

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte

Mašīnbūves tehnoloģijas institūts

**Antons ŠTEKLEINS**

Doktora studiju programmas „Ražošanas tehnoloģija” doktorants

# **Vakuummētru pārbaudes metodoloģijas pētījumi**

## **Promocijas darba kopsavilkums**

Nozare: mašīnzinātne

Apakšnozare: mašīnbūves tehnoloģija

Zinātniskais vadītājs

profesors *Dr. sc. ing.*  
**ĒRIKS GERIŅŠ**

RTU Izdevniecība

Rīga 2018

Štekleins Antons. Vakuummetru pārbaudes metodoloģijas pētījumi. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2018. 49 lpp.

Iespiests saskaņā ar Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātes Promocijas padomes RTU P-16 sēdes 2017. gada 14. septembra lēmumu, protokols Nr. 3.

ISBN 978-9934-22-063-0 (print)

ISBN 978-9934-22-064-7 (pdf)

# PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2018. gada 17. aprīlī Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Viskaļu 36a, 405. auditorijā.

## OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. habil. sc. ing.* Viktors Mironovs  
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors *Dr. sc. ing.* Ēriks Kronbergs  
Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Latvija

Profesors *Dr. habil. Sigitas Tamulevicius*  
Kauņas Tehnoloģiskā universitāte, Lietuva

## APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Antons Štekleins ..... (paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, sešas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 69 attēli, 38 tabulas, divi pielikumi, kopā 106 lappuses. Literatūras sarakstā ir 74 nosaukumi.

## SATURS

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJIS RAKSTUROJUMS .....	6
TĒMAS AKTUALITĀTE .....	6
PĒTĀMĀ PROBLĒMA .....	6
DARDA MĒRĶIS UN UZDEVUMI.....	7
PĒTĪJUMA METODES.....	7
ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE.....	8
AIZSTĀVĒŠANAI IZVIRZĪTIE PĒTĪJUMA REZULTĀTI .....	8
PRAKTISKAIS LIETOJUMS .....	8
1.    VAKUUMA TEHNOLOĢIJA.....	10
1.1. Vakuums, pamatprincipi un tā izmantošanas iespējas.....	10
1.2. Vakuuma sistēmas uzbūve .....	11
1.3. Spiedietu mērīšanas metodes un mērinstrumentu klasifikācija .....	13
1.4. Vakuummēru precizitātes, atkārtojamības un kalibrācijas nepieciešamības analīze.....	17
1.5. Vakuummēru precizitātes aprēķins .....	19
2.    JAUNAS EKSPERIMENTĀLAS VAKUUMA IEKĀRTAS IZGATAVOŠANA VAKUUMMETRU PĀRBAUDEI .....	21
2.1. Jaunas eksperimentālas pārbaudes vakuuma iekārtas izgatavošana vakuummēru daudzfunkcionālai testēšanai .....	21
2.2. Jaunas eksperimentālas pārbaudes vakuuma iekārtas sagatavošana eksperimentiem .....	22
2.3. Eksperimentālas pārbaudes vakuuma iekārtas atsūkņēšanas modelēšana, izmantojot <i>OCTAVE</i> datorprogrammu .....	22
2.4. Vakuuma iekārtas tehnoloģiskā nanopārklājuma procesa galvenā kritērija analīze.....	23
3.    VAKUUMMETRU PĀRBAUDE, IZMANTOJOT SECĪGAS METODES.....	25
3.1. Jonizācijas vakuummēru pārbaude, izmantojot eksperimentālo vakuuma iekārtu.....	25
3.2. HPG 400 un BPG 402 jonizācijas vakuummēru pārbaude, izmantojot eksperimentālo vakuuma iekārtu .....	26
3.3. Diafragmas vakuummētra lietošana HPG 400 jonizācijas vakuummēru pārbaudei .....	27
3.4. Gāzes korekcijas ietekme uz vakuummēru rādījumiem.....	28
3.5. BPG 402 jonizācijas un augstas precizitātes diafragmas vakuummētra pārbaude .....	29
3.6. Diafragmas vakuummētra un gāzes ietekmes eksperimentālie pētījumi .....	30
3.7. Diafragmas vakuummētra eksperimentālie pētījumi pirms un pēc nulles iestatīšanas.....	32
3.8. Gāzes plūsmas kontroliera precizitātes eksperimenti .....	32
3.9. Vakuummētra pārbaude, lietojot Stjudenta sadalījumu.....	33

4. SPIEDIENA IETEKME UZ VAKUUMA NANOPĀRKLĀJUMA ĪPAŠĪBĀM UN VIZUĀLO STĀVOKLI.....	34
4.1. SiO <sub>2</sub> nanopārklājuma uznešanas vakuuma iekārta un tās uzbūve.....	34
4.2. SiO <sub>2</sub> nanopārklājuma uznešanas eksperimenti.....	35
5. SiO <sub>2</sub> NANOPĀRKLĀJUMA CAURLAIDĪBAS PROGNOZĒŠANA, LIETOJOT FAZILOĢIKU.....	37
5.1. Faziloģikas pamatprincips un tā izmantošana eksperimentos .....	37
5.2. SiO <sub>2</sub> nanopārklājuma caurlaidības un biezuma faziloģikas modeļa izstrāde.....	37
5.3. Datu defazifikācija un prognozēšanas modeļi .....	38
6. METODOLOĢIJAS IZVEIDOŠANA VAKUUMMETRU PĀRBAUDEI.....	40
SECINĀJUMI .....	42
IZMANTOTĀ LITERATŪRA .....	43
PIELIKUMI .....	47

# PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

## TĒMAS AKTUALITĀTE

Nanotehnoloģija kā zinātne strauji attīstījies pēdējo gadu laikā, un to izmanto vairākās nozarēs: medicīnā, mašīnbūvē, celtniecībā, aviācijā un citās ļoti svarīgās nozarēs. Ļoti izplatīti un pieprasīti ir optiski caurspīdīgi pārklājumi, kas tiek izmantoti celtniecībā, kā arī elektrovadoši caurspīdīgi nanopārklājumi, kas tiek plaši lietoti modernās elektronikas ierīcēs. Unikālo īpašību dēļ tos bieži vien lieto skārienjutīgu ekrānu izgatavošanā. Katram nanopārklājumam tiek definētas noteiktas prasības, optiski caurspīdīgu nanopārklājumu gadījumā tas ir nanopārklājuma biezums un caurlaidības koeficients.

Causrspīdīgo nanopārklājumu uznešana tiek veikta vakuuma iekārtā ar magnetronisko uzputināšanu uz lokšņveida un ruļveida materiāliem, tādiem kā plēves, audums, metāla folijas. Nanopārklājuma iegūtās īpašības un tā vizuālais stāvoklis ir atkarīgs no tehnoloģiskā procesa apstākļiem, kurus galvenokārt nosaka spiediens un apkārtējā vide. Tehnoloģiskā procesā sākumā un nanopārklājuma uznešanas laikā nepieciešams precīzs vakuummeters. Spiediena izmaiņas, vibrācijas un piesārņojums ietekmē nanopārklājuma īpašības un vizuālo stāvokli. Eksploatācijas laikā vakuummetra precizitāte var samazināties, kas būtiski apgrūtina ražošanas procesu.

Nepieciešamības gadījumā vakuummetrus kalibrē speciālās akreditētās laboratorijās atbilstoši noteiktiem standartiem un etaloniem. Atkārtotas kalibrācijas laiks vakuummetram nav noteikts, jo ir atkarīgs no tā eksploatācijas apstākļiem un citiem faktoriem. Tas nozīmē, ka nenoteikta laika posmā vakuummetra rādījumi var izmainīties, palielināties kļūda, tādējādi ietekmējot nanopārklājuma tehnoloģisko procesu, tā vizuālo stāvokli un īpašības ar nosacījumu, ja nav izveidota vakuummetra savlaicīga pārbaudes sistēma. Tādēļ tehnoloģiskā procesa veikšanai ir nepieciešams izmantot precīzu vakuummetru. Bez vakuummetru pārbaudes, iegūtiem datiem un precīzākas izpētes nav iespējams paļauties uz šo mērīšanas ierīci un uzklāt nanopārklājumu ar noteiktiem parametriem.

## PĒTĀMĀ PROBLĒMA

Promocijas darbā tiek pētīta vakuummetru darbība, spiediena mērījumu kļūda un tās ietekme uz vakuuma nanopārklājuma vizuālo stāvokli un īpašībām, kas ir vakuuma nanopārklājuma tehnoloģiskā uznešanas procesa būtiska problēma. Lai iegūtu precīzus un ticamus pētījuma rezultātus, samazinātu un atvieglotu vakuummetra pārbaudes laiku, tika uzprojektēta un izgatavota jauna eksperimentāla vakuummetru pārbaudes iekārta, kas nodrošina  $2 \times 10^{-6}$  Torr robežspiedienu aptuveni 20 minūšu laikā. Lai izpētītu vakuummetru precizitāti un atkārtojamību, darbību, pārbaudītu jonizācijas vakuummetru gāzes korekcijas funkciju un gāzes padeves sistēmas elementus, tika veiktas vakuummetru daudzfunkcionālas pārbaudes, izmantojot laboratorijas vakuuma iekārtu UV80 un jauno izgatavoto eksperimentālo

iekārtu. Balstoties uz promocijas darbā veikto vakuummētru pētījumu rezultātiem, tika izstrādāta vakuummētru pārbaudes metodoloģija vakuuma nanopārklājuma uznešanas procesiem. Šī metodoloģija ļauj pārbaudīt vakuummētrus, izmantojot dažādas metodes, kā arī ļauj pārbaudīt citas vakuuma iekārtas sastāvdaļas, kas ietekmē tehnoloģisko procesu. Tā rezultātā iespējams izstrādāt un uzturēt pētījumu rezultātu datubāzi, izveidot vakuummētra spiediena mērījumu uzvedības modeli, ieviest nepieciešamo korekcijas koeficientu vakuummētra paliekošās kļūdas gadījumā. Tādējādi ir iespējams nodrošināt tehnoloģisko procesu, samazināt dīkstāvi un sasniegt nanopārklājumam noteiktās tehniskās prasības. Bez precīzas pilna spiediena noteikšanas nav iespējams veikt pārklājuma uznešanas procesu. No vakuummētra precīzas darbības ir atkarīgs gala rezultāts. Līdz ar to darba tēma šobrīd ir aktuāla.

## DARDA MĒRĶIS UN UZDEVUMI

**Promocijas darbā mērķis ir izstrādāt vakuummētra pārbaudes metodoloģiju.**

**Mērķa sasniegšanai tika izvirzīti šādi uzdevumi:**

- 1) izanalizēt dažādu vakuummētru darbības principus, uzbūvi, priekšrocības un trūkumus, un to lietojumu atkarībā no spiediena diapazona, apkārtējās vides un nanopārklājuma uzklāšanas tehnoloģiskā procesa;
- 2) uzprojektēt un izgatavot eksperimentālo vakuummētru pārbaudes vakuuma iekārtu, kas nodrošina robežspiedienu  $2 \times 10^{-6}$  Torr;
- 3) izpētīt jonizācijas un diafragmas vakuummētru darbību, izmantojot daudzfunkcionālas eksperimentālas metodes, tādējādi iegūstot rezultātus par vakuummētra darbību un spiediena mērījumu kļūdu;
- 4) veikt silīcija dioksīda (SiO<sub>2</sub>) nanopārklājuma uzklāšanas tehnoloģisko procesu un izpētīt spiediena ietekmi uz nanopārklājuma vizuālo stāvokli un īpašībām;
- 5) izstrādāt SiO<sub>2</sub> nanopārklājuma biezuma un caurlaidības prognozēšanas fizikālas modeli teces apstākļos.

## PĒTĪJUMA METODES

Promocijas darba izstrādes laikā vakuummētru pētījumi tika veikti, izmantojot manis izgatavoto eksperimentālo pārbaudes iekārtu, kā arī laboratorijas iekārtu UV80. Pētījumos tika izmantoti: jonizācijas vakuummētri HPG 400 un BPG 402; diafragmas vakuummētrs CDG 025D.

Eksperimentālos pētījumos iegūtie rezultāti tika grafiski attēloti, izmantojot *Microsoft Excel* un *Microsoft Word* programmatūru. Izstrādātājai vakuummētru pārbaudes iekārtai tika veikta atsūkņēšanas matemātiska modelēšana, izmantojot *OCTAVE* datorprogrammu.

Silīcija dioksīda (SiO<sub>2</sub>) nanopārklājuma īpašību novērtēšanai tika izmantotas šādas iekārtas: nanopārklājuma biezumam – spektroskopijas reflektometers FILMETRICS F20-UV (AS „Sidrabe”), caurlaidības koeficientam – spektrofotometrs MC 122 (AS „Sidrabe”).

Balstoties uz promocijas darba laikā veiktajiem eksperimentālajiem pētījumiem un iegūtajiem rezultātiem, tika izveidoti faziloģiskas modeļi silīcija dioksīda ( $\text{SiO}_2$ ) nanopārklājuma biezuma un caurlaidības prognozēšanai. Modeļu izstrādei un rezultātu grafiskai attēlošanai tika izmantota datorprogramma *FuzzyTECH*.

Izmantojot laboratorijas vakuuma iekārtu UV80, tika veikti spiediena svārstību ietekmes pētījumi uz silīcija dioksīda nanopārklājuma vizuālo stāvokli un īpašībām (biezumu un caurlaidību). Nanopārklājuma uznesšanas tehnoloģiskais process notika pie dažādiem spiedieniem, un, apkopojot iegūtos datus, tika izveidoti pārklājumu paraugu atstarošanas modeļi.

## ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

- 1) Pirmo reizi tika izmantota faziloģiska  $\text{SiO}_2$  pārklājuma biezuma un caurlaidības koeficienta prognozēšanai, imitējot teces apstākļus tehnoloģiskā procesa laikā.
- 2) Tika uzprojektēta un izgatavota jauna eksperimentāla vakuummetru pārbaudes vakuuma iekārta, kas ļauj veikt daudzfunkcionālus pētījumus, balstoties uz kuriem tiek izstrādāta vakuummetru pārbaudes metodoloģija.
- 3) Pilna spiediena mērīšana dod iespēju novērtēt tehnoloģiskā procesa parametrus.

## AIZSTĀVĒŠANAI IZVIRZĪTIE PĒTĪJUMA REZULTĀTI

- 1) Vakuummetru pārbaudes metodoloģija.
- 2) Jauna eksperimentāla vakuummetru pārbaudes vakuuma iekārta.
- 3) Faziloģiskas modeļi  $\text{SiO}_2$  nanopārklājuma caurlaidības koeficienta un biezuma prognozēšanai, imitējot teces apstākļus tehnoloģiskā procesa laikā.

## PRAKTISKAIS LIETOJUMS

Izstrādātā vakuummetru pārbaudes metodoloģija nodrošina vakuummetru un citu vakuuma sistēmas elementu ātru, precīzu un plašu pārbaudi, izmantojot speciāli uzbūvētu jaunu eksperimentālo iekārtu ar mērķi nodrošināt tehnoloģisko procesu, pārklājuma vizuālo stāvokli un īpašības.

Izmantojot aprakstītās metodes, ir iespējams izveidot konkrēta vakuumetra spiediena uzvedības datubāzi un modeļi, ko ir iespējams mainīt un pielāgot, balstoties uz eksperimentālām pārbaudes metodēm. Savukārt uzprojektētā un izgatavotā eksperimentālā pārbaudes vakuuma iekārta ļauj veikt vakuummetru pārbaudi ātri un efektīvi, pateicoties konstruktīviem risinājumiem un turbomolekulāram sūkņim. Izmantojot izstrādāto metodoloģiju, vakuummetru kalibrācijas laiks var būt noteikts, balstoties uz eksperimentāliem testēšanas rezultātiem. Lai nodrošinātu nanopārklājuma uznesšanas tehnoloģisko procesu, ir nepieciešams vadīties pēc precīza vakuumetra un problēmu gadījumā novērst neatbilstības pēc iespējas īsākā laikā. Metodoloģiju var izmantot kā rokasgrāmatu vakuummetru pārbaudei, kā arī citu faktoru novērtēšanai.



Izstrādātie faziloģikas modeļi  $\text{SiO}_2$  nanopārklājuma īpašību prognozēšanai imitē cilvēka loģisko domāšanas procesu un attēlo izvēlēto parametru ietekmi uz nanopārklājuma īpašībām. Izmantojot faziloģikas modeļus, ir iespējams noteikt nepieciešamos parametrus labvēlīgām nanopārklājuma īpašībām, ekonomējot laiku un resursus nelietderīga nanopārklājuma uzklāšanai.

# 1. VAKUUMA TEHNOLOĢIJA

## 1.1. Vakuums, pamatprincipi un tā izmantošanas iespējas

Mūsdienās nanotehnoloģija attīstās un tiek izmantota ļoti daudzās nozarēs, it īpaši mašīnbūvē. Ir zināmi fakti par to, ka nanodaļiņas, kas iegūtas ar nanotehnoloģiskā procesa palīdzību, jau tiek izmantotas mašīnbūvē, celtniecībā un elektronikā. Lai radītu unikālus materiālus ar dažādām uznešanas metodēm vakuumā un veiktu speciālus eksperimentus tālākai zinātnes attīstībai, ir nepieciešama vakuuma tehnika jeb vakuuma sistēma, kas nodrošina un rada attiecīgus apstākļus tehnoloģiskā procesa īstenošanai. Savukārt vakuumu, kas ir šīs sistēmas pamats, var definēt šādi: gāzes spiediens, kas, aizpildot ierobežotu tvertnes tilpumu, ir zemāks par atmosfēras spiedienu.

