojumu ar eļļu. Trūkumi – tie slikti atsūknē inertās gāzes, nepieciešamība lietot šķidru slāpekli, kā arī darbības cikliskums - reģenerācijas nepieciešamība.

2.2.2 Jonu iztvaicēšanas sūknī

Jonu iztvaicēšanas sūknos darbojas vairāki gāzu absorbcijas mehānismi – fiziskā absorbcija, ķīmiskā absorbcija, ķīmiskās reakcijas un šķīšana vielas slānītī, kas veidojas kondensejoties iztvaicētam metālam, visbiežāk – titānam. Šāda sūkņa shematisks attēls redzams 2.9. zīmējumā. No U veida iztvaicētāja 2 tiek iztvaicēts titāns, kas kondensējas uz kameras sienām 4 (tās tiek dzēsētas ar ūdeni). Titāns ir aktīvs metāls, kurš veido savienojumus ar visām gāzēm, izņemot inertās un oglūdeņražus. Tāpēc atsūknējamā gāze

¹Ceolīti - sārmu metālu alumīnija silikāti.



2.8. zīmējums. Ceolīta sūknis.

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

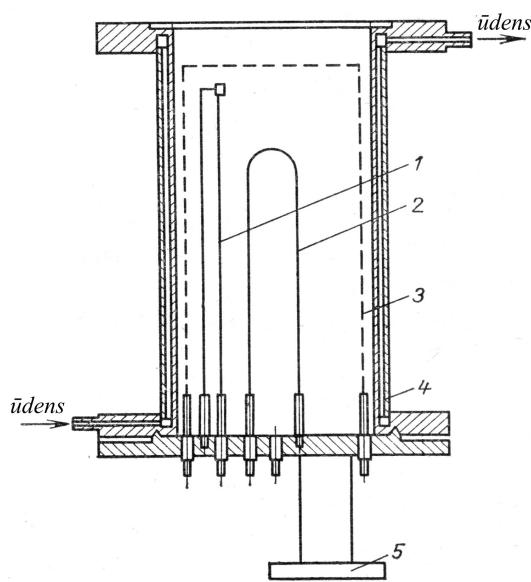
tieka saistīta šajā titāna plēvītē, kura nepārtraukti atjaunojas. Inerto gāzu atsūknēšanu var veicināt, tās jonizējot, ko panāk ar volframa elektrodu 1, kas emitē elektronus. Šādu sūknī darbības diapazons ir no $\sim 10^{-3}$ līdz $\sim 10^{-9}$ Torr, darbības ātrums – līdz pat 450 l/s. Trūkumi – maz efektīvi inerto gāzu atsūknēšanā, periodiski ir jāattīra kameras sienas no uzklātās titāna plēves un jāatjauno iztvaicētājs.

2.2.3 Magnētiskie gāzizlādes sūknī – magnetroni

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

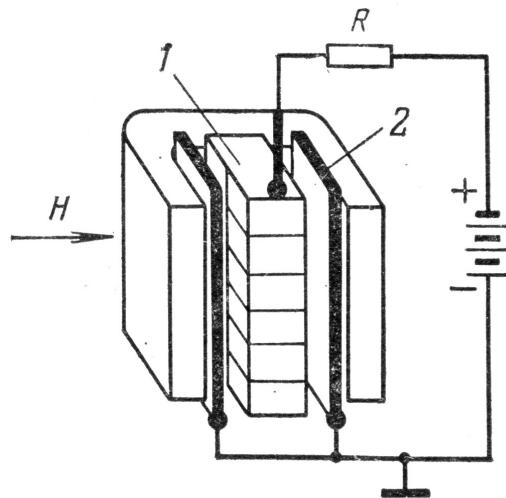
Sūknī anods 1 (2.10. zīm.) tiek izgatavots šūnu veidā un novietots starp diviem (diodes shēmā) aktīvā metāla (visbiežāk – titāna) katodiem 2. Šī sistēma tiek ievietota magnētiskajā laukā, kas ir perpendikulārs katodu plaknei.

Radot starp anodu un katodiem vairāku tūkstoši voltu spriegumu, anoda šūnās iedegas



2.9. zīmējums. Jonu iztvaicēšanas sūknis.

