

# **PRAKTIKUMS**

## **Ķīmijas tehnoloģijas procesi un aparāti**

---

Hidromehāniskie procesi

2019

Jurijs Ozoliņš, Agnese Stunda-Zujeva, Armands Bušs

# **PRAKTIKUMS**

**Ķīmijas tehnoloģijas procesi un aparāti**

**Hidromehāniskie procesi**

RTU Izdevniecība  
Rīga 2019

**Jurijs Ozoliņš, Agnese Stunda-Zujeva, Armands Bušs. Praktikums. Ķīmijas tehnoloģijas procesi un aparāti. Hidromehāniskie procesi.** Rīga: RTU Izdevniecība, 2019. 104 lpp.

Praktikums paredzēts kā palīgs hidromehānisko ķīmijas tehnoloģijas procesu un aparātu izziņāšanā. Tajā ir ietverti metodiski norādījumi un septiņu laboratorijas darbu apraksti: šķidrums kustības režīms caurulē, šķidrums iztece, centrālās sūkņi, hidraulisko pretestību noteikšana cauruļvados, maisītājs, verdošais slānis un rāmju filtrspiede.

Redaktore	Zilgma Irbe
Tehniskā redaktore	Irēna Skārda
Dizains	Baiba Puriņa
Vāka dizains	Paula Lore

Izdevējs RTU Izdevniecība  
Kaļķu iela 1, Rīga, LV-1668  
Tālrunis: +371 67089123  
E-pasts: izdevnieciba@rtu.lv

<https://doi.org/10.7250/9789934222153> © Jurijs Ozoliņš, Agnese Stunda-Zujeva, Armands Bušs, 2019  
ISBN 978-9934-22-214-6 (print) © Rīgas Tehniskā universitāte, 2019  
978-9934-22-215-3 (pdf)

# Darba aprakstu saturs

Priekšvārds.....	6
<b>1. Metodiskie norādījumi.....</b>	<b>8</b>
1.1. Vispārīgie kontroljautājumi uzsākot darbu.....	8
1.2. Protokola noformēšana un tā saturs.....	8
1.3. Rezultātu matemātiskā apstrāde.....	11
Kļūdu cēloņi.....	11
Kļūdu veidi.....	13
Standartnovirze jeb vidējā kvadrātiskā kļūda.....	13
Kļūdu izteikšanas veidi.....	15
Rezultātu noapaļošana.....	15
<b>2. Šķidruma kustības režīms caurulē.....</b>	<b>16</b>
2.1. Teorētiskais pamatojums.....	16
Iekšējā berze un viskozitāte.....	16
Plūsmas raksturs un ātruma sadalījums caurules šķērsgriezumā....	16
Reinoldsa skaitlis.....	17
Hidrodinamiskais stabilizācijas apgabals.....	19
Plūsmas režīmu izmantošana praksē.....	20
2.2. Darba uzdevumi.....	20
2.3. Iekārtas apraksts un darba gaita.....	21
2.4. Kontroljautājumi.....	23
<b>3. Šķidruma iztece.....</b>	<b>24</b>
3.1. Teorētiskais pamatojums.....	24
Iztece pa caurumiem un uzgaļiem.....	24
Šķidruma iztece pie konstanta šķidruma līmeņa.....	27
Šķidruma iztece pie mainīga šķidruma līmeņa.....	27
3.2. Darba uzdevumi.....	28
3.3. Iekārtas apraksts.....	28
3.4. Darba gaita.....	29
Iztece pie konstanta šķidruma līmeņa.....	29
Iztece pie mainīga šķidruma līmeņa.....	29
Rezultātu pārbaude.....	29
3.5. Teorētiskais uzdevums.....	30
3.6. Kontroljautājumi.....	31
<b>4. Centrbēdzes sūknis.....</b>	<b>32</b>
4.1. Teorētiskais pamatojums.....	32
Spiediens un tā mērīšana.....	32
Sūkņi un to klasifikācija.....	33