Ar nanotehnoloģijas izmantošanu mašīnbūvē iespējams uzklāt nanopārklājums uz griešanas instrumentiem, tādējādi uzlabojot vairākus parametrus. Uzlabojas nodilumizturība, palielinās cietība un noturība, kas savukārt sekmē iespēju palielināt apstrādes ātrumu, kā arī samazinās berzes koeficients. Izplatītākie instrumentu nanopārklājumi ir TiN, TiAlN. Nanopārklājumus uznes ne tikai uz griešanas instrumentiem, bet arī uz jebkuras iekārtas elementiem, kuriem ir nepieciešamas attiecīgās īpašības. Ar nanotehnoloģijas palīdzību ir iespējams uzputināt nanopārklājumu no dažādiem materiāliem, tostarp alumīnija un titāna, ja tas ir nepieciešams.

Vakuuma tehnoloģiskais process nav vēl līdz galam izpētīts, un viens no būtiskākajiem aspektiem, ko nepieciešams aplūkot padziļināti, ir procesa kontrole, atkārtojamība un stabilitāte, kā arī mērījumu kļūdas ietekme uz pārklājumu.

Galvenā vakuuma tehnikas un vakuuma tehnoloģiskā procesa sastāvdaļa ir vakuums (spiediens). Spiediens tiek raksturots kā attiecība perpendikulāri pieliktam un vienmērīgi sadalītam uz laukuma vienību spēkam [21].

$$P = \frac{F}{A}, \quad (1.1)$$

kur  $P$  – spiediens (Pa);

$F$  – spēks (N);

$A$  – laukums ( $m^2$ ).

Uzputinot TIO keramiku ar magnetronisko uzputināšanu, tehnoloģiskajam procesam ir nepieciešama inerta gāze (argons) un skābeklis. Gāzes maisījums sastāv no vairāku gāzu komponentiem, kuriem piemīt attiecīgs spiediens, kas tiek definēts kā parciālais spiediens [21].

Gāzes kopējo un parciālo spiedienu definē gāzes likumi. Parciāla spiediena definīciju raksturo ar Daltona likumu: kopējais gāzes maisījuma spiediens ir vienāds ar maisījuma komponentu parciālo spiedienu summu un var būt izteikts šādi [40]:

$$P = \sum_{i=1}^k p_i. \quad (1.2)$$

Vienādojums gāzes spiediena noteikšanai iekļauj sevī trīs svarīgus gāzes parametrus: molekulāro koncentrāciju, spiedienu un temperatūru un tiek izteikts ar formulu [40]:

$$p = nkT, \quad (1.3)$$

kur  $n$  – gāzes molekulu koncentrācija;

$k$  – Bolcmaņa konstante ( $1,38 \times 10^{-23}$ ,  $\frac{\text{J}}{\text{K}}$ ), [21];

$T$  – temperatūra.

Ideālas gāzes vienādojumu var izteikt arī šādi [40]:

$$p = \frac{Nm}{VM} RT, \quad (1.4)$$

kur  $M$  – gāzes molmasa;

$V$  – gāzes tilpums;

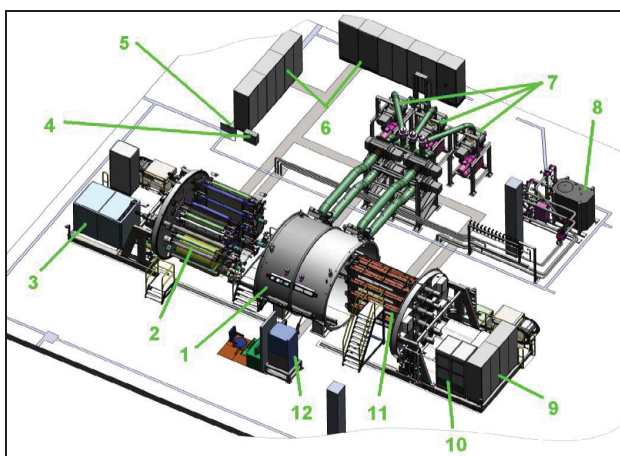
$R$  – gāzu universālā konstante,  $R = 8,31 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{K}\cdot\text{mol}}$  [40];

$N$  – Avogadro skaitlis.

Spiedienu SI sistēmā mēra paskālos (Pa), savukārt gāzes plūsmu – kubikmetros sekundē ( $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ ), savukārt vakuuma nanopārklājumu nozarē ir pieņemts spiedienu mērit toros (Torr) un gāzes plūsmu standarta kubikcentimetros minūtē (sccm).

## 1.2. Vakuuma sistēmas uzbūve

Vakuuma sistēma pēc uzbūves elementiem var būt dažāda – atkarībā no tehniskajām prasībām jeb produkta, ko vēlamies izgatavot. Aktuāls un izplatīts nanopārklājuma uzvešanas veids ir magnetroniskā uzputināšana uz polimēra plēvēm, metāla folijām un stikliem. Vakuuma nanopārklājumi uzlabo materiāla un instrumenta īpašības. Piemēram, izmantojot TiN nanopārklājumu, griezējinstrumentam palielinās stingrība, noturība, nodilumizturība un kalpošanas laiks [18], [11], [23], [28].



1.1. att. Vakuuma sistēmas piemērs.

1.1. attēlā tiek aplūkota vakuuma iekārta ar magnetronisko uzputināšanu, kura ir paredzēta nanopārklājuma uznešanai no sudraba un sudraba oksīda uz dažāda materiāla pamatnēm.

Vakuuma sistēmas sastāvdaļas:

- 1) vakuuma kamera;
- 2) pārtīšanas sistēma;
- 3) termostatēšanas sistēma (ruļļu dzesēšana un sildīšana);
- 4) gāzes ievades un sadales skapis;
- 5) saspiesta gaisa ievades un sadales bloks;
- 6) elektrības skapji (procesori, frekvenču pārveidotāji, barošanas bloki);
- 7) vakuuma sūkņi;
- 8) destilēta ūdens stacija (magnetronu un ekrānu dzesēšanai);
- 9) elektrības skapji iekārtas uzputināšanas procesa nodrošināšanai;
- 10) magnetronu barošanas bloki;
- 11) magnetroni;
- 12) kriosūknis (H<sub>2</sub>O tvaika sasaldēšanai).

Vakuuma kamerai ir jābūt hermētiskai un, vēlams, izgatavotai no nerūsējoša tērauda, tad samazinās gāzes izdalīšanās no materiāla virsmas, kā arī tiek sasniegts labāks vakuums. Vakuuma kameras atsūkņēšanu nodrošina dažāda veida sūkņi. Zinot kameras izejas datus (izmērus, tilpumu), pirms izvēlēties sūkņus, veic atsūkņēšanas sistēmas modelēšanu un atsūkņēšanas ātruma aprēķinus ar mērķi pārbaudīt, cik ātri un kādu spiedienu ir iespējams sasniegt kā arī rasts priekšstats par to, kādu sūkņu tipu nepieciešams izvēlēties. Bieži vien precīzas optikas izsmidzināšanas sistēmas strādā ar plakanu vai apaļas formas magnetronu [32]. Lai iegūtu augstu nogulsēšanās ātrumu, galvenokārt tiek izmantota reaktīva impulsa magnetrona izsmidzināšana [32].

Gāzes plūsmas sistēma ir nozīmīgs vakuuma sistēmas mezgls, kas ir paredzēts tehnoloģiskā procesa uzputināšanas nanopārklājuma nodrošināšanai. Gāzes sistēma parasti sastāv no gāzes baloniem, gāzes plūsmas mērītājiem (*MFC – Mass Flow Controller*) un savienojumiem. *MFC* ir paredzēti, lai regulētu gāzes plūsmas apjomu, kas tiek padots vakuuma kamerā.

Vakuuma sistēmas paredz mirdzizlādes mezglu, kas ir atbildīgs par virsmas attīrīšanu pirms uzputināšanas procesa. Plēves attīrīšana pirms procesa sākšanas ir nozīmīga, jo tas nosaka adhēziju [47]. Pašā vakuuma kamerā pirms nanopārklājuma uzputināšanas tiek veikta pamatnes apstrāde ar joniem [47]. Jonu apstrāde ne tikai noņem augšējos slāņus, kur ir visvairāk defektu, bet arī aktivē augšējā slāņa virsmu radot radiācijas defektus un saraujot ķīmiskās saites [47]. Jonu apstrāde tiek veikta ar mirdzizlādes plazmu, jonu bombardēšanu vai ar negatīvo nobīdi – 100 V [47]. Pamatapstrādē tiek izmantota mirdzizlādes plazma, kas tiek veikta spiedienā no  $5 \times 10^{-2}$  Torr līdz  $5 \times 10^{-1}$  Torr, tādēļ atsūkņēšana notiek ar priekšvakuuma sūkni. Papildus tiek veikta gāzu ievadīšana: argons, skābeklis vai šo gāzu maisījums. Mirdzizlādes mezgla uzbūve paredz divas plāknis, starp kurām ir spriegums [47].

Spiediena noteikšanai vakuuma sistēmā izmanto dažāda veida vakuummērus. Visbiežāk vakuuma iekārtās lieto vakuummēru kombināciju, kur viens atbild par zema un vidēja vakuuma spiediena mērīšanu, kas tiek uzskatīts par precīzāku, pēc kura vadoties tiek veikts

nanopārklājuma uznešanas process. Savukārt otrs vakuummētris atbild par augsta vakuuma mērīšanu. Vakuummētrā darbības princips ir saistīts ar vakuuma sistēmas spiedienu, tādēļ, pirms izvēlēties vakuummētrā, ir jāzina, kādos apstākļos tas operēs, darba temperatūra, iespējamais piesārņojums, spiediens un cita informācija. Vakuummētrā ir jābūt kalibrētiem.

### 1.3. Spiedienu mērīšanas metodes un mērinstrumentu klasifikācija

Vakuummētrā nereti iedala arī pēc darbības principa: tiešs vai netiešs. Tiešo darbības principu izmanto mehāniskie vakuummētri, kuriem darbības princips ir balstīts uz to, ka spiediens iedarbojas uz elastīgo elementu, kā rezultātā elements deformējas, un deformācija ir spiediena kritērijs. Tieša darbības principa ierīces nav atkarīgas no gāzes.

Savukārt vakuummētrā ar netiešo darbības principu izmanto dažu tehnoloģisko procesu parametru noteikšanai atkarībā no spiediena [40]. Tas nozīmē, ka tie mēra fiziskās īpašības, tādas kā siltumvadītspēju, jonizāciju vai viskozitāti, kas ir atkarīga no molekulāra blīvuma [29]. Šāda veida vakuummētri ir atkarīgi no gāzes, un tiem ir nepieciešama kalibrācija pēc attiecīgās gāzes, lietojot etalona mērīšanas ierīci.

Vakuummētrā var iedalīt arī pēc spiediena mērīšanas diapazona, kaut arī tas ir tieši saistīts ar darbības principu. Tā ir vieglāk noteikt, vai izvēlētais vakuummētris atbilst izvirzītajām prasībām un vai var nodrošināt precīzu un korektu spiediena mērījumu tehnoloģiskā procesa veikšanai.

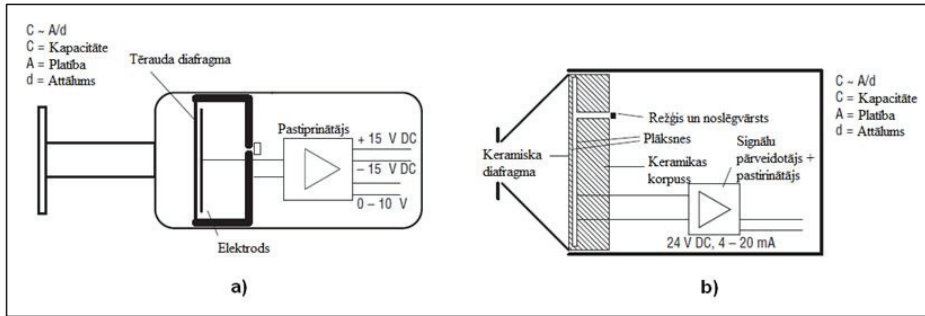
Uzņēmumā AS “Sidrabe” parasti tiek izmantota magnetroniskā uzputināšana nanopārklājuma uznešanai un divu veidu vakuummētri: karstā katoda jonizācijas vakuummētris un diafragmas vakuummētris.

#### Vakuummētri zemam vakuumam

Zemam vakuumam izmanto mehāniskos vakuummētrā jeb deformācijas vakuummētrā. Tas ir saistīts ar to, ka elastīgs elements deformējas un tā deformācija ir spiediena rādītājs. Deformācijas elastīgi elementi var būt gan membrānas, gan caurulītes, gan citi līdzīgi elastīgi elementi ar attiecīgām materiāla īpašībām. Tiek pieņemts, ka vakuummētri, kas mēra spiedienu kā spēku, ir precīzāki.

Visbiežāk tiek lietoti diafragmas vakuummētri, kur elastīgā elementa deformācija tiek mērīta kā plaknes kondensatora kapacitātes izmaiņas, kur viens elektrods ir nostiprināts un otrs ir diafragmas veidā [5], [30], [8]. Kad diafragma izliecas, mainās attālums starp elektrodiem, kā arī kondensatora kapacitāte [30].

Diafragmas vakuummētra uzbūvē ir keramika vai nerūsējoša tērauda diafragma, kā arī atšķiras diafragmas jutīgums [5], [21]. Keramikas diafragmas izmantošana ir viens no labākajiem risinājumiem, mērot vakuumu agresīvas gāzes un līdzīgas vides ietekmē [21]. Vakuummētra uzbūve ir līdzīga, izmantojot gan keramisku, gan tērauda diafragmu, un tas ir shematiski parādīts 1.2. att. [30].



1.2. att. Diafragmas vakuometru uzbūve, izmantojot dažādas diafragmas.  
(a – vakuometrs ar Inkonela diafragmu, b – vakuometrs ar keramisko diafragmu).

Diafragmas biezums var būt atšķirīgs, jo, strādājot dažāda spiediena diapazonā, ir nepieciešams, lai diafragma būtu pietiekami elastīga un nodrošinātu precīzu spiediena nolasīšanu [30].

Ja ( $d$ ) ir vienmērīgi noslogotas diafragmas deformācija, tad šī vakuometra spiediens var būt izteikts šādi [1]:

$$P = \frac{dEt^3}{kr^4}, \quad (1.5)$$

kur  $P$  – diafragmas spiediens;

$E$  – diafragmas materiāla elastības konstante;

$r, t$  – diafragmas diametrs un biezums;

$k$  – konstante.

No formulas izriet, ka diafragmas deformācija ir lineāri saistīta ar spiedienu [1]. Diafragmas vakuometra precizitāte ir augsta, bet diafragmas jutīgums ir atkarīgs no diafragmas mehāniskajām īpašībām.

### Vakuometri vidēja vakuuma mērīšanai

Vidēja vakuuma mērīšana ietver citus principus, to nav iespējams izmērīt precīzi ar mehāniskiem vakuometriem, jo molekulārais blīvums ir pārāk mazs, lai iedarbotos mehāniskais spēks [1]. Vidējā vakuumā tiek izmantota gāzes siltumvadītspējas īpašības. Siltumvadītspēju definē kā siltuma pārnese lielumu, kas izplūst laika vienībā caur plaknes šķērsriezuma laukuma vienību, kas izvietota perpendikulāri siltuma plūsmas virzienam un dalīta ar temperatūras gradientu [1]. Citiem vārdiem, molekulām saskaroties ar uzkaršēto kvēldiegu, siltums tiek izdalīts gāzē, turklāt siltumvadītspēja un siltuma pārnese ātrums ir atkarīgs no gāzes siltumvadītspējas [29].

Substrāta siltumvadītspēja  $K$  var būt izteikta šādi [19]:

$$H = -K \left( \frac{dT}{ds} \right), \quad (1.6)$$

kur  $H$  – siltuma daudzums, kas izplūst caur laukuma vienību laika vienībā paralēli ( $s$ ) virzienam;

$\frac{dT}{ds}$  – temperatūras gradients [19].

Siltumvadāmības formulas atvasināšana noved pie tā, ka retinātas gāzes siltumvadāmība ir šāda [19]:

$$K = \frac{1}{4}(9y - 5)\eta C_v, \quad (1.7)$$

kur  $y = \frac{C_p}{C_v}$  – starpība starp specifisku gāzes siltumu pie nemainīga spiediena un pie nemainīga tilpuma;

$n$  – viskozitātes koeficients [19].

**Pirani vakuummeters** ir viens no tiem, kurā izmanto gāzes siltumvadāmības īpašības, un tādēļ tas tiek klasificēts kā siltuma vakuummeters [10]. Pirani vakuummeters izmanto gāzes siltumvadāmību spiediena diapazonā, kas ir mazāks par aptuveni 10–100 hPa [21]. Šis vakuummeters mēra spiedienu, balstoties uz kvēldiega pretestības mērīšanu, nosakot kvēldiega temperatūru [1].

$$R_T = R_0(1 + \alpha T), \quad (1.8)$$

kur  $R_T$  – kvēldiega pretestība, ja temperatūra  $T$  (°C) [1];

$R_0$  – pretestība, ja temperatūra 0 °C un  $\alpha$  – kvēldiega pretestības temperatūras koeficients [1].

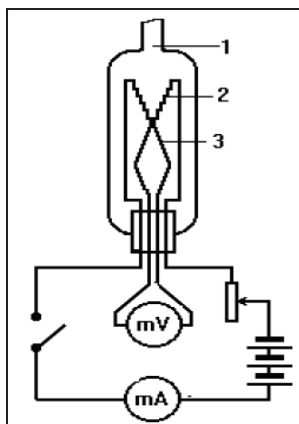
Pirani vakuummetra kvēldiega diametrs ir 5–20 μm [29]. Kvēldiegam var būt izmantoti šādi materiāli: niķelis, irīdijs, platīns vai volframs [29], [35].

Pirani vakuummetra ierobežojumi ir [21]:

- 1) siltumvadāmība nebūs spiediena funkcija diapazonā aptuveni no 10 hPa līdz atmosfēras spiedienam (robeža ir atkarīga no gāzes tipa) [21];
- 2) gāzes siltumvadāmība būs maza pret termopārnesi kvēldiega galos pie zemāka spiediena par  $10^{-4}$  hPa un tādējādi vairs neietekmēs kvēldiega siltuma atdevi [21].