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



2.10. zīmējums. Diožu magnētizlādes sūknis.

1 - anods, 2 - katodi.

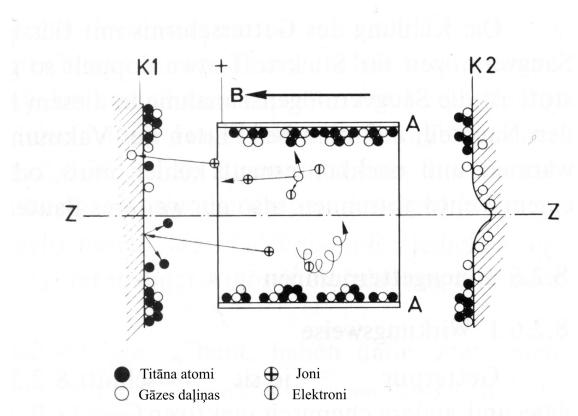
gāzizlāde. Šeit magnētiskā un elektriskā lauka konfigurācija ir tāda, ka izlāde notiek plašā spiedienu diapazonā – no $\sim 10^{-3}$ līdz pat augstam vakuumam. Pozitīvie gāzes joni, kas veidojas izlādē, paātrinās elektriskajā laukā katodu virzienā un ietriecas tajos – notiek katodu izputināšana. No katodiem tiek izsisti 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 katodā var tik absorbētas, tomēr arī ar magnētizlādes 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 mērišanai.

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 (2.11. zīm.).



2.11. 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.

2.2.4 Kondensācijas (kriogēnie) sūkņi

Kondensācijas sūkņos gāzi saista uz cietu vielu virsmām, kuras ir atdzēsētas līdz ļoti zemām (kriogēnām) temperatūrām – ~ 20 K. Parasti izmanto vairākas aktīvas virsmas – ārējā virsma, kuru atdzessē līdz 80K, tā iekļauj iekšējās virsmas, kas izgatavotas līdzīgi vairākiem apgāztiem šķīvjiem. Iekšējām virsmām aktīvas ir abas puses – gan augšējā, gan apakšējā. Parasti virsmas atdzessē ar hēlija kriokompresoru, kas tiek pievienots sūknim ar

izolētām caurulēm. Kriosūknī ir diezgan populāri pusvadītāju industrijā, kur nepieciešami augsti atsūknēšanas ātrumi un “tīrs” vakuums - bez eļļas piesārņojuma.

Līdzīgs princips ir zemu temperatūru slazdiem, kas ir domāti, lai uzlabotu vakuuma “tīrību” – atkal, galvenokārt, lai nepieļautu sūkņu eļļu nokļūšanu vakuumkamerā. Šādu slazdu izmantošana ir samērā reta parādība, jo ir iespējams iegūt augstu vakuumu, neizmantojot sūkņus, kuri rada eļļas piesārņojumu, piemēram, turbomolekulāros un magnetronus.



3 Spiediena mērīšanas iekārtas

Neatņemama vakuumiekārtu sastāvdaļa ir spiediena mērīšanas iekārtas, kuras, var iedalīt pēc darbībā izmantotās fizikālās parādības [6]:

- gāzes radītais spiediens,
- gāzes viskozitāte,
- impulta pārnese vai lielums,
- siltumvadītspēja,
- jonizācija.

Neeksistē universāls manometrs – tāds, kurš varētu kvalitatīvi mērīt no atmosfēras spiediena līdz pat ultra augstam vakuumam. It īpaši problemātiski ir veikt mērījumus ekstremāli augsta vakuma apstākļos. Šai tēmai ir veltīts ne mazums publikāciju – [10–14] u.c. Tādēļ parasti vakuumiekārtās ir vairāki manometri – dažādām vakuma pakāpēm. Apskatīsim biežāk izmantojamo manometru darbības principus.

3.1 Gāzes radītā spiediena manometri

Šķidruma manometros mērāmais spiediens (vai spiedienu starpība) līdzsvarojas ar šķidruma staba spiedienu. Tie ir visi U veida manometri un to modifikācijas. Mērījumu diapazons ir no 760 līdz $\sim 10^{-1}$ Torr. Mūsdienu vakuumiekārtās šādus manometrus neizmanto, taču skolas fizikas laboratorijās, kā arī demonstrācijās tie ir ļoti labi izmantojami.

Deformācijas manometros spiediens ir proporcionāls kāda jūtīgā elementa (membrānas, silfona u.t.t.) deformācijai. Pie tam, šo deformāciju ir iespējams mērīt dažādos veidos - izmantojot pjezoelementus (pjezosensori), nosakot elektriskās kapacitātes izmaiņas (kapacitātes manometri), vai arī, nosakot mehāniskos spriegumus membrānā. Mērījumu diapazons – no 760 līdz $\sim 10^{-1}$ Torr.

Kompresijas manometros darbības princips balstās uz ideālas gāzes izotermiskās saspiešanas likumu. Mērījumu diapazons – no $\sim 10^{-2}$ līdz $\sim 10^{-4}$ Torr.

3.2 Gāzes viskozitātes manometri

Gāzes viskozitātes manometri mūsdienām vakuumiekārtās parasti netiek izmantoti. Šajos manometros tiek novērota kāda kustīga objekta mijiedarbība ar gāzi. Piemēram - **dekrēmenta manometrs**. Šādos manometros novēro svārsta (arī rotācijas svārsta) svārstību amplitūdas samazināšanos atkarībā no gāzes daudzuma kamerā. Mērījumu diapazons – no 1 līdz $\sim 10^{-4}$ Torr. **Rotācijas molekulārajā manometrā** izmanto divus rotējošus diskus, novietotus nelielā attālumā. Vienam diskam liek rotēt ar konstantu ātrumu, otrs, savukārt, molekulu impulsa pārneses dēļ nedaudz novirzīsies no sakotnējā stāvokļa, pie tam, šīs novirzes lielums būs atkarīgs no molekulu daudzuma kamerā. Mērījumu diapazons – no $\sim 10^{-4}$ līdz $\sim 10^{-9}$ Torr.

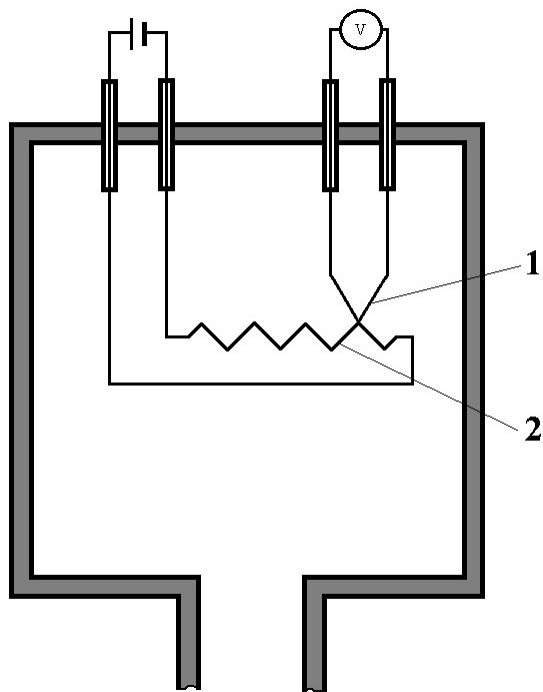
3.3 Impulta pārneses manometri

Impulta pārneses manometru grupai pieder tā sauktais **radiometriskais (Knudsena) manometrs**. Šeit tiek izmantotas divas noteiktā attālumā novietotas plāksnītes. Viena plāksnīte tiek uzkarsēta, savukārt otras nobīdi ir iespējams precīzi noteikt. Aukstās plāksnes nobīdi rada molekulu atnestais impulss, tā ir atkarīga gan no karstās plāksnes temperatūras, gan molekulu daudzuma kamerā. Mērījumu diapazons – no $\sim 10^{-3}$ līdz $\sim 10^{-5}$ Torr.