Pirani vakuummeters ir jutīgs pret dažāda veida gāzēm vakuuma sistēmā, jo gāzēm atšķiras masa, tātad atšķirsies paņemtais siltuma daudzums no kvēldiega virsmas [4]. Turklāt vakuummetra radījumi var būt neprecīzi un ar noteiktu kļūdu tad, ja vakuummeters tika kalibrēts pēc sausa gaisa, bet faktiski tiek izmantots, lai mērītu argonu [4].

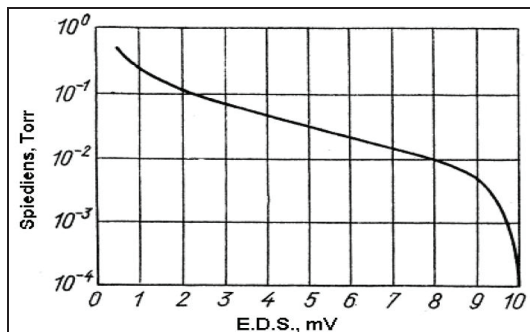
**Termopāra vakuometri** izmanto gāzes siltumvadītspējas īpašības, kur kvēldiegs tiek uzkarstēts ar pastāvīgu enerģijas avotu [6]. Termopāra vakuometrā kvēldiega (1) temperatūra tiek mērīta ar termopāru (2), turklāt elektrodi ir izvietoti stikla vai metāliskā korpusā (3), kuram ir savienošanas flancis ar vakuuma sistēmu [12], [40]. Viens no termopāra piemēriem ir parādīts 1.3. att. [47].



1.3. att. Termopāra vakuummetra ПИМТ-2 elektriskā shēma.  
(1 – korpuss, 2 – kvēldiegs, 3 – termopāris).

Termopāra termoelektrodzinējspēka mērīšanai izmanto millivoltmetru, bet kvēldiega strāva tiek regulēta ar reostatu un mērīta ar milliampērmetru [40]. Termopāra vakuummetri tāpat kā Pirani vakuummetrs darbojas, izmantojot nemainīgo strāvu vai kvēldiega temperatūru.

1.4. att. ir parādīta ПИМТ-2 termopāra vakuummetra spiediena atkarība no termopāra elektrodzinējspēka, jo zemāks spiediens, jo sliktāka ir siltumvadāmība, un sildītāja temperatūra pieaug [47].



1.4. att. ПИМТ-2 vakuummetra spiediena atkarība no elektrodzinējspēka.

Termopāra pārveidotāja priekšrocības ir šādas:

- 1) tas mēra visu gāzu un tvaiku, kas atrodas vakuuma sistēmā, kopīgo spiedienu [40];
- 2) nodrošina spiediena izmaiņu nepārtrauktu mērīšanu [40].

### Vakuummetri augsta vakuuma mērīšanai

Augstu vakuumu vairs nav iespējams izmērīt ar mehāniskiem un siltumvadāmības vakuummetriem, jo molekulārais blīvums nav pietiekami liels. Tāpēc augsta vakuuma mērīšanai izmanto vakuummetrus, kas izmanto gāzes jonizācijas īpašības. Tāda veida vakuummetru darbības princips balstās uz spiediena un jonu strāvas tiešu proporcionalitāti, kas radusies termoelektronu un paliekošās gāzes jonizācijas rezultātā [47].



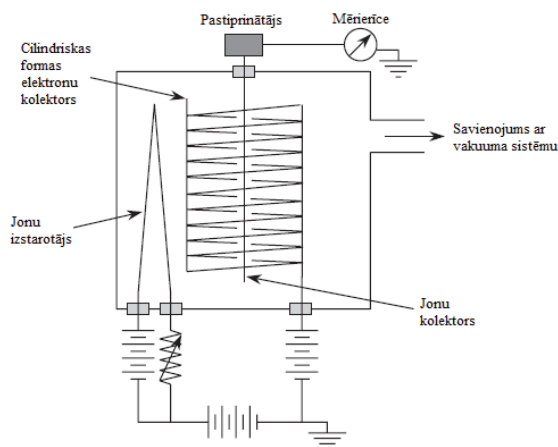
Jonizācijas vakuummeteri bieži vien tiek iedalīti divos tipos: auksta (Peninga vakuummeters) un karsta katoda jonizācijas vakuummeters [34].

**Auksta katoda vakuummeters.** Auksta katoda jonizācijas vakuummeteri sastāv no diviem elektrodiem: katoda un anoda, starp kuriem tiek pielikts augstspriegums [21]. Darbības princips auksta katoda jonizācijas vakuummeteram ir šāds: negatīvi uzlādēti elektroni, izejot caur emisijas lauku, ar lielu ātrumu virzās no katoda uz anodu [33], [21]. Plūstot tie jonizē neitrālas gāzes molekulas, kas veicina gāzizlādi [21]. Mērāmā gāzizlādes strāva ir spiediena radītājs [21].

**Karsta katoda vakuummeters.** Karsta katoda jonizācijas vakuummeters izmanto karsto kvēldiegu, lai radītu elektronus ar termoelektornu emisiju, t. i., citiem vārdiem sakot, elektroni tiek radīti ar uzkarstēta katoda palīdzību [21], [4]. Šāda veida vakuummeteri sastāv no trīs galvenajām daļām: anods, katods un kolektors (1.5. att.).

Karsta katoda vakuummetera darbības princips ir šāds: izstaroti elektroni virzās uz anoda režģi, kas pēc savas uzbūves ir atvērts, un tādējādi daļa elektronu iziet cauri anoda režģim un kādu laiku svārstās starp to, līdz nonāk kontaktā ar režģi [4], [17]. Izstrādātie joni tiek piesaistīti ar trešo elektrodu, veidojot mērāmo strāvu, tādējādi jonu strāva un elektronu emisijas strāva ir saistīta ar spiedienu. [4], [17].

Karsta katoda vakuummetros agrāk izmantoja volframa katodus, bet pašlaik izmanto irīdiju ar oksīda nanopārklājumu ( $\text{Th}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ), lai paaugstinātu noturību pret skābekli [30].



1.5 att. Karsta katoda jonizācijas vakuummetera shematiska uzbūve.

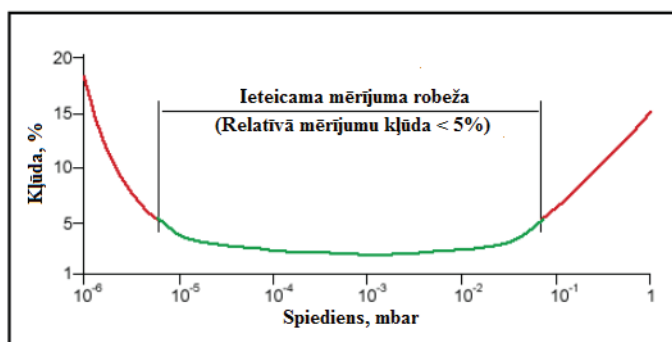
Jonu strāvas ģenerēšana ir tieši saistīta ar gāzes blīvumu, tādējādi – ar gāzes spiedienu [30].

#### 1.4. Vakuummeteru precizitātes, atkārtojamības un kalibrācijas nepieciešamības analīze

Vakuummeteram ir jābūt precīzam, kas savukārt nodrošina tehnoloģiskā procesa stabilitāti un produkta vizuālo stāvokli, kā arī labu un efektīvu darbību. Precizitāte ietekmē vairākus aspektus tehnoloģiskā procesa izveidē: atkarībā no precizitātes var atšķirties gāzes daudzums, kas

nepieciešams procesam, kā arī iegūtā nanopārklājuma struktūra un īpašības (biezums, caurlaidības koeficients).

Katram vakuummētram piemīt savas precizitātes pakāpes, tomēr darbības pamatprincips paliek nemainīgs. Kā piemēru var apskatīt firmas @VISCOVAC rotācijas vakuummētra precizitātes līkni [1]. Vakuummētra darbības precizitāte, mainoties spiedienam, mainās, sasniedzot augšējo un apakšējo robežu, un tas ir attiecināms uz visām spiediena mērīšanas ierīcēm [1]. Rotācijas vakuummētra precizitāte var samazināties vai palielināties atkarībā no darbības spiediena diapazona, kā arī vakuummētra darbību un vērtības noteikšanas ticamību var ietekmēt citi faktori, piemēram, temperatūra [9], [31].



1.6. att. @VISCOVAC vakuummētra mērījumu kļūdas sadalījums atkarībā no spiediena diapazona.

Analizējot relatīvo mērījuma kļūdas līkni 1.6. att., var secināt, ka zaļā līnija atspoguļo mērījumu diapazonu, kur kļūda ir 5 % robežās, kas nereti tiek dēvēta par augstas ticamības diapazonu jeb ieteicamā mērījumu robežu, pēc kuras ir vēlams vadīties, veicot nanopārklājuma uzklāšanas procesu. Savukārt sarkanās līnijas tiecas ārpus vakuummētra mērīšanas robežas, strauji pieaugot kļūdai. Līdz ar to ir nepieciešams izvēlēties vakuummētru atbilstoši tehnoloģiskajām procesa prasībām, lai veiktu nanopārklājuma uznešanu vēlamajā (zaļajā) intervālā.

Ja mērījumi ar lielu varbūtību tiks veikti pie vibrācijas, augstas temperatūras, piesārņojuma, tad tie var būt ar pietiekami augstu kļūdu [1]. Vibrācijas ietekmē palielinās vakuummētra darbības kļūda [1].

Vakuummētra galvenie parametri ir precizitāte un atkārtojamība, tādēļ mērinstruments tiek kalibrēts ik pēc noteikta intervāla, bieži vien pēc gada (vakuummētram ir sarežģīti noteikt precīzu kalibrācijas laiku) [7], [29]. Tas ir saistīts ar to, ka nav standartizētas vakuummētru ekspluatācijas normas, tādējādi katrs vakuummētrs tiek pakļauts dažādiem darba apstākļiem, intensitātei, piesārņojumam, vibrācijām un citu faktoru iedarbībai. Tieši tāpēc kalibrācijas laika noteikšana ir jāveic katram vakuummētram individuāli atkarībā no tā izmantošanas intensitātes, kā arī jāveic eksperimentāli mērījumi datubāzes izveidošanai. Balstoties uz veiktajiem eksperimentālajiem mērījumiem noteiktā intervālā un atzīmējot iegūtos rezultātus, var iegūt

vakuummetra darbības modeli, salīdzināt izmaiņas un izveidot vienmēr mainīgo un atjaunojošo spiediena modeli.

## 1.5. Vakuummetru precizitātes aprēķins

Katrai mērīšanas ierīcei ir noteikta kopējā kļūda, kas rodas, nosakot visas kļūdas, gan sistemātiskās, gan gadījuma kļūdas, kas iedarbojas uz mehānismu [20]. Pārbaudot vakuummetra vai mērāparāta precizitāti, bieži vien tiek apskatīta tā mērījuma kļūda. Vakuummetru kalibrāciju un mērījumu akreditāciju veic speciālās akreditētās laboratorijās, kur pārbaudāmais vakuummetrs tiek salīdzināts, kalibrēts un iestatīts attiecībā pret augstākas klases etalonu [29]. Tādējādi, balstoties uz šādiem literatūras avotiem: Lielbritānijas akreditācijas centrs (*UKAS – The United Kingdom Accreditation Service*) un Starptautiskā biroja norādījumiem (*BIPM – Bureau International des Poids et Mesures*), mērījumu kļūdas aprēķiniem tika izvēlēta varbūtības teorijas metode [42], [50].

Precizitātes aprēķiniem tika izvēlēti promocijas darbā apskatītie un izmantotie jonizācijas HPG 400, BPG 402 un diafragmas CDG 025D tipa vakuummetri. Katra spiediena mērījuma punktā tika veikti pieci atkārtoti mērījumi. Pavisam tika veikti desmit mērījumi dažādos spiediena diapazonos.

Spiedienu mērījumu eksperimentos diafragmas vakuummetrs tiek uzskatīts par precīzāku mērierīci, attiecībā pret kuru tiks salīdzināti jonizācijas vakuummetri. Iegūtie rezultāti ir attēloti 1.1. tab.

1.1. tabula

Vakuummetru vidējās un vidējās kvadrātiskas kļūdas vērtības

Nr.	CDG 025D		HPG 400 (SN547)		HPG 400 (SN 566)		BPG 402	
	$x_{vid}$ , Torr	$s_x$ , Torr	$x_{vid}$ , Torr	$s_x$ , Torr	$x_{vid}$ , Torr	$s_x$ , Torr	$x_{vid}$ , Torr	$s_x$ , Torr
1	1,23E-02	0,00022	4,71E-03	0,000012	1,14E-02	0,00043	1,15E-02	0,00042
2	9,73E-03	0,00003	3,47E-03	0,000028	9,78E-03	0,000026	9,74E-03	0,000032
3	8,61E-03	0,000025	2,95E-03	0,000070	8,79E-03	0,000017	8,5E-03	0,000039
4	7,35E-03	0,000037	2,28E-03	0,000039	7,42E-03	0,000017	7,1E-03	0,00003
5	6,73E-03	0,000021	2,02E-03	0,000025	6,6E-03	0,00007	6,42E-03	0,000015
6	5,52E-03	0,000012	1,44E-03	0,000033	5,63E-03	0,000027	4,75E-03	0,000019
7	4,33E-03	0,000019	1,20E-03	0,000014	4,29E-03	0,000018	3,24E-03	0,000021
8	3,70E-03	0,000013	2,44E-03	0,000028	3,73E-03	0,000015	3,00E-03	0,000014
9	2,41E-03	0,000016	1,38E-03	0,00003	2,41E-03	0,000016	1,35E-03	0,000015
10	1,67E-03	0,000011	2,1E-03	0,000033	1,67E-03	0,000011	1,22E-03	0,000071

Aprēķina gadījuma kļūdu, kur ticamības intervāla vērtība tiek pieņemta par 0,95 un mērījumu skaits vienāds ar desmit,  $t_{\beta}(N) = 2,23$ . Gadījuma kļūdu rēķina kā vidējo vērtību no deviņiem mērījumiem. Piemēram, CDG 025D gadījuma kļūdu aprēķina šādi:

$$\Delta x_s = \Delta x_{s_{vid}} = \frac{\sum s_x}{N} t_{\beta}(N) = \frac{0,000183}{9} \times 2,23 = 0,00005 \text{ Torr.} \quad (1.9)$$

Sistemātisko kļūdu nosaka katram vakuummetram atsevišķi, ņemot vērā, ka diafragmas vakuummetra un jonizācijas vakuummetra kļūdas ir 0,2 % un  $\pm 15$  % [44], [45], [46].

$$\Delta x_{\delta} = \Delta x_{\delta_{vid}} = \frac{\Sigma \delta_{0,2\%}}{N} \times \frac{1}{3} t_{\beta}(\infty) = \frac{0,000098}{9} \times \frac{1}{3} \times 2,18 = 0,00001 \text{ Torr.} \quad (1.20)$$

Mērījumu precizitātes raksturošanai izmanto relatīvās kļūdas ( $\varepsilon$ ), kuras izsaka procentos un aprēķina pēc formulas [49]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x_{vid}} 100 \%. \quad (1.10)$$

Relatīvās kļūdas vērtībai vienmēr jābūt mazāka par 100 %. Jo šī kļūda mazāka, jo precīzāk veikti mērījumi [49].

Piemēram, CDG 025D vakuummetram relatīvo kļūdu aprēķina šādi:

$$\varepsilon = \varepsilon_{vid} = \frac{\Sigma \frac{\Delta x}{x_{vid}} - 100 \%}{N} = \frac{10,98}{9} = 1,22 \%. \quad (1.11)$$

Aprēķinot relatīvo kļūdu, gadījuma kļūda tiek pieņemta par galīgo kļūdu diafragmas vakuummetram, bet sistemātiskā kļūda tiek pieņemta par galīgo kļūdu visiem trīs jonizācijas vakuummetriem.

Balstoties uz precizitātes aprēķiniem, var secināt, ka diafragmas vakuumetra kopējā jeb relatīvā mērījumu kļūda ir 1,22 %. Jo mazāka relatīvā kļūda, jo precīzāk tika veikti mērījumi. Tādējādi, pat pārsniedzot pieļaujamo 0,2 % kļūdu no mērījuma, diafragmas vakuumetrs var tikt uzskatīts par etalonu, pēc kura jāvadās gan eksperimentālos apstākļos, gan pārklājuma uznešanas procesa.