3.4 Siltumvadītspējas manometri

Siltumvadītspējas manometri tiek bieži izmantoti vakuumiekārtās. Viens no paveidiem ir tā sauktais **Pirani manometrs** vai termoelektriskās pretestības manometrs. Šeit izmanto divus kvēldiebus, viens no kuriem ir ievietots fiksēta spiediena gāzē, savukārt otrs atrodas kamerā. Šie kvēldiegi tiek uzkarsēti ar strāvas palīdzību, un temperatūra tiek uzturēta konstanta, pie tam tie ir klasiskā Vinstona pretestību tilta daļas. Molekulas, mijiedarbojoties ar kvēldiejiem, daļu no enerģijas aizvada prom, līdz ar to kvēldiegu temperatūra un pretestība mainās atkarībā no molekulu daudzuma. Mērījumu diapazons – no 10 līdz $\sim 10^{-5}$ Torr.

Termopāra manometrā tiek izmantots termopāris, kas ir piemetināts pie kvēldiega (3.1. zīm.). Kvēldiegs tiek uzkarsēts ar konstantu strāvu, tā temperatūra būs atkarīga no apkārtējās gāzes daudzuma. Mērījumu diapazons – no 10 līdz $\sim 10^{-3}$ Torr.



3.1. zīmējums. Termopāra manometrs. 1 – termopāris, 2 – kvēldiegs.

3.5 Jonizācijas manometri

Jonizācijas manometri ir plašākā manometru grupa un, līdz ar to, arī biežāk izmanto tā. Faktiski visi jonizācijas manometri izmanto vienu un to pašu principu - gāze kamerā tiek jonizēta un tādēļ pārvietojas uz ierīces negatīvo elektrodu - rodas gāzes jonu strāvas plūsma, kas ir atkarīga no gāzes daudzuma kamerā. Atkarībā no jonizācijas paņēmienā arī izšķir dažādus šo manometru veidus. Darbības princips šiem manometriem ir analogisks jonizācijas sūkņu darbības principiem, tādēļ arī nosaukumi ir līdzīgi.

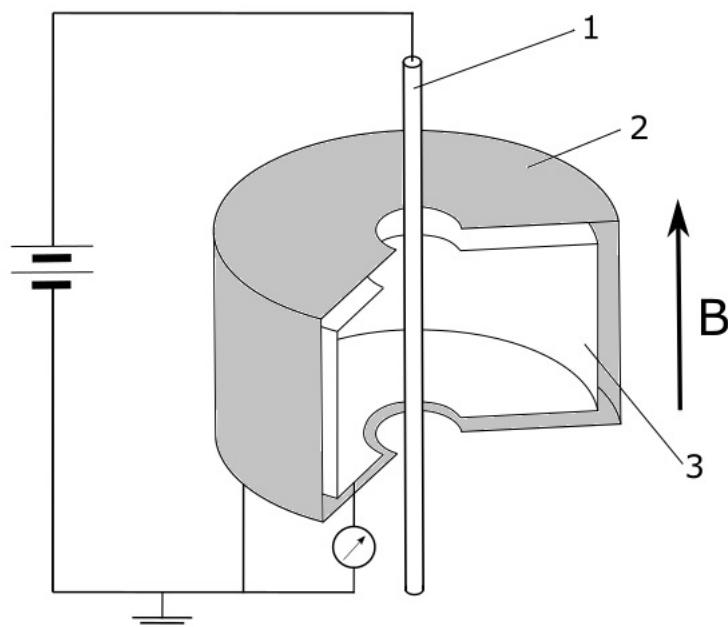
Karstā katoda manometros (KKM) izmanto elektronu plūsmu no karsta kvēldiega. Elektroni tiek paātrināti ar elektriskā lauka palīdzību un jonizē kamerā esošo gāzi. Ir zināmi Baijarda-Alperta (B-A) manometri un Šulca-Felpsa (S-P) manometri, kuri atšķiras tikai ar elektrodu lielumu un savstarpējo novietojumu, kā arī citi šo manometru paveidi.

Aukstā katoda manometros (AKM) tiek novērsta KKM problēma - kvēldiega darbības laiks ir samērā īss, jo to stipri ietekmē dažādi ķīmiskie savienojumi, kā arī pozitīvie joni. AKM jonizējošie elektroni ir daļa no pašuzturošas izlādes. Bet, tā kā AKM nav karsta kvēldiega, tad izlādi ierosina ar izkliedēta lauka emisiju vai ārējiem ierosinātājiem (kosmiskais starojums vai radioaktīvā sabrukšana). Manometra magnētiskais lauks piespiež elektronus kustēties pa cirkulārām orbītām, nodrošinot tiem garu kustības ceļu un, tādējādi, iespēju jonizēt gāzi kamerā. Jonu strāva tad tiek mērīta, lai noteiktu spiedienu kamerā.

Tiek izmantotas dažādas elektrodiņu ģeometrijas kombinācijā ar dažādiem magnētiskā lauka virzieniem un stiprumu, panākot maksimāli lielas mērāmās strāvas. Ja manometra centrālie vai noslēdzošie elektrodi ir negatīvi, tad tos dēvē par **magnetroniem**. Ja tie paši elektrodi ir pozitīvi, tad šādus manometrus dēvē par **invertajiem magnetroniem**.

Magnetrona tipa manometrus pazīst arī kā Peninga manometrus, jo pirmo šāda veida ierīci 1937. gadā piedāvāja Penings [15]. Šo manometru darbības spriegums ir ierobežots (ap 2 kV), lai izvairītos no lauka emisijas efektiem, kuri, savukārt, rada jonu strāvu, kas nav atkarīga no spiediena kamerā. Tādēļ magnetronu mērījumu diapazons ir neliels – 10^{-3} – 10^{-5} Torr, kas ierobežo to komerciālu izmantošanu.

Invertajos magnetronos (3.2. zīm.) lauka emisijas problēma ir novērsta - šeit izmanto aksiālu centrālu anodu un cilindrisku katodu. Cilindriskais katods darbojas kā elektrostatisks vairogs un pasargā atvērtās konstrukcijas šķautnes no lādiņa koncentrēšanās, tādējādi novēršot lauka emisijas iespēju. Inverta magnetronu darbības diapazons ir no 10^{-4} līdz 10^{-13} Torr. Ir zināmi komerciāli pieejami invertie magnetroni ar mērījumu diapazonu 1 – 10^{-11} Torr.



3.2. zīmējums. Invertaais magnetrons. 1 – anods, 2 – ārējais katods, 3 – jonu kolektors.



4 Vakuumiekārtu apkope

Šajā nodaļā vēlos apkopot dažus praktiskas dabas ieteikumus darbā ar vakuumiekārtām.

- Iespējams, svarīgākā vakuumiekārtu sastāvdaļa ir blīvējums starp dažādām iekārtas daļām. Ir virkne dažādu blīvējuma risinājumu, it īpaši, ja nepieciešams vakuumsistēmā nodrošināt kādu detaļu kustības iespēju. Arī parasto blīvju materiāls ir būtisks – tā, piemēram, augstvakuma iekārtās izmanto vara blīves, kuras ir vienreizējas lietošanas, tādēļ arī augstvakuma iekārtās vietās, kur ir paredzama bieža atvēršana (paraugu ielādes vietas u.c.) tiek izmantotas “gumijas” blīves jeb “mīkstās” blīves. Patiesībā tā, protams, nav vienkārši gumija, tie ir īpaši materiāli – dažāda veida polimēri un silikoni. Priekšvakuma sistēmās un vidēja vakuma sistēmās pārsvarā izmanto “mīkstās” blīves. Arī no savienojuma veida ir iespējams saprast, kāda veida blīve šeit tiek izmantota. Svarīgi ir izmantot pareiza materiāla blīves sistēmās, kur ir darišana ar kādām ķīmiski aktīvām vielām – tās var sabojāt blīvējumu.
- Mūsdienās vakuumsistēmas parasti tiek datorizētas, viss atsūknēšanas process tiek automatizēts, tomēr svarīgi ir saprast sūkņu darbināšanas secību, jo, kā to bija iespējams saprast no iepriekšējās sadalās apskatītā – katram sūknim ir sava darbības diapazons. Parasti vakuumsistēmām ir divu pakāpju atsūknēšana, ja nepieciešams augsts vakuums – arī trīs pakāpju atsūknēšana. Kā pirms vienmēr tiek ieslēgts priekšvakuma sūknis, pie tam – svarīgi ir panākt to, ka tiek atsūknēta kamera. Tā kā priekšvakuma sūknis ir vajadzīgs arī otrās pakāpes sūkņa izejā (piemēram – turbomolekulārajam sūknim), tad šeit izmanto dažādus risinājumus – var ierīkot atsevišķu kameras atsūknēšanas kanālu ar vairākiem vārstiem tikai priekšvakuma sūknim, vai arī ir iespējams sūknēt caur turbomolekulāro sūkni, kuru ieslēdz tikai