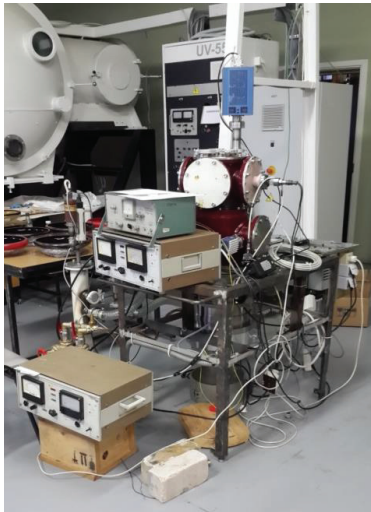
**Literatūras apskats** sniedz ieskatu vakuumā, tā pamatprincipos un vakuuma sistēmas uzbūvē nanopārklājuma uzklāšanas procesiem. Tiek apskatītas un analizētas spiediena noteikšanas metodes, vakuummetru darbības principi, to iedalījums, precizitāte, atkarotājāmība, priekšrocības un trūkumi. Tas ļauj secināt, ka diafragmas vakuumetrs uzskatāms par vienu no labākajiem vakuometriem augstās precizitātes dēļ (0,2–0,5 % no mērījuma) un to, ka tas nav atkarīgs no gāzes. Savukārt jonizācijas vakuometri izmanto citu darbības principu, un to precizitāte ir krietni zemāka, tikai  $\pm 15$  % no mērījuma. Palielinoties kļūdai, tiek veikta vakuummetru kalibrācija. Kalibrācijas periods nav standartizēts sakarā ar to, ka tie tiek izmantoti dažādos ekspluatācijas apstākļos. Kalibrācija ir noslēdzošais etaps, šobrīd nav aprakstītas alternatīvas metodes vakuummetru pārbaudei un korigēšanai. Vakuuma procesiem uzņēmumā AS “Sidarbe” bieži vien izmanto diafragmas un jonizācijas vakuummetrus, tāpēc, balstoties uz pētāmo problēmu un literatūras apskatu, tiek izvirzīti šādi mērķi:

- 1) balstoties uz literatūras apskates eksperimentāliem pētījumiem, tiek izvēlēti divu tipu vakuometri: diafragmas un jonizācijas vakuometri;
- 2) uzprojektēt un izgatavot eksperimentālo vakuummetru pārbaudes vakuuma iekārtu, kas nodrošina robežspiedienu  $2 \times 10^{-6}$  Torr;
- 3) izpētīt jonizācijas un diafragmas vakuummetru darbību, izmantojot secīgas eksperimentālās metodes, tādējādi iegūstot rezultātus par vakuumetra darbību un spiediena mērījumu kļūdu;
- 4) veikt silīcija dioksīda (SiO<sub>2</sub>) nanopārklājuma uzklāšanas tehnoloģisko procesu un izpētīt spiediena ietekmi uz nanopārklājuma vizuālo stāvokli un īpašībām;
- 5) izstrādāt SiO<sub>2</sub> nanopārklājuma biežuma un caurlaidības prognozēšanas faziloģikas modeli teces apstākļos.

## 2. JAUNAS EKSPERIMENTĀLAS VAKUUMA IEKĀRTAS IZGATAVOŠANA VAKUUMMETRU PĀRBAUDEI

### 2.1. Jaunas eksperimentālas pārbaudes vakuuma iekārtas izgatavošana vakuummetru daudzfunkcionālai testēšanai

Vakuuma pārbaudes iekārta ir nepieciešama, lai pārbaudītu vakuummetru darbību, to precizitāti un atkārtojamību, kā arī ir iespējams veikt vakuummetru sākotnējo parametru iestatīšanu. Galvenais eksperimentālās vakuuma iekārtas uzdevums ir nodrošināt stabilu un pietiekamu vakuumu, lai veiktu vakuummetru pārbaudi un iestatīšanu. Viens no uzdevumiem ir uzturēt nemainīgu spiedienu un vienmērīgu atsūkņošanas ātrumu, tādējādi pārlicinoties, ka pārbaudāmie vakuummetri saņem vienādu spiedienu. Strādājot ar vakuuma iekārtu un veicot pārbaudi, tiek izmantota salīdzināšanas metode, kur viens no vakuummetriem tiks uzskatīts par precīzāku, attiecīgi pret to tiks salīdzināti citi esošie vakuummetri [14].



2.1. att. Eksperimentāla vakuummetru pārbaudes iekārta.

Eksperimentāla vakuummetru pārbaudes iekārta sastāv no: metāliska rāmja; tērauda kameras; automātiski un manuāli regulējama aizvara; turbomolekulāra sūkņa TURBO-V3K-T; mehāniska sūkņa HB3-100Д; iekārtas kontroles paneļa; vakuummetru kontroliera; sūkņošanas sistēmas caurulēm un vārstiem; gāzes padeves sistēmas ar gāzes plūsmas kontrolieri un regulējošo vārstu.

Vienlaikus var tikt pārbaudīti četri vakuummetri. Uzbūvētā vakuuma iekārta 2.1. att. ļauj sasniegt robežspiedienu  $2 \times 10^{-6}$  Torr ļoti īsā laikā posmā (~ 20 min.)

## 2.2. Jaunas eksperimentālas pārbaudes vakuuma iekārtas sagatavošana eksperimentiem

Pēc vakuuma iekārtas izgatavošanas, visu detaļu un mezglu montāžas, tā tika pārbaudīta, lai nerastos teces, kā arī tika noteikts kameras robežspiediens un veikta kameras degazācija.

Vakuuma iekārtai pārbaudes laikā tika konstatētas vairākas teces metināto šuvju vietās, kas tika likvidētas. Tālāk tika veikta degazācija. Lai paātrinātu šo procesu un maksimāli palielinātu attīrīšanas efektu, tika veikta kameras uzkaršēšana ar sildītāja palīdzību, kā rezultātā kamera tika degazēta, panākot augstāku vakuumu.

Pirms vakuuma kameras attīrīšanas robežspiediens bija  $3 \times 10^{-6}$  Torr, bet pēc ilglaicīgas ekspluatācijas un sildīšanas tika sasniegts  $8 \times 10^{-7}$  Torr robežspiediens.

## 2.3. Eksperimentālas pārbaudes vakuuma iekārtas atsūkņēšanas modelēšana, izmantojot *OCTAVE* datorprogrammu

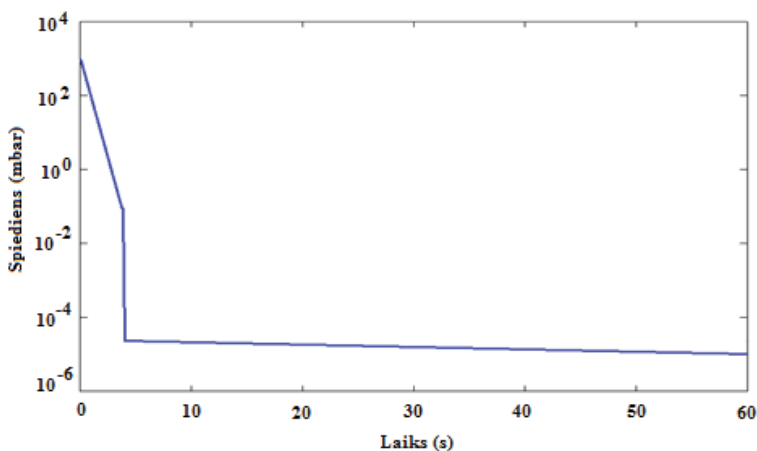
Viens no būtiskākajiem ātrdarbību raksturojošiem parametriem vakuuma nanopārklājumu iekārtās ir laiks, kādā vakuuma kamera tiek atsūkņēta līdz bāzes spiedienam [36]. Atkarībā no tehnoloģiskā procesa bāzes spiediena vērtība var atšķirties, bet tipiski tas ir apmēram  $1 \times 10^{-5}$  mbar procesa nodalījumā. Ja sasniegta šāda spiediena vērtība, tad kamerā esošo gāzu parciālais spiediens procesa laikā kvalitatīvu tā norisi vairs netraucē.

- Vakuuma kameras apjoms:  $V_1$  (20 litri);
- Vakuums nodalījumā  $V_1$  tiek iegūts, izmantojot mehānisko HB3-100Д un turbomolekulāro sūkni TURBO –V3K–T.

Lai noskaidrotu, cik ilgā laikā kameras nodalījumā var iegūt bāzes spiedienu, izmanto diferenciālvienādojumu:

$$-V_1 \frac{dp_1}{dt} - S_1(P_1)P_1 + q_1(t_1)F_1 + Q_1 = 0 \quad (2.1)$$

Atsūkņēšanas modelēšanas gala rezultāts tiek attēlots grafiski ar logaritmisko skalu. Iegūtais grafiks tika sadalīts divos posmos, lai pilnvērtīgāk attēlotu spiediena izmaiņas atkarībā no sūkņēšanas laika. Pirmais posms ir raksturīgs pirmajām 60 sekundēm no atsūkņēšanas sākuma, kur ir skaidri redzama spiediena izmaiņas līkne un sūkņu pārejas posms (2.2. att.).



2.2. att. Spiediena izmaiņas pirmajās 60 sekundēs no sūkņēšanas sākuma.

Modelēšana parāda, cik ilgā laikā posmā ir iespējams sasniegt bāzes spiedienu, bet netiek ņemts vērā sūkņu darbības palīglaiks.

Atsūkņēšanas matemātiskā modelēšana atviegloja sūkņu izvēli un ļāva sasniegt nepieciešamos vakuuma pārbaudes iekārtas darbības parametrus.

## 2.4. Vakuuma iekārtas tehnoloģiskā nanopārklājuma procesa galvenā kritērija analīze

Lai sāktu tehnoloģisko nanopārklājuma uznešanas procesu, vakuuma kamerai ir jānosaka spiediena radījumi. Tika aplūkota bieži sastopama problēma nanopārklājuma uznešanas procesam. Nanopārklājuma uznešana tiek veikta, izmantojot UV80 laboratorijas vakuuma iekārtu, kur ir pievienoti trīs dažādi vakuummēteri, tomēr šajā piemērā būtiski ir tikai divi: @INFICON firmas HPG 400 jonizācijas vakuummētris, kas attēlā redzams kā otrā mērierīce, un CDG 025D diafragmas vakuummētris, kas attēlā redzams kā trešā mērierīce (2.3. un 2.4. att.). Lielākoties uzņēmumā AS „Sidrabe” vadās pēc CDG radījumiem, jo šo vakuummētru neiespāido gāzes, kā arī tam piemīt augsta precizitāte un atkārtojamība [7].



2.3. att. Jonizācijas vakuummētra HPG 400 spiediena mērījums ar argona korekciju.



2.4. att. Jonizācijas vakuummetra HPG 400 spiediena mērījums bez argona korekcijas.

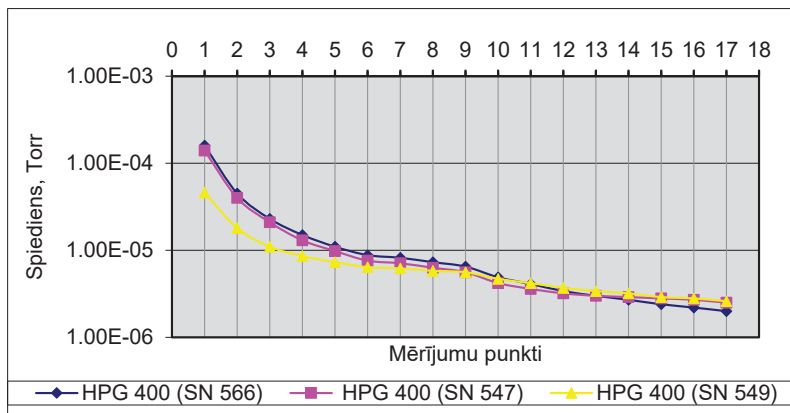
Abos gadījumos kamerā tiek ievadīts argons un mainīta tikai jonizācijas vakuummetra argona korekcijas iestatīšana. Argona plūsma, kas tiek padota vakuuma kamerā, ir 14,4 % jeb 100 sccm [26]. HPG 400 bez ieslēgtas korekcijas rāda spiediena mērījumu, kas ir tuvāks CDG rādījumam, kaut arī vajadzētu būt pretēji. Līdz ar to, ja vēlas pielīdzināt rādījumu bez korekcijas  $8,58 \times 10^{-4}$  Torr līdz  $6,88 \times 10^{-4}$  Torr, tad ir nepieciešams samazināt argona plūsmu līdz 11,2 % jeb 78 sccm [24], [26]. Iegūstot datus, var secināt, ka argona starpība ir 22 sccm tajā gadījumā, kad pielīdzina spiediena rādījumu. Spiediena mērījumu savstarpējā kļūda apgrūtina etalona mērierīces izvēli pārklājuma uznešanas tehnoloģiskajam procesam. Šis piemērs parāda, ka, neskatoties uz viena rādījuma pielīdzināšanu otram, lai samazinātu vai palielinātu argona līmeni vakuuma kamerā, beigās iegūtais rezultāts ir neapmierinošs, jo tehnoloģiskā procesa vajadzībām gan procesa sākumā, gan beigās tika patērēts vairāk argona nekā tas būtu bijis nepieciešams.



### 3. VAKUUMMETRU PĀRBAUDE, IZMANTOJOT SECĪGAS METODES

#### 3.1. Jonizācijas vakuummētru pārbaude, izmantojot eksperimentālo vakuuma iekārtu

Pirmie eksperimenti tiek vērsti uz to, lai pārbaudītu trīs dažādus jonizācijas vakuummētrus un iegūtu mērījumu precizitātes kopskatu, kā arī izanalizētu kļūdas vērtības.



3.1. att. HPG 400 jonizācijas vakuummētru precizitātes salīdzinājums.

Eksperimentā iegūtie dati 3.1. att. liecina par to, ka vakuummētru izmērītā spiediena rādījumi ir izkliedēti. Jonizācijas vakuummētris HPG 400 (SN 549), kas iepriekš ticis izmantots laboratorijas iekārtās, uzrādīja lielāku mērījumu kļūdu, salīdzinot ar pārējiem vakuummētriem.

HPG 400 vakuummētra pasēs norādīts, ka vakuummētra spiediena darba diapazons ir no atmosfēras līdz  $2 \times 10^{-6}$  mbar, kas savukārt norāda uz to, ka, tuvojoties abām vakuummētra mērīšanas robežām, ir jāreķinās ar kļūdas palielināšanos.

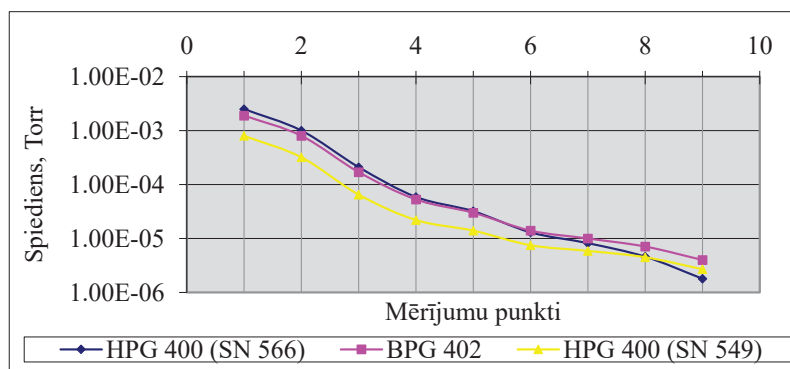
Eksperimentā tika atklāts, ka HPG 400 (SN 549) vakuummētra spiediena rādījumi visbūtiskāk atšķiras no pārējiem diviem, sākot no pirmā mērījuma punkta līdz devītajam, un pēc tam spiediena rādījumi izlīdzinās. Vidējais spiediena mērīšanas diapazona punkts ir no  $2 \times 10^{-3}$  Torr līdz  $2 \times 10^{-4}$  Torr.

Jonizācijas vakuummētra HPG 400 (SN 547) kļūda abos spiediena mērīšanas punktos ir virs 10 %, bet mazāka par 15 % robežu. Savukārt HPG 400 (SN 549) vakuummētra kļūda pirmajā gadījumā sasniedz 71 %, bet otrajā – 34 %. No iegūtajiem eksperimenta rezultātiem var secināt, ka jonizācijas vakuummētra HPG 400 (SN 549) spiediena mērījumi ir kļūdaini un pārsniedz atļautās kļūdas robežu  $\pm 15$  %. Kļūdaini vakuummētra eksperimentālie spiediena mērījumi var būt saistīti ar tā ekspluatācijas laiku, darba apstākļiem, tehnoloģiskajiem procesiem un uzputinātajiem materiāliem, jutīgā elementa piesaņojumu un citiem faktoriem.

Salīdzinot trīs vakuummētrus, konstatēts, ka uzticamāki ir SN 566 un SN 547 vakuummētri, savukārt SN 549 nav korekts un neatbilst precizitātes prasībām.

### 3.2. HPG 400 un BPG 402 jonizācijas vakuummēru pārbaude, izmantojot eksperimentālo vakuuma iekārtu

Turpmāk tika pārbaudīti HPG jonizācijas vakuometri ar BPG jonizācijas vakuometru, kuriem spiediena mērīšanas diapazons ir daudz lielāks. Eksperimentos BPG vakuometrs tiek uzskatīts par precīzāku. Tika veikti desmit identiski eksperimenti, no kuriem iegūtas vidējās spiediena vērtības. Eksperimenta rezultāti attēloti 3.2. att.



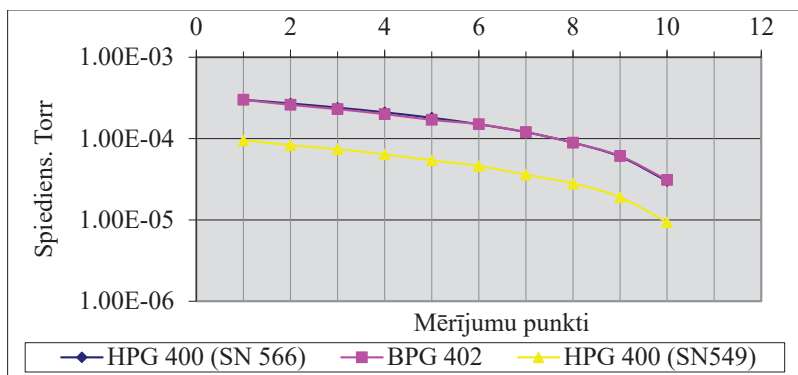
3.2. att. Jonizācijas vakuummēru eksperimentālās pārbaudes spiediena līknes.

Balstoties uz iegūtiem rezultātiem, secināts, ka BPG un HPG 400 (SN 566) vakuometriem pie zemas vakuuma vērtības ir ļoti līdzīgas līknes, bet SN 549 jonizācijas vakuometrs joprojām gan grafiski, gan skaitliski atšķiras. Tuvojoties mērīšanas robežai, augstā vakuumā mērījumi starp SN 566 un SN 549 sāk pakāpeniski izlīdzināties, bet tas netiek ņemts vērā, jo kļūda  $\pm 15\%$  tiek nodrošināta tikai līdz  $10^{-5}$  mbar.