tad, kad kamerā ir sasniegta vajadzīgā vakuuma pakāpe. Svarīgi ir iepazīties ar sūkņu aprakstiem, jo tiem ir nepieciešama regulāra apkope. Eļļas priekšvakuuma sūkņiem būs vajadzīga regulāra eļļas maiņa, ieteicams izmantot īpašas sintētiskās eļļas, kuras rada iespējami mazu eļļas tvaiku rašanos. Membrānu sūkņiem ar laiku būs nepieciešama membrānas nomaiņa, spirāles sūkņos ar laiku nodilst blīvējums starp abām spirālēm, ko arī ir iespējams nomainīt. Arī turbomolekulārajiem sūkņiem ir regulāri jāmaina eļļošanas kapsula, ja sūknī tiek izmantoti tērauda gultņi. Ir turbosūkņi ar keramiskiem un magnētiskās levitācijas gultņiem, kuri ir praktiski brīvi no apkopes nepieciešamības, taču ir arī dārgāki.

- Strādājot augstvakuuma apstāklos klūst svarīgi izvairīties no nelielām gaisa kabatām, kuras var rasties dažādu iemeslu dēļ – skrūves, metinājuma vietas, dažādu detaļu kontakta vietas u.c. Pat nelielas šādas gaisa kabatas noplūde kamerā, kurā ir augsta vakuuma apstākļi, var nopietni palielināt spiedienu. Tādēļ ir ieteicams izmantot īpašas vakuuma skrūves – visā vītnes garumā ir izveidota rieva, pa kuru gaisam ir iespēja izplūst. Ja skrūve tiek ieskrūvēta padziļinājumā, tad, lai novērstu gaisa kabatas veidošanos skrūves galā, tiek izurbta skrūves garenass. Gaisa vai dažādu gāzu kabatas var veidoties metinājuma vietās – ir ieteicams izmantot punktu metināšanu vai lodēšanu, ja nākas izgatavot kādas vakuumā ievietojamas ierīces pašam.
- Ir rūpīgi jāizvērtē dažādu priekšmetu ievietošanu vakuumkamerās, jo lielākoties, ikdienā izmantojamie objekti nav piemēroti darbam vakuumā (piemēram, izolācijas lentas, dažādas smērvielas, līmējumi ar līmēm, elektriskās detaļas u.c.). It īpaši tas ir svarīgi elektronu mikroskopijā, kur var nākties sastapties ar ļoti dažādiem paraugiem. Šeit ir svarīgi apgūt pareizu paraugu sagatavošanas mākslu. Šādi priekšmeti vakuumkamerā var sākt izdalīt dažādas gāzes vai citas vielas, tādējādi neglābjami sabojājot gan vakuumkameru, gan sūknus. Tas attiecas arī uz plastmasu izmantošanu – tie var būt dažādi savienojumi, paraugu turētāji u.t.t. Ir jāpārbauda, vai atbilstošais polimērs ir izmantojams vakuuma apstāklos un, pie tam, cik augsta vakuuma apstākļos.
- Laba vakuuma priekšnosacījums – tīra kamera! Vakuumkamera būtu jātīra regulāri (atkarībā no izmantošanas veida). Tīrīšanai izmanto audumu, kas neatstāj auduma daļas, kā tīrīšanas līdzeklis – spirits vai izopropilspirts. Ja kamera tiek izmantota dažādu pārklājumu iegūšanai, pārklājamais materiāls uzkrājas arī uz kameras sienām, tas klūst par piesārņojuma avotu. Ir atsevišķi materiāli, kuri ir īpaši nevēlamī izmantošanai vakuumsistēmās, piemēram, cinks. Vakuumkamerā mums ierastā mijiedarbība starp trīs vielas agregātstāvokļiem – šķidru, gāzveida un cietu – vairs nenotiek, jo gāzveida fāze tiek aizvākta. Tādēļ uz kameras sienām uzsēdies ūdens vai