BPG vakuometram mērīšanas diapazons ir līdz  $3,8 \times 10^{-10}$  Torr, bet tas nodrošina kļūdu  $\pm 15\%$  spiediena diapazonā no  $10^{-2}$ – $10^{-8}$  mbar. HPG vakuometru rādījumu pieļaujamās mērīšanas robežas minimāli atšķiras, kas netika novērots, pārbaudot precizitāti visiem trim HPG jonizācijas vakuometriem. Izzanalizējot iegūtos rezultātus, var secināt, ka jonizācijas vakuometru BPG 402 un HPG 400 (SN 566) spiedienu mērījumu kļūda, savstarpēji salīdzinot, nepārsniedz  $15\%$  robežu. Savukārt var pieņemt, ka pareiza spiediena vērtībā nav piesaistīta pie precīzākas mērierīces, bet, balstoties uz jonizācijas vakuometru eksperimentāliem pētījumiem, ir atrodama šo vakuometru spiedienu mērījumu ticamības intervālā.

#### HPG 400 un BPG 402 jonizācijas vakuummēru pārbaude ar argona gāzes plūsmu

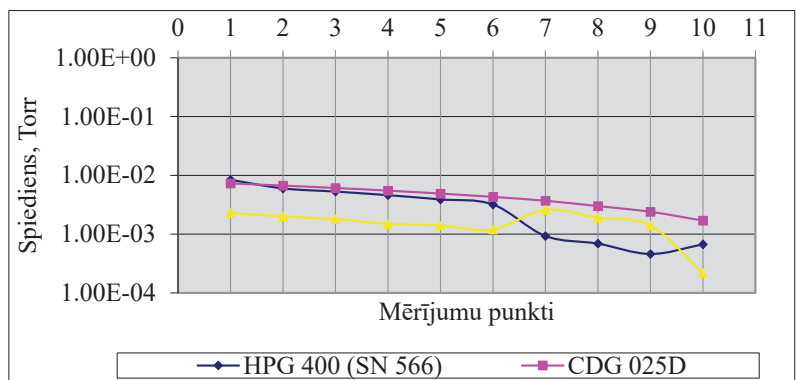
Eksperimentos vakuuma kamerā tiek ievadīts argons, un manipulācija notiek ar jonizācijas vakuometru korekcijas mērījumu attiecībā pret argonu, kā arī izmanto dažāda apjoma gāzes ievadīšanu.



3.3. att. Jonizācijas vakuummētru eksperimentālās pārbaudes spiediena līknes.

Neskatoties uz to, ka korekcija netiek ieslēgta, vakuummētra darbība netiek traucēta, ir iespējams iegūt spiediena rezultātus no HPG vakuummētriem un salīdzināt tos ar BPG 402 vakuummētru radījumiem. Eksperimentā izmantotais spiediena diapazons ir izvēlēts tā, lai BPG 402 vakuummētru precizitāte būtu visaugstākā, tādējādi nodrošinot teicamus rezultātus un mērījumu starptības. No eksperimenta rezultātiem var secināt, ka izvēlētais visprecīzākais HPG 400 (SN 566) jonizācijas vakuummētrs rāda spiedienu ļoti līdzīgu BPG 402, kur kļūda paliek 3,8 % robežās, bet atsevišķos punktos pie konkrēta argona gāzes plūsmas apjoma pat sakrīt. Savukārt HPG (SN 549) uzrāda pavisam atšķirīgus rezultātus no etalona un SN 566, kas arī bija sagaidāms (3.3. att.).

### 3.3. Diafragmas vakuummētra lietošana HPG 400 jonizācijas vakuummētru pārbaudei



3.4. att. Vakuummētru spiedienu eksperimentālās spiedienu līknes ar argona korekciju.

Diafragmas vakuummētru izmanto par etalonu, jo to neietekmē gāzes plūsma, tam ir augsta precizitāte, kas mainās atkarībā no izpildījuma robežās 0,2–0,5 % no mērījuma [33], [22], [15], [37]. Tas ir īpaši piemērots un tiek izmantots vakuuma tehnoloģiskā SiO<sub>2</sub> nanopārklājuma uznešanas procesā. Līdz ar to jonizācijas vakuummētrus pārbauda attiecībā pret CDG 025D

vakuummētru ar mērķi noskaidrot spiediena mērījumu precizitāti zemā un vidējā vakuuma robežās.

Grafiski attēloti eksperimenta rezultāti 3.4. att. ļauj spriest par to, ka, sākuma posmā vakuuma kamerā ielaižot 10 sccm argona, HPG 400 ( SN 566 ) un CDG 025D vakuummētru rezultāti ir ļoti līdzīgi, bet, neskatoties uz to, kļūda sasniedz 15,5 %. Turpmākie spiediena rādījumi starp abiem vakuummētriem arī pārsniedz  $\pm 15\%$  pieļaujamo kļūdu. Turklāt grafikā ir novērojams lēcieni abiem HPG 400 joinzācijas vakuummētriem, kas parādās no 4 sccm līdz 1 sccm. Nav viennozīmīgas atbildes, kāpēc HPG 400 ( SN 566 ) līkne pie 4 sccm, turpinot samazināt gāzes plūsmu līdz 1 sccm, pēkšņi nokrītas, tādējādi uzrādot labāku vakuumu, savukārt pie 1 sccm atkal izmainās, un vakuums pasliktinās. Viens no iemesliem varētu būt jonizācijas vakuummētra karstās katoda daļas ieslēgšana pie konkrēta spiediena, bet pases datus ir norādīts, ka karsta katoda jonizācijas daļu ir iespējams iestatīt uz sev vēlamu pārslēgšanas punktu. Turklāt jonizācijas pārslēgšana ir iespējama robežās no 1 mbar līdz  $5 \times 10^{-2}$  mbar, kas neatbilst tiem jonizācijas vakuummētru lēcieniem un vakuuma izmaiņām konkrētā spiediena diapazonā. HPG 400 SN 566 un SN 547 jonizācijas vakuummētriem ir iestatīta pārslēgšana uz karsta katoda sistēmu pie 1 mbar. Grafiski SN 547 vakuummētra rādījumi visos spiediena mērīšanas punktos ir atšķirīgi, proti, vakuummētrs uzrāda labāku vakuumu, salīdzinot ar pārējiem vakuummētriem. Pēkšņas izmaiņas spiediena rezultātos ir konstatētas tikai jonizācijas vakuummētriem (robežās no 4 sccm līdz 1 sccm argona), bet CDG spiedienu izmaiņas notiek atbilstoši gaidītajam.

### 3.4. Gāzes korekcijas ietekme uz vakuummētru rādījumiem

Jonizācijas vakuummētru gāzes korekcijas formula ir šāda [27], [44]:

$$P_{\text{eff}} = K \times P_{\text{izm}}, \quad (3.1)$$

kur  $K = 0,8$  (argonam).

3.1. tabula

Jonizācijas vakuummētra izmērītā un aprēķinātā spiediena salīdzinājums

Nr.	Argona plūsma, sccm	Ar argonu kamerā un bez korekcijas (SN547), Torr	Aprēķinātā spiediena vērtība (SN547), Torr	Ar argonu kamerā un ar korekciju (SN547), Torr	Kļūda, %
1	10 sccm	3,00E-03	2,40E-03	2,30E-03	4,20 %
2	9 sccm	2,60E-03	2,08E-03	2,00E-03	3,80 %
3	8 sccm	2,30E-03	1,84E-03	1,80E-03	2,20 %
4	7 sccm	2,10E-03	1,68E-03	1,50E-03	1,70 %
5	6 sccm	1,80E-03	1,44E-03	1,40E-03	2,80 %
6	5 sccm	1,50E-03	1,20E-03	1,20E-03	0 %
7	4 sccm	1,20E-03	9,60E-04	2,60E-03	171 %
8	3 sccm	2,50E-03	2,00E-03	1,90E-03	5 %
9	2 sccm	1,70E-03	1,36E-03	1,40E-03	2,90 %
10	1 sccm	2,70E-04	2,16E-04	2,20E-04	1,90 %

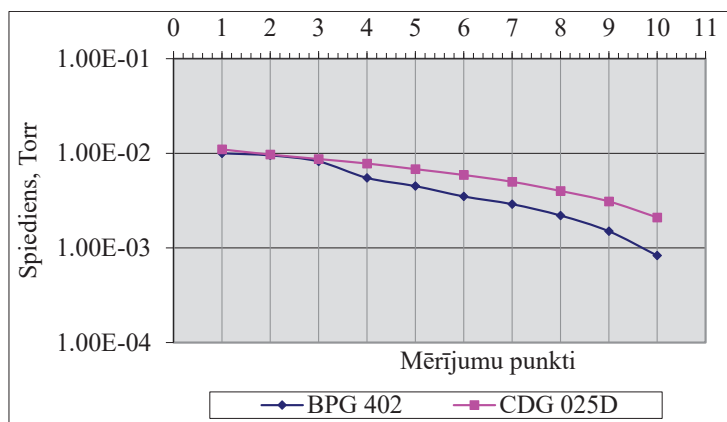
Iegūtie rezultāti no jonizācijas vakuummētra ar ieslēgto korekciju atšķirās no rezultātiem, kas bija aprēķināti, ņemot par pamatu spiedienu bez korekcijas. Iegūtie rezultāti tika salīdzināti,

un aprēķināta kļūda. Procentuāli iegūtā kļūda ir redzama 3.1. tab. Eksperimentos tika konstatēts straujš lēciens spiedienā pie nosacījuma, ka kamerā tiek ievadīts 4 sccm argona. Ja netiek ņemta vērā spiediena rezultātu un aprēķinu kļūda pie 4 sccm līdz 1 sccm argona, tad maksimāli aprēķinātā mērījumu kļūda ir 4,2 %.

Tika veikta jonizācijas vakuummetra HPG 400 korekcijas precizitātes pārbaude pēc argona gāzes, un iegūtie rezultāti liecina par to, ka aprēķinātā spiediena vērtība un vakuummetra uzrādītā korekcija atšķiras. Procentuāli tika aprēķināta precizitātes kļūda starp aprēķināto un uzrādīto lielumu. Tātad, neskatoties uz to, ka jonizācijas vakuummetra precizitātei ir noteikta kļūda, papildus tam vakuummetrā ir iebūvēta gāzes korekcija, kurai arī pastāv kļūda. Apvienojot abus faktorus, var izteikt pieņēmumu, ka kļūda atsevišķos posmos vai funkcijās būtiski ietekmē vakuummetra precizitāti.

### 3.5. BPG 402 jonizācijas un augstas precizitātes diafragmas vakuummetra pārbaude

Eksperimentos jonizācijas vakuummetru precizitātes pārbaudei tika izmantoti divi vakuummetri, katrs ar savu spiediena mērīšanas diapazonu. CDG 025D vakuummetrs bija izvēlēts kā precīzākā mērierīce spiediena diapazona robežās no  $1 \times 10^{-4}$  Torr līdz 0,1 Torr. Savukārt BPG 402 jonizācijas vakuummetrs bija izvēlēts kā precīzākā mērierīce pārbaudei augstā vakuumā līdz  $2 \times 10^{-6}$  mbar. Vakuummetri tika salīdzināti, lai varētu novērtēt spiediena mērījumu starpību un noteikt jonizācijas vakuummetru precizitāti.



3.5. att. Vakuummetru eksperimentālās spiediena līknes.

No iegūtajiem eksperimenta rezultātiem, kas grafiski attēloti 3.5. att., var secināt, ka CDG un BPG vakuummetru spiediena rādījumi atšķiras. Vislielākā savstarpējā kļūda sasniedz 60,5 %, un tā tika novērota, ielaižot vakuuma kamerā 1 sccm argona daudzumu. CDG vakuummetrseksperimenta gaitā nemainīgi uzrāda sliktāku vakuumu nekā BPG vakuummetrs. No iegūtajiem rezultātiem var secināt, ka CDG vakuummetrs var būt uzskatāms par uzticamāku, salīdzinot to ar BPG 402, jo diafragmas vakuummetra spiediena mērījumi

uzlabojas pakāpeniski, samazinot argona plūsmas daudzumu, tā darbība ir vienmērīga. BPG 402 vakuumetra gāzes korekcija arī var iespaidot to precizitāti.

### 3.6. Diafragmas vakuumetra un gāzes ietekmes eksperimentālie pētījumi

Eksperimenta laikā vakuuma kamera tika atsūknēta, pēc tam kamerā ievadīts maksimāli pieļaujamais argona daudzums, kas tiks izmantots eksperimenta laikā (šajā gadījumā 150 sccm). Kad kamerā tiek padota gāze maksimālā apjomā, spiedienu uzstāda pēc iespējas tuvāk  $9 \times 10^{-3}$  Torr vērtībai, lai eksperimenta laikā vakuummetru būtu iespējams pārbaudīt tieši šajā spiediena diapazonā, kurā tas tiek izmantots visu laiku, veicot dažāda veida tehnoloģiskus eksperimentus. Eksperimentā izmanto argona un skābekļa gāzi, ko ievada vakuuma kamerā dažādos apjomos gan atsevišķi, gan arī vienlaikus. Eksperimenta mērķis ir pārbaudīt gāzes ietekmi uz diafragmas vakuumetra precizitāti.

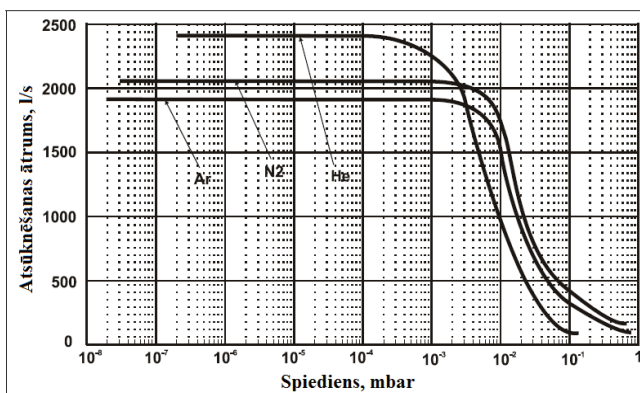
3.2. tabula

Diafragmas vakuumetra izmērītā spiediena kļūda atkarībā no gāzes apjoma

Nr.	Ar, sccm	O2, sccm	CDG 025D, Torr	Kļūda, %
1	50	50	6,22E-03	Izejas dati
2	75	25	6,44E-03	3,54 %
3	25	75	6,02E-03	3,22 %
4	0	100	6,02E-03	3,20 %
5	100	0	6,65E-03	6,90 %
6	75	75	9,15E-03	Izejas dati
7	50	100	8,94E-03	2,30 %
8	100	50	9,30E-03	1,64 %
9	150	0	9,73E-03	6,30 %
10	0	150	8,76E-03	4,30 %

No iegūtajiem datiem ir redzams, ka, saglabājot kopīgo gāzes daudzumu kamerā 100 sccm, bet mainot argona un skābekļa apjomu attiecību, mainās arī CDG vakuummetru uzrādītais spiediens (3.2. tab.). Ir redzams, ka, mainot gāzes plūsmas apjomu, diafragmas vakuumetra rādījumi mainās. Balstoties uz eksperimentā iegūtajiem datiem, mērījuma kļūda sasniedza 6,90 %.

Atsūknēšanas ātrums ir mainīga vērtība, bet tā var palikt nemainīga, sūknim sasniedzot noteiktas robežas. Piemēram, turbomolekulāra sūkņa TURBO-V3K-T tipiskas atsūknēšanas ātruma līknes (3.6. att.) [41].



3.6. att. Turbomolekulāra sūkņa atsūkņšanas ātruma līknes.

Apskatot argona līniju, var noteikt, ka robežās no 0,1 līdz 0,01 mbar atsūkņšanas ātrums pakāpeniski izlīdzinās un paliek nemainīgs līdz par  $5 \times 10^{-7}$  mbar [27].

Spiedienu var aprēķināt pēc šādas formulas:

$$P = \frac{Q}{S}, \quad (3.2)$$

kur  $Q$  – gāzes plūsma (sccm),  $1 \text{ sccm} = 0,0127 \frac{\text{Torr} \cdot \text{l}}{\text{s}}$  (2. pielikums);

$S$  – atsūkņšanas ātrums (l/s);

$P$  – spiediens (Torr).

3.3. tabula

Diafragmas vakuumetra spiediena mērtījumu kļūdas skaitliskās vērtības

Nr.	Ar, sccm	O <sub>2</sub> , sccm	Izmērītais spiediens CDG 025D, Torr	Aprēķinātais spiediens, Torr	Kļūda, %
1	50	0	2,86E-03	izejošie dati	0 %
2	0	50	2,64E-03	2,86E-03	7,70 %
3	0	100	5,15E-03	5,72E-03	9,97 %
4	100	0	5,75E-03	5,72E-03	0,52 %
5	75	0	4,33E-03	4,29E-03	0,93 %
6	0	75	3,94E-03	4,29E-03	8,16 %
7	150	0	8,52E-03	8,58E-03	0,70 %

Ekspierimenta rezultāti ir attēloti 3.3. tab. Pirmais mērtījums pie nosacījuma 50 sccm argona tika izvēlēts par izejošo punktu. Balstoties uz iegūtajiem aprēķiniem, var salīdzināt citus mērīšanas punktus. Palielinot argona gāzes plūsmu par 25 % un par 100 %, tiek iegūtas spiediena vērtības, kas procentuāli atšķiras par 0,93 % un 0,52 %. Vakuumetra darbība, izmantojot argona gāzi un vadoties pēc aprēķinātās kļūdas, ir apmierinoša un var tikt uzskatīta par pieļaujamu, jo nepārsniedz 1 %. Tomēr situācijās, kad vakuuma kamerā tika ievadīts tikai skābeklis, vakuumetra uzraudzītās spiediena vērtības būtiski atšķiras no aprēķinātajām vērtībām, jo kļūda sasniedza pat 9,97 %.

### 3.7. Diafragmas vakuummetra eksperimentālie pētījumi pirms un pēc nulles iestatīšanas

Izmantojot jauno eksperimentālo vakuuma iekārtu, tika veikta diafragmas vakuummetra iestatīšana. Nulles punkts diafragmas vakuummetram vai nu strādājot ilglaicīgi, vai piesārņojuma rezultātā, var nobīdīties, tādā gadījumā nulles iestatīšana ir nepieciešama.