elēas slānītis var klūt par problēmu, ko var atrisināt tikai ar visas vakuumkameras uzkarsēšanu. Augsta vakuma sistēmās parasti ir tāda iespēja, dažkārt, ir arī iespēja tīrīt kameru ar jonu plūsmas palīdzību. Līdz ar to, augsta vakuma iegūšanai ir svarīgi neizmantot eļļu nevienā atsūknēšanas posmā.

- Īpašs gadījums vakuumsistēmā ir arī augstu temperatūru izmantošana. Šādā gadījumā klūst svarīga arī karsētāja un parauga turētāja materiāla izvēle, jo augstvakuma apstākļos metāls var sākt “tvaikot” jau krietni pirms kušanas temperatūras sasniegšanas. Kā labākais materiāls šādiem nolūkiem parasti tiek izvēlēts molibdēns.

Literatūra

- [1] J.Ārgailis, K.Balode, M.Bembere, O.Eglītis, F.Galenieks, V.Kamola, A.Kornets, T.Kriškāns, M.Skudriņa, R.Šmite. *Biškopība*. Zvaigzne, Rīga, 1970.
- [2] P.A. Redhead. History of vacuum devices. CAS - CERN Accelerator School : Vacuum Technology, Snekersten, Denmark. pp. 281–290, 1999.
- [3] E.N. da C. Andrade. The History of the Vacuum Pump. *Adv. Vac. Sci. Tech.* **1**(14), 1960.
- [4] Madey, Theodore E. Early applications of vacuum, from Aristotle to Langmuir. *Journal of Vacuum Science And Technology A*. **2**(2), 110–117, 1984.
- [5] P.A. Redhead. Extreme High Vacuum. CAS - CERN Accelerator School : Vacuum Technology, Snekersten, Denmark. pp. 213–226, 1999.
- [6] A.Roth. *Vacuum Technology*. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, New York, Oxford, 1976.
- [7] G.F. Weston. *Ultrahigh Vacuum Practice*. Butterworth-Heinemann, 1985.
- [8] N. Marquardt. Introduction To The Principles Of Vacuum Physics. CAS - CERN Accelerator School : Vacuum Technology, Snekersten, Denmark. pp. 1–24, 1999.
- [9] H. Adam, A. Bolz, H. Boy, H. Dohmen, K. Gogol, W. Jorisch, W. Mönning, H.J. Mundinger, H.D. Otten, W. Scheer, H. Seiger, W. Schwarz, K. Stepputat, D. Urban, H.J. Wirtzfeld, H.J. Zenker. *Fundamentals of Vacuum Technology*. Oerlikon Leybold Vacuum, 2007.

- [10] A. Paredes, D. Novoa, D. Tommasini. Measuring Extreme Vacuum Pressure with Ultraintense Lasers. *Physical Review Letters*. **109**, 253903, 2012.
- [11] A. Calcatelli. The Development Of Vacuum Measurements Down To Extremely High Vacuum. In *IMEKO 20th TC3, 3rd TC16 and 1st TC22 International Conference Cultivating metrological knowledge*, 2007.
- [12] C. Benvenuti. Extreme High Vacuum Technology For Particle Accelerators. In *Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago*, 2001.
- [13] F. Watanabe. Ion spectroscopy gauge: Total pressure measurements down to 10^{-12} Pa with discrimination against electron-stimulated-desorption ions. *J.Vac.Sci.Technol.* **A10**(5), 3333–3339, 1992.
- [14] P.A. Redhead. UHV and XHV pressure measurements. *Vacuum*. **44**(5), 559–564, 1993.
- [15] F.M. Penning. Ein neues manometer fur niedrige gasdrucke, insbesondere zwischen 10^{-3} und 10^{-5} mm. *Physica*. **4**(2), 71 – 75, 1937.