3.4. tabula

Diafragmas vakuummetra spiediena izmērītais un aprēķinātais spiediens pirms nulles iestatīšanas operācijas

Argona plūsma, sccm	Izmērītais spiediens CDG 025D, Torr	Aprēķinātais spiediens, Torr	Kļūda, %
10 sccm	7,30E-03	1,7E-02	132,88 %
8 sccm	6,10E-03	1,36E-02	122,95 %
6 sccm	4,90E-03	1,02E-02	108,16 %
4 sccm	3,70E-03	6,8E-03	83,78 %
2 sccm	2,40E-03	3,4E-03	29,41 %
1 sccm	1,70E-03	Izejas dati	0 %

Apskatot 3.4. tabulu, ir redzams, ka palielinot argona gāzes plūsmu, spiediena starpība starp eksperimentāli iegūtām un aprēķinātām vērtībām ir zem 1 % robežas, bet, ievadot argona vietā skābekļa gāzi, spiediena mērījumi izmainās, un kļūda sasniedz 9,97 %. No eksperimenta var secināt, ka diafragmas vakuummetra iestatīšana ir daļēji veiksmīga, jo, strādājot ar argona gāzi un mainot tās plūsmu par attiecīgu lielumu, izmainās arī spiediens (ar nenozīmīgu kļūdu).

### 3.8. Gāzes plūsmas kontroliera precizitātes eksperimenti

Viena no vakuuma sistēmas sastāvdaļām ir *MFC* (*Mass flow controller*). Tas tiek izmantots, lai kontrolētu gāzes plūsmas apjomu. Bija nepieciešams pārbaudīt argona *MFC* darbību un analizēt iegūtos rezultātus. Kļūda rādījumos var būt saistīta ar *MFC* iespējamo nepareizo darbību. Eksperimenta laikā kamerā tika ielaista argona gāze noteiktā apjomā.

3.5. tabula

Diafragmas vakuummetra spiediena kļūdas, izmantojot skābekļa *MFC*

Nr.	Ar (sccm)	CDG 025D (Torr)	CDG 025D (Torr) caur skābekļa <i>MFC</i>	Kļūda
1	50	3,40E-03	3,58E-03	5,00%
2	75	5,00E-03	5,26E-03	4,94%
3	100	6,68E-03	6,92E-03	3,47%
4	150	9,83E-03	1,00E-02	1,70%

Argona gāzes padošana tika veikta, izmantojot argona un skābekļa gāzes *MFC*. Kad argona gāzes padeve tika saslēgta kopā ar skābekļa *MFC*, maksimālā aprēķinātā un eksperimentāli iegūtā spiediena vērtība sasniedza kļūdu 5 %. Kā redzams 3.5. tab., var secināt, ka argona gāzes plūsmas atsevišķi un caur skābekļa *MFC* tiek ievadīta korektos apjomos, jo, salīdzinot abus rezultātus, ir redzams, ka savstarpējā spiedienu starpība procentuāli nepārsniedz 5 % kļūdu, un,



palielinoties argona gāzes plūsmas apjomam, tā samazinās. *MFC* darbība ir laba, bet ar nobīdēm ne vairāk par 5 %. Spiediena mērījumu kļūda ir saistīta ar pašu diafragmas vakuometru un, iespējams, citiem apstākļiem.

### 3.9. Vakuometra pārbaude, lietojot Stjudenta sadalījumu

Izmantojot Stjudenta sadalījumu, ir iespējams pārbaudīt vakuometra darbības precizitāti, aprēķināt vidējo kvadrātisko kļūdu, kā arī vidējās vērtības ticamības intervālu (3.6. tab.) [27].

3.6. tabula

Diafragmas vakuometra spiediena mērvienības izmantojot skābekļa *MFC*

n	HPG 400 izmērītais spiediens $x_i$ , Torr	$\Delta x = \bar{x} - x_i$ , Torr	$\Delta x^2$ , Torr
1	3,99E-04	+ 0,11E-04	0,0121E-04
2	4,11E-04	+ 0,001E-04	0,0001E-04
3	4,25E-04	+ 0,15E-04	0,0225E-04
4	3,80E-04	- 0,3E-04	0,09E-04
5	4,15E-04	+ 0,05E-04	0,0025E-04
6	4,22E-04	+ 0,12E-04	0,0144E-04
7	4,51E-04	+ 0,41E-04	0,1681E-04
8	4,35E-04	+ 0,25E-04	0,0625E-04
9	3,91E-04	- 0,19E-04	0,036E-04
10	3,86E-04	- 0,24E-04	0,0576E-04

Tālāk tiek aprēķināta vidējā kvadrātiskā kļūda [27]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0,227E - 04 \text{ Torr.} \quad (3.3)$$

Izmantojot tabulu, kas ir attēlota 1. pielikumā, nosaka Stjudenta koeficientu:  $f = n - 1 = 9$ ; ( $P = 0,95$ )  $t = 2,26$  un aprēķina vidējās vērtības ticamības intervālu [27]:

$$\Delta \bar{x} = \sqrt{\frac{S^2}{n}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{2,26 \times 0,227}{\sqrt{10}} = 0,16223E - 04 \text{ Torr.} \quad (3.4)$$

Tāpat spiediena vidējās vērtības intervāls ir:  $4,1 \pm 0,16E - 04 \text{ Torr}$  [27].

Eksperimentā iegūtās spiediena vērtības nepārsniedz pieļaujamā diapazona robežas no  $4,05E-04 \text{ Torr} \pm 15 \%$ , vakuometra precizitāte, manipulējot ar skābekļa plūsmu un uzturot sākotnējo spiedienu, ir apmierinoša. Spiediena mērījumu vērtības ir gan negatīvas, gan pozitīvas, un aprēķinātā vidējā vērtība ir ļoti tuva sākotnējam spiedienam.

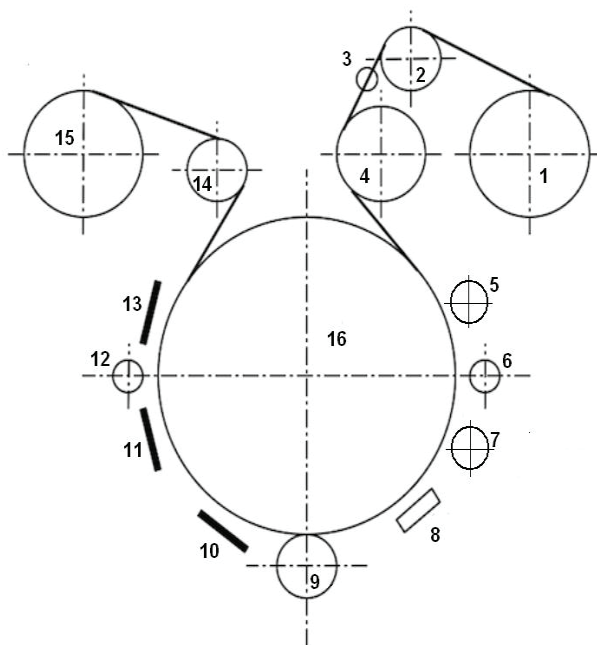
## 4. SPIEDIENA IETEKME UZ VAKUUMA NANOPĀRKLĀJUMA ĪPAŠĪBĀM UN VIZUĀLO STĀVOKLI

### 4.1. SiO<sub>2</sub> nanopārklājuma uznešanas vakuuma iekārta un tās uzbūve

Tika veikti vairāki eksperimenti, izmantojot UV80 iekārtu uzņēmumā AS “Sidrabe”, kur uz plēves tika uzests silīcija dioksīds (SiO<sub>2</sub>) pie dažādiem spiedieniem ar mērķi iegūt rezultātus par nanopārklājuma kvalitāti un to raksturlielumiem (4.1. att.). Laboratorijas iekārta ir paredzēta metālu un oksīdu magnetroniskai uzputināšanai uz lokšņveida un ruļņveida materiāliem, tādiem kā plēves, audums, metāla folijas.

Izmantojamie ruļņveida plēves izmēri ir šādi:

- 1) maksimāli iespējamais plēves platums ir 600 mm, bet uznestā nanopārklājuma platumu ir iespējams mainīt ar aizsargekrāniem robežās no 200 mm līdz 550 mm [13];
- 2) pieļaujamais plēves biezums ir no 50 μm līdz 200 μm;
- 3) plēves maksimālais garums ir 500 m (atkarībā no biezuma).



4.1. att. Vakuuma iekārtas UV80 pārtīšanas mehānisma principiāla shēma.  
(1, 2, 4, 14, 15 – rullīši; 16 – galvenais veltnis; 3 – gaismas caurlaidības mērierīce; 5, 7 – planārie magnetroni; 6, 12 – gāzes ievadi; 8 – jonu lielgabals; 9 – piespiedējruļlis; 10 – mirdzizlādes ierīce; 11, 13 – magnetroni).

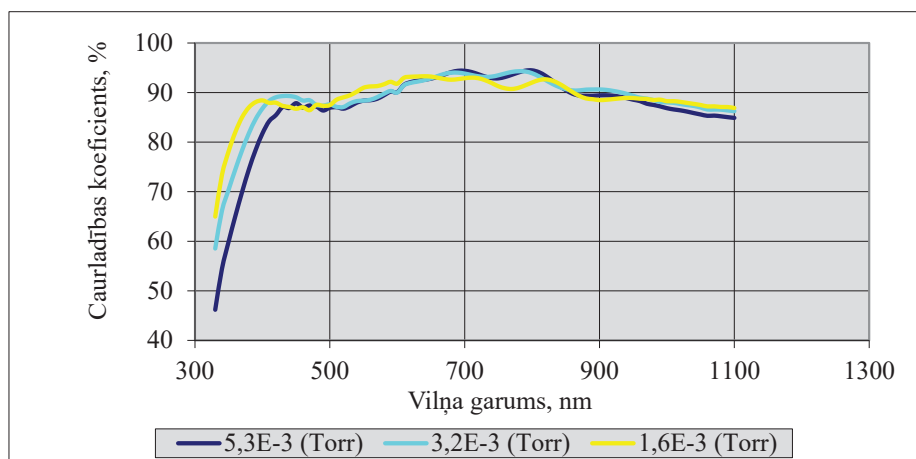
Vakuuma iekārta UV80 ir aprīkota gan ar jonu lielgabalu, gan ar mirdzizlādes ierīci, nodrošinot pamatnes apstrādi pirms nanopārklājuma uznešanas. Pamatnes žāvēšanai un

atgāzēšanai izmanto pārtišanas iekārtas centrālo veltni, kur pamatne tiek uzsildīta līdz 90 °C temperatūrai.

## 4.2. SiO<sub>2</sub> nanopārklājuma uznešanas eksperimenti

Eksperimentus veica, izmantojot laboratorijas iekārtu UV80. Par pamatni izmantoja polietilēntereftalāta plēvi (*PET*) ar uznešanas zonas platumu 500 mm un katra nanopārklājuma paraugu garumu līdz diviem metriem. Eksperimenta laikā tika izmantots impulsa barošanas avots *Advanced Energy Pinnacle Plus*, 10 kW *Pulsed DC*, 0–350 kHz kopā ar vienu magnetronu, kurā bija uzstādīts silīcija mērķis. Eksperimentiem izvēlēts SiO<sub>2</sub> nanopārklājums, kura galvenā īpašība ir gaismas caurlaidības paaugstināšana.

Eksperimentu mērķis ir pārbaudīt, kā dažāda veida spiediena izmaiņas var ietekmēt nanopārklājuma vizuālo izskatu un tā īpašības, proti, gaismas caurlaidību, kā arī izmainīt nanopārklājuma biežumu.



4.2. att. Trīs izpētīto nanopārklājumu caurlaidības koeficienta līknes.

Visiem trīs uzklātajiem nanopārklājumiem caurlaidības koeficienti pārsniedz 88 % robežu, kas bija definēta balstoties uz *PET* plēves gaismas caurlaidības iespējām (4.2. att.).

4.1. tabula

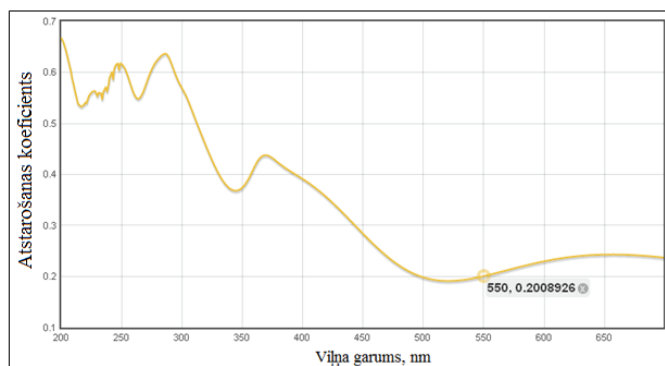
SiO<sub>2</sub> nanopārklājuma biežuma un caurlaidības koeficienta skaitliskas vērtības

Spiediens, Torr	Pamatnes vidus		Pamatnes mala	
	Biezums, nm	Caurleidības koeficients, %	Biezums, nm	Caurleidības koeficients, %
5,3E-03 Torr	348,3	88,37	359,8	87,42
3,2E-03 Torr	362,5	88,37	349,4	88,28
1,6E-03 Torr	334,4	90,98	327,4	90,87

Iegūtie eksperimentālie rezultāti ir attēloti 4.1. tab. Neskatoties uz to, ka pie spiediena  $3,2E-03$  Torr un  $5,3E-03$  Torr caurlaidības koeficienti ir vienādi, vizuālais stāvoklis pie dažādiem viļņa garumiem atšķiras. Nanopārklājums, kas uzklāts pie spiediena  $5,3E-03$  Torr ultravioletā zonā bija tumšāks un ar mazāku caurlaidības koeficientu nekā nanopārklājums pie  $3,2E-03$  Torr. Tāpat spiediens, pie kura tiek veikts nanopārklājuma uznešanas tehnoloģiskais process, ir saistīts un ietekmē nanopārklājuma īpašību – gaismas caurlaidību.

Mainoties spiedienam, ir nepieciešams pievērst uzmanību arī nanopārklājuma biezumam.

Nanopārklājumu caurlaidības koeficienti pie spiedieniem  $5,3E-03$ , Torr un  $3,2E-03$ , Torr ir vienādi, bet nanopārklājuma biezums atšķiras par 13,9 nm. Savukārt nanopārklājums ar vislielāko caurlaidības koeficientu ir tikai 334,3 nm biezs. Izmantojot @FILMETRICS piedāvāto programmu, ir iespējams pārbaudīt nanopārklājumu atstarošanas koeficientu atkarībā no biezuma (4.3. att.) [43].



4.3. att.  $\text{SiO}_2$  nanopārklājuma atstarošanas koeficients pie spiediena  $5,3E-03$  Torr un biezuma 348,3 nm.

No nanopārklājuma biezuma ir atkarīga atstarošanas koeficienta vērtība. Jo biežāks ir nanopārklājums, jo mazāks ir atstarošanas koeficients.

Rezultātā uzklātie nanopārklājumi tika pārbaudīti, analizēti un aprakstīti, veikta modelēšana, izmantojot piedāvāto tiešsaistes programmu. No pētījuma rezultātiem var secināt, ka procesa vadība un nanopārklājuma uzklāšana pie dažādiem spiedieniem ietekmē nanopārklājuma īpašības un vizuālo stāvokli. Savukārt, izveidojot  $\text{SiO}_2$  procesa vadību pārejas zonā, uzturot vajadzīgo jaudu, ir iespējams iegūt labas nanopārklājuma īpašības, vizuālo stāvokli un biezumu pie spiediena  $1,6E-03$  Torr. Mainot spiediena robežas, mainīsies arī nanopārklājuma īpašības, līdz ar to ir nepieciešama precīza spiediena mērīšanas ierīce. Spiediena izmaiņas var svārstīties dažādos diapazonos atkarībā no situācijas vai mērīšanas ierīces kļūdainas darbības. Var mainīties ne tikai nanopārklājuma vizuālais stāvoklis, bet atkarībā no iekārtas elementu darbības un citiem procesa apstākļiem var mainīties arī nanopārklājuma viendabīgums visas pamatnes garumā.

## 5. SiO<sub>2</sub> NANOPĀRKLĀJUMA CAURLAIDĪBAS PROGNOZĒŠANA, LIETOJOT FAZILŌGIKU

### 5.1. FazilŌgikas pamatprincips un tā izmantošana eksperimentos

Lai pilnvērtīgāk un precīzāk modelētu dažāda veida sistēmas, ieteicams mainīt pieeju un samazināt kvantitatīvās metodes izmantošanu, tā vietā lietojot lingvistisko metodi, kur ir iespējams izmantot ne tikai skaitļus kā mainīgo vērtības, bet arī vārdus un teikumus [2], [38]. Tieši šādas mainīgas vērtības ir fazilŌgikas pamatelementi. Latvijas Zinātņu akadēmija (LZA) fazilŌgiku definē šādi: loģika, kas speciāli izveidota zināšanu un cilvēka domāšanas procesu attēlošanai. FazilŌgika tiek plaši izmantota ekspert- un mākslīgā intelekta sistēmās. Atšķirībā no binārās loģikas vērtību „aplams” un „paties” vietā fazilŌgika operē ar loģiskiem mainīgajiem, kas pieņem virkni dažādu vērtību, piemēram, „pareizi”, „nepareizi”, „ne gluži pareizi”, „vairāk vai mazāk pareizi”, „pavisam pareizi”, „kļūdaini”, „ne pārāk kļūdaini”, „visai kļūdaini”, „augstākā mērā kļūdaini”, kas to padara tuvāku cilvēka domāšanas veidam [48].

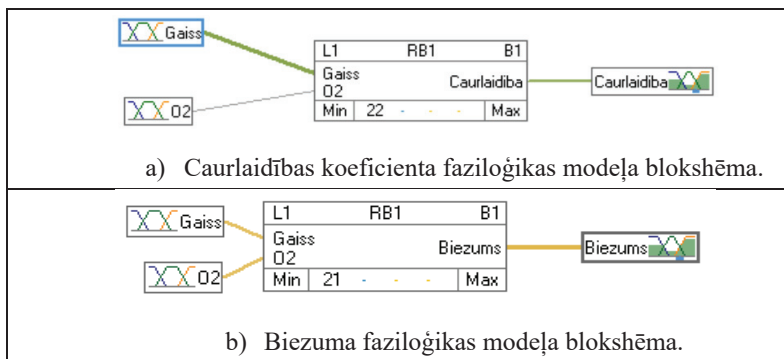
Citiem vārdiem sakot, fazilŌgika ir izveidota, lai attēlotu cilvēka domāšanas un analīzes procesu [15]. FazilŌgika dod iespēju, balsoties uz ieejas datiem, prognozēt galveno izejas parametru un izveidot prognozēšanas modeli [22], [37]. Tā ļauj attēlot cilvēka lēmuma pieņemšanas un situācijas analīzes procesus algoritmiskā formā [39]. Ja tradicionālā loģika operē tikai ar divām vērtībām: 0 (viltus) un 1 (paties), tad fazilŌgika piedāvā izmantot funkciju, kas darbojas tajā pašā diapazonā no 0 (viltus) līdz 1 (paties) ar loģiskiem mainīgajiem, kas var pieņemt dažādas vērtības.

Ar fazilŌgikas palīdzību un lingvistisko formulējumu tiek aprakstīti divi procesa parametri: gāzes plūsmas apjomi (ieejošas mainīgas vērtības) un caurlaidības koeficients (izejoša mainīga vērtība). FazilŌgikas darbības modelis balstās uz pamatprincipu “ja–tad”, kas apraksta mainīgo savstarpējo attiecību. Iegūtais rezultāts tiek attēlots, izmantojot 2D vai 3D vizualizācijas grafiku, kas apraksta parametru savstarpējās ietekmes izmaiņas, kā arī dod iespēju analizēt atsevišķas zonas, kurās ir vēlams vai nevēlams veikt tehnoloģisko procesu, iegūstot attiecīgus parametrus [16].

### 5.2. SiO<sub>2</sub> nanopārklājuma caurlaidības un biezuma fazilŌgikas modeļa izstrāde

Lai iegūtu datus, tika veikti SiO<sub>2</sub> nanopārklājuma uznešanas eksperimenti izmantojot laboratorijas iekārtu UV80, caurlaidības koeficienta mērīšanai izmantoja SPEKTROFOTOMETRS MC 122 (AS „Sidrabe”), savukārt nanopārklājuma biezuma noteikšanai izmantoja FILMETRICS F20-UV (AS „Sidrabe”) [25]. FazilŌgikas modeļu izstrāde tika veikta ar speciālu datorprogrammu *fuzzyTECH 8.30b Professional Demo*.

FazilŌgikas modeļa izstrādei tika izmantoti divi „ieejas” mainīgie: skābekļa plūsmas daudzums un gaisa plūsmas daudzums, bet „izejas” vērtības parametri bija caurlaidības koeficients un biezums (5.1. att.) [25].



5.1. att. Faziloģikas modeļa blokshēmas.

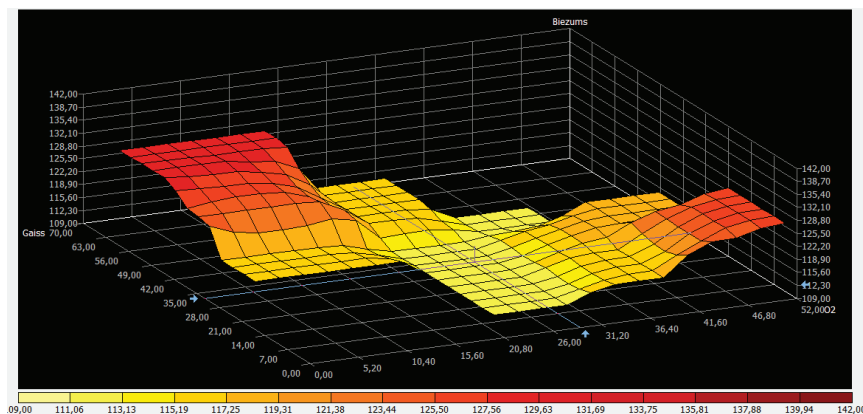
Katram parametram tika izveidota faziloģikas kopa ar piederības funkcijām, kur vērtības robežas ir no 0 līdz 1. Piederības funkcijas ir identiskas gan caurlaidības, gan biezuma faziloģikas modeļa izstrādes gadījumā.

Gaisa, skābekļa, caurlaidības un biezuma vērtības tika iedalītas piecās piederības funkcijās. Tika definēti nosacījumi nanopārklājuma biezuma un caurlaidības blokiem.

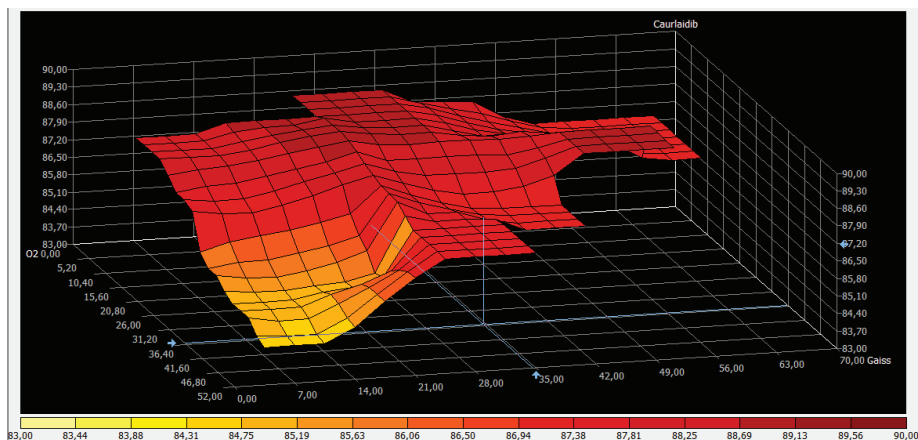
### 5.3. Datu defazifikācija un prognozēšanas modeļi

Tika veikta datu defazifikācija un iegūti prognozēšanas modeļi, kas attēloti kā 3D grafiki 5.2. un 5.3. att. [25] Veicot SiO<sub>2</sub> eksperimentus, galvenais mērķis bija izveidot faziloģikas prognozēšanas modeli nanopārklājuma caurlaidības koeficientam un biezumam, imitējot tecu tehnoloģiskā procesa laikā.

Šie modeļi ļauj prognozēt iespējamo gaismas caurlaidības koeficientu un biezumu atkarībā no teces apjoma un pieņemt lēmumu par tehnoloģiskā procesa apstādināšanu vai turpināšanu ar nosacījumu, ka nanopārklājuma īpašības būs atbilstošas tehniskajām prasībām [25]. Prognozēšanas modeļi ļauj teces gadījumā noteikt konkrēto caurlaidības koeficienta un attiecīgā biezuma apgabalu un veikt gāzes korekcijas vēlamajā virzienā.



5.2. att. Biezuma 3D faziloģikas prognozēšanas modelis.



5.3. att. Caurīdības koeficienta 3D faziloģikas prognozēšanas modelis.

Mainot ieejas parametru vērtības, datorprogramma un faziloģikas modeļi ļauj noteikt un prognozēt nanopārklājuma caurīdības koeficientu un biežumu. Izmantojot faziloģiku un prognozēšanas modeļus, ir iespējams samazināt nepieciešamo nanopārklājuma uznešanas eksperimentu skaitu, pieņemot lēmumu par tehnoloģiskā procesa apstādināšanu vai kāda parametra korigēšanu [3].

## 6. METODOLOĢIJAS IZVEIDOŠANA VAKUUMMETRU PĀRBAUDEI

Balstoties uz vakuuma tehnikas, jaunas vakuuma iekārtas, vakuummetru darbības principa un uzvedības analīzes, kā arī uz visiem paveiktajiem un aprakstītajiem eksperimentiem, promocijas darbā tika izstrādāta metodoloģija vakuummetru pārbaudei vakuumā (6.1. att.).

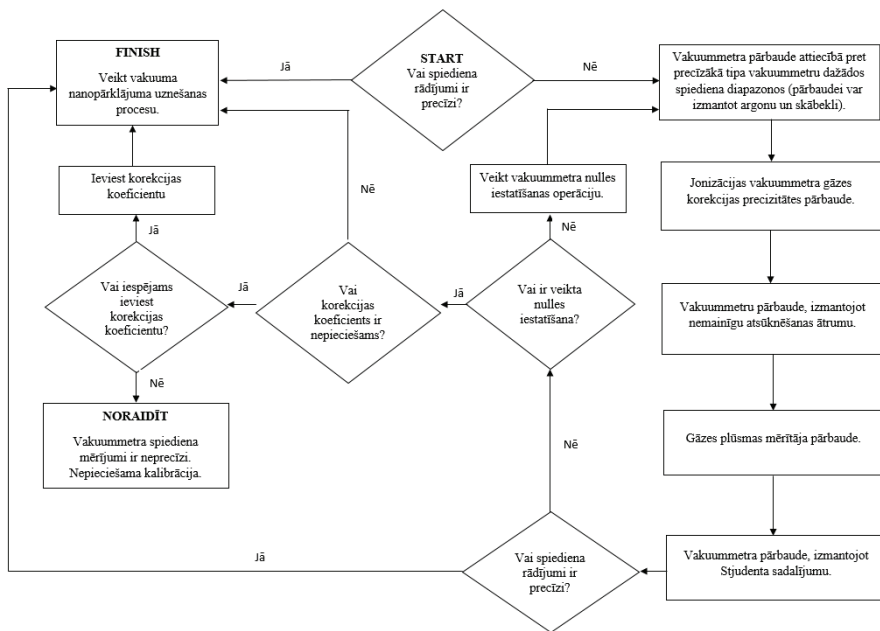
Vakuummetra pārbaudes blokshēma attēlo svarīgākos tehnoloģiskā procesa posmus, sekojot kuriem ir iespējams veikt vakuuma iekārtas izslēgšanu un pielāgošanu ārkārtas gadījumā, kā arī nodrošināt, pārbaudīt un iestatīt vakuummetru nanopārklājuma uznešanas procesu.

Iepriekš aprakstītās metodes pārbauda vakuummetra darbību dažādos apstākļos, mainot gāzes plūsmas, spiedienus, pārbauda gāzes padeves sistēmas elementus, kas tiek iesaistīti vakuuma nanopārklājuma procesā. Izveidotā vakuummetru pārbaudes metodoloģija ļauj izpētīt vakuummetra darbības nianses, to precizitāti, uzvedību pie dažādiem mainīgiem apstākļiem, rast saprašanu par vispareizāko vakuummetra lietojumu, balstoties uz spiediena diapazonu, apkārtējo vidi un citiem faktoriem, kas ietekmē mērījumus. Iegūtie eksperimentu rezultāti var tikt apvienoti un izmantoti kā datubāze.

Vakuummetru spiediena mērījumu precizitāte un atkārtojamība var palikt nemainīga pēc eksperimentāliem pētījumiem, izmantojot izstrādāto pārbaudes metodoloģiju, bet iegūtie dati ļauj analizēt vakuummetra precizitāti dažādos spiediena diapazonos. Tādējādi, veicot vakuuma nanopārklājuma uznešanas tehnoloģisko procesu ar vakuummetru, kuram piemīt palielināta kļūda, var ieviest korekcijas koeficientu, balstoties uz eksperimentāliem pārbaudes datiem, kā arī vakuuma nanopārklājuma uznešanas procesa parametriem. Promocijas darba laikā tika veikta diafragmas vakuummetra pārbaude, nulles iestatīšanā un iegūti dati. Balstoties uz iegūtiem datiem 3.21. tab., var pietuvināti aprēķināt diafragmas vakuummetra kļūdu, veicot SiO<sub>2</sub> nanopārklājuma uznešanas procesu. Prognozējamā kļūda būs robežās no 7,70 % līdz 9,19 %. SiO<sub>2</sub> tehnoloģiskajam procesam kļūda ir pieļaujama un neietekmēs nanopārklājuma caurlaidības koeficientu, biezumu un vizuālo stāvokli.

Vakuummetru pārbaudi var veikt ik pēc noteikta laika diapazona (piemēram, pēc nedēļas), iegūstot jaunus datus, un veikt datu analīzi, izveidojot vakuummetra mainīgo spiediena uzvedības modeli, tādējādi pielāgojot to nanopārklājuma uznešanas procesam. Tostarp pārbaude ir nepieciešama, lai izvairītos no aplamas lēmuma pieņemšanas par vakuummetra sūtīšanu uz speciālu laboratoriju, lai veiktu mērīinstrumenta kalibrāciju. Vakuummetra pārbaude neizslēdz to kalibrāciju, bet ļauj izanalizēt šīs operācijas nepieciešamību. Vakuummetra pārbaudes metodoloģija ir unikāla, aptver vairākas pārbaudes metodes, dod iespēju izpētīt vakuummetra darbību un apkopot rezultātus, izveidojot modeli.





6.1. att. Vakuummetru pārbaudes blokhēma.

## SECINĀJUMI

- 1) Vadoties pēc vakuummetru darbības principiem, uzbūves, to priekšrocību un trūkumu analīzes, tika secināts, ka pārklājuma uznešanas tehnoloģiskiem procesiem zemā vakuumā piemērotāk lietot diafragmas vakuummetru tā drošās un vienkāršās uzbūves, augstas precizitātes un labas atkārtojamības, kā arī noturības pret gāzes ietekmi dēļ.
- 2) Tika uzprojektēta un izgatavota speciāla vakuummetru eksperimentāla pārbaudes iekārta, kas ļauj sasniegt  $2 \times 10^{-6}$  Torr vakuumu ļoti īsā laikā posmā (~ 20 min.).
- 3) Tika veikti vakuummetru HPG 400, BPG 402 un CDG 025D daudzfunkcionālie eksperimentālie pētījumi, izmantojot pārbaudes vakuuma iekārtu un UV80 laboratorijas vakuuma iekārtu. Pētījumu laikā tika pārbaudītas jonizācijas vakuummetru gāzes korekcijas funkcijas, kā arī gāzes plūsmas mērītāja darbība. Pirms eksperimentālās pārbaudes diafragmas vakuummetra precizitāte pārsniedza pieļaujamo robežu 0,2 % no mērījuma un atsevišķos gadījumos sasniedza kļūdu līdz 132,88 %. Pēc nulles iestatīšanas un atkārtotas eksperimentālas pārbaudes kļūda samazinājas līdz 9,97 %. Balstoties uz vakuummetra pārbaudes eksperimentāliem rezultātiem un pārklājuma uznešanas eksperimentu rezultātiem, tika secināts, ka diafragmas vakuummetra prognozējamā kļūda pēc pārbaudes manipulācijām var būt robežās no 7,70 % līdz 9,19 %. Šī kļūda būtiski neietekmē nanopārklājuma vizuālo stāvokli un īpašības.
- 4) Tika izpētīta spiediena svārstību ietekme uz vakuuma nanopārklājuma īpašībām un vizuālo stāvokli. Eksperimentiem tika izvēlēts SiO<sub>2</sub> nanopārklājums un UV80 laboratorijas vakuuma iekārta. Iegūtie rezultāti liecina par to, ka nelielas svārstības spiedienā var ietekmēt nanopārklājuma īpašības un vizuālo stāvokli, t. i., nanopārklājums ar vislabāko caurlaidības koeficientu 90,98 %, atstarošanas koeficientu 0,2433 un vizuālo stāvokli tika uzklāts pie spiediena 1,6E-3 Torr. Savukārt pie spiediena 5,3E-03 Torr pārklājumam tika novērotas vairāk metāla fāzes pazīmes (tumši brūna krāsa) un gaismas caurlaidības koeficients 87,42 %.
- 5) Izstrādāts SiO<sub>2</sub> nanopārklājuma caurlaidības un biezuma prognozēšanas faziloģikas modelis teces gadījumā, kas ļauj noteikt un prognozēt nanopārklājuma caurlaidības koeficientu un biežumu. Izmantojot faziloģiku un prognozēšanas modeļus, ir iespējams samazināt nepieciešamo nanopārklājuma uznešanas eksperimentu skaitu, pieņemot lēmumu par tehnoloģiskā procesa apstādīšanu vai kāda parametra koriģēšanu ar mērķi nodrošināt nanopārklājuma īpašības nepieciešamajā līmenī un turpināt procesu.
- 6) Balstoties uz promocijas darbā veiktajiem vakuummetru pārbaudes un nanopārklājuma uznešanas eksperimentiem, kā arī nanopārklājuma uznešanas procesu specifiku, uzņēmumā AS „Sidrabe” tika izveidota vakuummetru pārbaudes metodoloģija vakuuma nanopārklājumu uznešanas procesiem ar mērķi nodrošināt iespēju nepieciešamības gadījumā izpētīt vakuummetra darbības nianšes, to precizitāti, atkārtojamību, uzvedību pie dažādiem mainīgiem apstākļiem, veikt nulles iestatīšanu nepieciešamības gadījumā, izveidot un uzturēt datubāzi, ieviest korekcijas koeficientu, balstoties uz eksperimentos iegūtajiem datiem, kā arī nodrošināt ātru un ērtu vakuummetra pārbaudes veidu.

## IZMANTOTĀ LITERATŪRA

1. Akram, H. M., Fasih, A. Selection Criterion of Gauges for Vacuum Measurements of Systems with Diverse Ranges. *Physics Procedia*. 2012, vol. 32, pp. 503–512. Available from: doi: 10.1016/j.phpro.2012.03.594.
2. Athanasopoulos, G., Riba C. R., Athanasopoulou, C. A decision support system for coating selection based on fuzzy logic and multi-criteria decision making. *Expert Systems with Applications*. 2009, vol. 36, no. 8, pp. 10848–10853. Available from: doi: 10.1016/j.eswa.2009.01.016.
3. Barzani, M. M., Zalnezhad, E., Sarhan, Ahmed A. D., Farahany, S., Ramesh, S. Fuzzy logic based model for predicting surface roughness of machined Al–Si–Cu–Fe die casting alloy using different additives-turning. *Measurement*. 2015, vol. 61, pp. 150–161. Available from: doi: 10.1016/j.measurement.2014.10.003.
4. Bishop, C. A. *Vacuum deposition onto webs, films and foils*. Amsterdam: William Andrew Publishing, 2006, 497 p. ISBN: 978-0-8155-1535-7.
5. Daudé, B., Elandaloussi, H., Janssen, K. On the gas dependence of thermal transpiration and a critical appraisal of correction methods for capacitive diaphragm gauges. *Vacuum*. 2014, vol. 104, pp. 77–87. Available from: doi: 10.1016/j.vacuum.2014.01.002.
6. Gavignet, E., Lanzetta, F. Dynamic operation of a micro-thermocouple sensor as a vacuum gauge. *Vacuum*. 2014, vol. 100, pp. 18–21. Available from: doi: 10.1016/j.vacuum.2013.07.043.
7. Hidalgo, M. J., Segovia, J. L. De. Uncertainties in calibration using capacitance diaphragm gauges as reference standard. *Vacuum*. 2008, vol. 82, no. 12, pp. 1503–1506. Available from: doi: 10.1016/j.vacuum.2008.03.092.
8. Hyland, R. W., Shaffer, R. L. Recommended practices for the calibration and use of capacitance diaphragm gages as transfer standards. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. 1991, vol. 9, no. 6, pp. 2843–2863. Available from: doi: 10.1116/1.577209.
9. Isogai, H. Analysis of thermal influence on the accuracy of a spinning rotor gauge. *Vacuum*. 1993, vol. 44, no. 11-12, pp. 1181–1187. Available from: doi: 10.1016/0042-207x(93)90344-a.
10. Jitschin, W., Ludwig, S. Dynamical behaviour of the Pirani sensor. *Vacuum*. 2004, vol. 75, no. 2, pp. 169–176. Available from: doi: 10.1016/j.vacuum.2004.02.002.
11. Jiang, F., Zhang, T. F., Wu, B. H., Yu, Y., Wu, Y. P., Zhu, S. F., Jing, F. J., Huang, N., Leng, Y. X. Structure, mechanical and corrosion properties of TiN films deposited on stainless steel substrates with different inclination angles by DCMS and HPPMS. *Surface and Coatings Technology*. 2016, vol. 292, pp. 54–62. Available from: doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.03.007.
12. Jung, D. H., Moon, I. K., Yun, Y. J., Park, C. D., Chung, S. M., Jeong, Y. H. Measuring thermophysical properties of gases with a single thermocouple: Peltier vacuum gauge. *Thermochimica Acta*. 2007, vol. 455, no. 1-2, pp. 40–45. Available from: doi: 10.1016/j.tca.2006.12.002.

13. Kazušs, J., Kozlovs, V., Mačevskis, E. *Processes Control for Oxide Layer Deposition in Roll-to-Roll Vacuum Machines* [online]. SVC, 2013 [Viewed 12 July 2017]. Available from: [http://www.bing.com/cr?IG=20217DEB0D51462CB9E4FA180F609A98&CID=3C3E8112B9366CF129F78A5DB8306D68&rd=1&h=O5SmOFOWftu9ubSICSmJ-gbOqOvJZ8Xqw-YK73yLBcQ&v=1&r=http%3a%2f%2fwww.sidrabe.com%2fassets%2ffiles%2fProcesses%2520Control%2520for%2520Oxide%2520Layer%2520Deposition%2520in%2520Roll-to-Roll%2520Vacuum%2520Machines\\_2013.pdf&p=DevEx,5067.1](http://www.bing.com/cr?IG=20217DEB0D51462CB9E4FA180F609A98&CID=3C3E8112B9366CF129F78A5DB8306D68&rd=1&h=O5SmOFOWftu9ubSICSmJ-gbOqOvJZ8Xqw-YK73yLBcQ&v=1&r=http%3a%2f%2fwww.sidrabe.com%2fassets%2ffiles%2fProcesses%2520Control%2520for%2520Oxide%2520Layer%2520Deposition%2520in%2520Roll-to-Roll%2520Vacuum%2520Machines_2013.pdf&p=DevEx,5067.1)
14. Kocas, I., Sariyerli G. S. The characterization of new VGMS (vacuum gauge metrology system) by the traceability of multi stage static expansion system. *Measurement*. 2012, vol. 45, no. 10, pp. 2430–2433. Available from: doi: 10.1016/j.measurement.2011.10.043.
15. Kromanis, A., Krizbergs, J. Prediction of 3D Surface Roughness Using Regression Analysis and Fuzzy Logic, and their Comparative Analysis. *Ražošanas tehnoloģija*. 2013, vol. 35, pp. 130–137. ISSN 1407-8015. e-ISSN 2255-8721.
16. Kromanis, A., Krizbergs, J. Prediction of Surface Roughness in End-Milling Using Fuzzy Logic and Its Comparison to Regression Analysis. *Ražošanas tehnoloģija*. 2009, vol. 31, pp. 75–78. ISSN 1407-8015.
17. Li, D., Jousten, K. Comparison of some metrological characteristics of hot and cold cathode ionisation gauges. *Vacuum*. 2003, vol. 70, no. 4, pp. 531–541. Available from: doi: 10.1016/s0042-207x(02)00781-9.
18. Ma, G., Wang, L., Gao, H., Zhang, J., Reddyhoff, T. The friction coefficient evolution of a TiN coated contact during sliding wear. *Applied Surface Science*. 2015, vol. 345, pp. 109–115. Available from: doi: 10.1016/j.apsusc.2015.03.156.
19. Murray, V.A.C. *VACUUM SCIENCE AND ENGINEERING*. New York: McGraw Hill, 1965. 239 p.
20. Odišis, I., Rudzītis, J. *Precizitāte un drošums 1.daļa*. Rīga: RTU izdevniecība, 2008. 115 lpp.
21. Pfeiffer Vacuum GmbH. *The Vacuum Technology Book Volume II Part 2 Know how book*. Asslar: Pfeiffer Vacuum GmbH, 2013. 140 p.
22. Sakthivel, G. Prediction of CI engine performance, emission and combustion characteristics using fish oil as a biodiesel at different injection timing using fuzzy logic. *Fuel*. 2016, vol. 183, pp. 214–229. Available from: doi: 10.1016/j.fuel.2016.06.063.
23. Shao, A. L., Cheng, Y., Zhou, Y., Li, M., Xi, T. F., Zheng, Y. F., Wei, S. C., Zhang, D. Y. Electrochemistry properties of multilayer TiN/Ti coatings on NiTi alloy for cardiac occluder application. *Surface and Coatings Technology*. 2013, vol. 228, pp. 257-261. Available from: doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.05.129.
24. Stekleins, A., Gerins, E., Kromanis, A. *Analysis of selection criteria for vacuum gauges and its accuracy* [online]. Tallin, 2016 [viewed 5 December 2017]. Available from: [http://www.bing.com/cr?IG=B9514ADC68BC459AAC68CD00781DC610&CID=07B7D90498366CBB1607D24B99306D08&rd=1&h=bLtWL\\_qGHD0N9VfJxKMiaTSAZSVIzQdNasEn4BMCP98&v=1&r=http%3a%2f%2ffinnomet.ttu.ee%2fdaaam%2fproceedings%2fDesign%2520and%2520Production%2fStekleins.pdf&p=DevEx,5064.1](http://www.bing.com/cr?IG=B9514ADC68BC459AAC68CD00781DC610&CID=07B7D90498366CBB1607D24B99306D08&rd=1&h=bLtWL_qGHD0N9VfJxKMiaTSAZSVIzQdNasEn4BMCP98&v=1&r=http%3a%2f%2ffinnomet.ttu.ee%2fdaaam%2fproceedings%2fDesign%2520and%2520Production%2fStekleins.pdf&p=DevEx,5064.1)

25. Stekleins, A., Gerins, E., Kromanis, A. Prediction of SiO<sub>2</sub> Nano Coating Properties Using Fuzzy Logic. *DAAAM Proceedings Proceedings of the 28th International DAAAM Symposium 2017*. 2017, pp.0654–0660. Available from: doi: 10.2507/28th.daaam.proceedings.092.
26. Stekleins, A., Gerins, E., Kromanis, A. Vacuum Gauge Performance Verification System. *Proceedings of the 27th International DAAAM Symposium 2016 DAAAM Proceedings*. 2016, pp. 0607–0614. Available from: doi: 10.2507/27th.daaam.proceedings.089.
27. Stekleins, A., Gerins, E., Kromanis, A. Vacuum Gauge Verification Methodology for Vacuum Coating Deposition Processes. *DAAAM Proceedings Proceedings of the 28th International DAAAM Symposium 2017*. 2017, pp. 0645–0653. Available from: doi: 10.2507/28th.daaam.proceedings.091.
28. Stoiber, M., Badisch, E., Lugmair, C., Mitterer, C. Low-friction TiN coatings deposited by PACVD. *Surface and Coatings Technology*. 2003, vol. 163-164, pp. 451–456. Available from: doi: 10.1016/s0257-8972(02)00642-4.
29. The Institute of Measurement and Control. *Guide to the Measurement of Pressure and Vacuum* [online]. London, 1998 [viewed 5 December 2017]. Available from: [http://www.bing.com/cr?IG=284B417840A84703B3DAFEF5F78F4574&CID=0E51EF1A806065EA1956E455816664FD&rd=1&h=uN2DeD3oOWspF\\_r9C9JB34jXQQqUAu370hOnTcPL25s&v=1&r=http%3a%2f%2fwww.npl.co.uk%2fupload%2fpdf%2fGuide\\_to\\_PV.pdf&p=DevEx,5068.1](http://www.bing.com/cr?IG=284B417840A84703B3DAFEF5F78F4574&CID=0E51EF1A806065EA1956E455816664FD&rd=1&h=uN2DeD3oOWspF_r9C9JB34jXQQqUAu370hOnTcPL25s&v=1&r=http%3a%2f%2fwww.npl.co.uk%2fupload%2fpdf%2fGuide_to_PV.pdf&p=DevEx,5068.1)
30. Tompkins, H.G. *The fundamentals of vacuum technology*. New York: Education Committee, American Vacuum Society, 1997. 199 p.
31. Ueda, E., Hirogata, Y., Hino, T., Yamashina, T. Lower limit of pressure measurement using a spinning rotor gauge. *Vacuum*. 1993, vol. 44, no. 5-7, pp. 587–589. Available from: doi: 10.1016/0042-207x(93)90102-g.
32. Vergöhl, M., Rademacher, D., Pflug, A. Progress on optical coatings deposited with dual rotatable magnetrons in a sputter up system. *Surface and Coatings Technology*. 2014, vol. 241, pp.38–44. Available from: doi: 10.1016/j.surfcoat.2013.11.033.
33. Vesel, A., Mozetič, M. Characteristics of a magnetron cold cathode gauge. *Vacuum*. 2004, vol. 73, no. 2, pp. 281–284. Available from: doi: 10.1016/j.vacuum.2003.12.008.
34. Vesel, A., Mozetic, M., Zumer, M., Nemanic, V., Zajec, B. Pressure/current characteristics of a magnetron cold cathode gauge. *Vacuum*. 2005, vol. 78, no. 1, pp. 13–17. Available from: doi: 10.1016/j.vacuum.2004.12.008.
35. Wang, X., Liu, C., Zhang, Z., Liu, S., Luo, X. A micro-machined Pirani gauge for vacuum measurement of ultra-small sized vacuum packaging. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2010, vol. 161, no. 1–2, pp. 108–113. Available from: doi: 10.1016/j.sna.2010.04.034.
36. Yoshida, H., Arai, K., Akimichi, H., Hirata, M. Stability tests of ionization gauges using two-stage flow-dividing system. *Vacuum*. 2009, vol. 84, no. 5, pp. 705–708. Available from: doi: 10.1016/j.vacuum.2009.09.011.
37. Zhou, Q., Wu, W., Liu, D., Li, K., Qiao, Q. Estimation of corrosion failure likelihood of oil and gas pipeline based on fuzzy logic approach. *Engineering Failure Analysis*. 2016, vol. 70, pp. 48–55. Available from: doi: 10.1016/j.engfailanal.2016.07.014.

38. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. Москва: Мир, 1976. 165 с.
39. Леоненков, А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. Санкт Петербург: БВХ-Петербург, 2005. 736 с.
40. Розанов, Л. Н. Вакуумная техника: Учеб. для вузов по спец. Вакуумная техника 2-е изд., перераб. и доп. Москва: ВВЦШ. шк. 1990. 320 с.
41. Agilent Technologies: TV-3KT Pumping System User Manual / Internets. – <http://www.agilent.com/cs/library/usermanuals/public/TV-3KT%20Pumping%20System%20User%20Manual.pdf>
42. Bureau International des Poids et Mesures: Evaluation of measurement data – An introduction to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents / Internets – <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>
43. FILMETRICS. Reflectance Calculator / Internets. – <http://www.filmetrics.com/reflectance-calculator>
44. INFICON: HPG400 ATM to High-Vacuum Gauge / Internets – <http://products.inficon.com/en-us/Product/Detail/HPG400?path=Products%2Fpfg-wide-range-vacuum-gauges>
45. INFICON: SKY CDG025D Capacitance Diaphragm Gauge / Internets – [http://products.inficon.com/en-us/Product/Detail/CDG025D-X3?path=Markets\\_Applications%2FMarkets](http://products.inficon.com/en-us/Product/Detail/CDG025D-X3?path=Markets_Applications%2FMarkets)
46. INFICON: BPG402-Sx ATM to Ultra-High Vacuum Gauge / Internets – <http://products.inficon.com/en-us/Product/Detail/BPG402-S?path=Products%2Fpfg-wide-range-vacuum-gauges>
47. Latvijas Universitāte: Laboratorijas darbi studentiem / Internets – [http://www.cfi.lu.lv/fileadmin/user\\_upload/lu\\_portal/projekti/cfi/Studentiem/laboratorijas\\_darbi/Vakuumpaarklaajumu\\_LD\\_2010.pdf](http://www.cfi.lu.lv/fileadmin/user_upload/lu_portal/projekti/cfi/Studentiem/laboratorijas_darbi/Vakuumpaarklaajumu_LD_2010.pdf)
48. LZA Terminoloģijas komisija: Akadēmiskā terminu datubāze AkadTerm / Internets – <http://termini.lza.lv/term.php?term=fazilo%C4%A3ika&list=&lang=LV>
49. Rīgas Tehniskā Universitāte: Laboratorijas darbu apraksts (I semestris) un mērījumu rezultātu matemātiskās apstrādes pamati / Internets – <http://www.bf.rtu.lv/documents/nvsd/materiali/fizika/Laboratorijas%20darbu%20apraksts%20nekl.pdf>
50. United Kingdom Accreditation Service: The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement JH 2012 / Internets – [https://www.ukas.com/download/publications/publications-relating-to-laboratory-accreditation/M3003\\_Ed3\\_final.pdf](https://www.ukas.com/download/publications/publications-relating-to-laboratory-accreditation/M3003_Ed3_final.pdf)

## **PIELIKUMI**

## Stjudenta koeficienta vērtības dažādām vērtības ticamības pakāpēm

Таблица 1. значения коэффициента Стьюдента (t)

f	P=0,90	P=0,95	P=0,98	P=0,99
1	6,31	12,7	31,8	63,6
2	2,92	4,30	6,97	9,93
3	2,35	3,18	4,54	5,84
4	2,13	2,78	3,75	4,60
5	2,02	2,57	3,37	4,03
6	1,94	2,45	3,14	3,71
7	1,90	2,36	3,00	3,50
8	1,86	2,31	2,90	3,36
9	1,83	2,26	2,82	3,25
10	1,81	2,23	2,76	3,17
11	1,80	2,20	2,72	3,11
12	1,78	2,18	2,68	3,05



Mērvienību pārveidošanas tabula

	Pa m <sup>3</sup> /s = W	mbar l/s	Torr l/s	atm cm <sup>3</sup> /s	lusec	sccm	slm	Mol/s
Pa m <sup>3</sup> /s	1	10	7.5	9.87	7.5 · 10 <sup>3</sup>	592	0.592	4.41 · 10 <sup>-4</sup>
mbar l/s	0.1	1	0.75	0.987	750	59.2	5.92 · 10 <sup>-2</sup>	4.41 · 10 <sup>-5</sup>
Torr l/s	0.133	1.33	1	1.32	1,000	78.9	7.89 · 10 <sup>-2</sup>	5.85 · 10 <sup>-5</sup>
atm cm <sup>3</sup> /s	0.101	1.01	0.76	1	760	59.8	5.98 · 10 <sup>-2</sup>	4.45 · 10 <sup>-5</sup>
lusec	1.33 · 10 <sup>-4</sup>	1.33 · 10 <sup>-3</sup>	10 · 3	1.32 · 10 <sup>-3</sup>	1	7.89 · 10 <sup>-2</sup>	7.89 · 10 <sup>-5</sup>	5.86 · 10 <sup>-8</sup>
sccm	1.69 · 10 <sup>-3</sup>	1.69 · 10 <sup>-2</sup>	1.27 · 10 <sup>-2</sup>	1.67 · 10 <sup>-2</sup>	12.7	1	10 · 3	7.45 · 10 <sup>-7</sup>
slm	1.69	16.9	12.7	16.7	1.27 · 10 <sup>4</sup>	1,000	1	7.45 · 10 <sup>-4</sup>
Mol/s	2.27 · 10 <sup>3</sup>	2.27 · 10 <sup>4</sup>	1.7 · 10 <sup>4</sup>	2.24 · 10 <sup>4</sup>	1.7 · 10 <sup>7</sup>	1.34 · 10 <sup>6</sup>	1.34 · 10 <sup>3</sup>	1