Centrbēdzes sūknis .....	34
Sūkņus raksturojošie lielumi.....	35
Centrbēdzes sūkņa raksturliknes.....	39
Centrbēdzes sūkņa proporcionalitātes likums .....	40
4.2. Darba uzdevumi .....	41
4.3. Darba gaita.....	41
Mērījumu un aprēķinu tabulas piemērs .....	42
4.4. Kontroljautājumi.....	43
<b>5. Hidraulisko pretestību noteikšana cauruļvados .....</b>	<b>44</b>
5.1. Teorētiskais pamatojums .....	44
Hidrauliskās pretestības koeficients $\lambda$ .....	45
Vietējās pretestības koeficients $\zeta_{vp}$ .....	47
Likumi caurulē.....	48
Šķērsriezuma maiņa caurulē.....	50
Caurules sazarojums .....	51
Hidrauliskās pretestības koeficients cauruļvadu armatūras elementos .....	53
Ražības mērīšana ar mērdiafragmu un Venturi cauruli .....	54
5.2. Darba uzdevumi .....	55
5.3. Iekārtas apraksts .....	56
5.4. Darba gaita.....	56
Diferenciālā spiediena noteikšana .....	58
Absolūtā spiediena noteikšana.....	58
5.5. Kontroljautājumi.....	59
<b>6. Maisītājs.....</b>	<b>60</b>
6.1. Teorētiskais pamatojums .....	60
Mehānisko maisītāju veidi.....	60
Jaudas kritērijs.....	64
Faktori, kas ietekmē maisītāja jaudu .....	67
6.2. Darba uzdevumi .....	67
6.3. Iekārtas apraksts .....	69
Maisītāju veidi .....	70
6.4. Darba gaita.....	71
Plūsmas rakstura novērojumi un maisītāja jaudas noteikšana.....	71
Sāļu šķīdināšana, elektrovadītspējas noteikšana.....	73
6.5. Kontroljautājumi.....	74
<b>7. Verdošais slānis.....</b>	<b>75</b>
7.1. Teorētiskais pamatojums .....	75
Ķermeņa pārvietošanās šķidrumā (gāzē).....	75
Suspendētā slāņa hidrauliskā pretestība.....	77

Kritisko ātrumu aprēķināšana .....	79
7.2. Darba uzdevumi .....	80
Darba varianti .....	80
7.3. Iekārtas apraksts .....	81
Iekārtas shēma darbam gaisa vidē.....	82
Iekārtas shēma darbam ūdens vidē.....	83
7.4. Darba gaita.....	84
Drošības norādījumi.....	84
Spiediena zudumu noteikšana .....	84
Darba gaita eksperimentiem gaisa vidē .....	84
Darba gaita eksperimentiem ūdens vidē .....	85
7.5. Iekārtas tehniskā specifikācija .....	87
7.6. Kontroljautājumi.....	88
<b>8. Rāmju filtrspiede.....</b>	<b>89</b>
8.1. Teorētiskais pamatojums .....	89
8.2. Darba uzdevumi .....	92
Darba varianti .....	92
8.3. Iekārtas apraksts .....	93
Drošības norādījumi.....	95
8.4. Darba gaita.....	95
Darba uzsākšana.....	95
Darba gaita.....	97
Darba beigšana.....	98
8.5. Rezultātu apstrāde .....	98
8.6. Iekārtas tehniskā specifikācija .....	99
8.7. Kontroljautājumi.....	99
<b>Literatūra un informācijas avoti .....</b>	<b>100</b>
<b>1. pielikums. Ūdens un gaisa fizikālie parametri .....</b>	<b>101</b>
<b>2. pielikums. Maisītāju tipi .....</b>	<b>102</b>
<b>3. pielikums. Spiediena mērvienības .....</b>	<b>103</b>
<b>4. pielikums. Vārdnīca .....</b>	<b>104</b>

## Priekšvārds

Ķīmijas tehnoloģijas procesi un aparāti ir patstāvīga interdisciplināra inženierzinātne. Tajā iekļauti visi procesi, kuru rezultātā vielas maina savu stāvokli, atrašanās vietu, sastāvu vai īpašības. Šīs zinātnes svarīgākās pielietojuma jomas ir ķīmijas tehnoloģija, farmācija, pārtikas tehnoloģija, biotehnoloģija, vides inženierija, būvmateriālu ražošana u. c. Ķīmijas tehnoloģijas procesi un aparāti ir cieši saistīti ar aparātbūvi, tehnoloģisko procesu mehanizācijas, automatizācijas un vadības nozarēm. Līdz ar to galvenie ķīmijas tehnoloģijas procesu un aparātu zinātnes uzdevumi ir:

- dažādu procesu un aparātu darbības analīze un galveno likumsakarību noskaidrošana;
- aparātu un iekārtu konstrukciju aprēķinu principu un metožu apguve, izstrāde un attīstība;
- šo metožu pielietošana konkrētu tehnoloģisko procesu un iekārtu aprēķinos un projektēšanā.

Priekšmets „Ķīmijas tehnoloģijas procesi un aparāti” ir studiju programmas „Ķīmijas tehnoloģija” neatņemama sastāvdaļa gan bakalaura, gan maģistra studijās. Priekšmeta veiksmīga un efektīva apgūšana lielā mērā ir atkarīga no laboratorijas praktikuma satura un uzbūves. Laboratorija, kas aprīkota ar funkcionējošām pilotiekārtām un modeļiem, palīdz studentiem praktiski apgūt tehnoloģisko procesu un iekārtu uzbūvi un darbības principus, noteikt svarīgākos parametrus, kas ietekmē to efektivitāti. Tas dod iespēju pārbaudīt teorētiskās atziņas, pētīt, analizējot un modelējot tehnoloģiskos procesus, saistot tos ar procesu vadības elementiem.

Dotais laboratorijas darbu praktikums ir veltīts hidromehāniskajiem procesiem, kas ir svarīga ķīmijas tehnoloģijas procesu un aparātu sastāvdaļa. Laboratorijas praktikuma pamatā ir vācu firmas *GUNT* izstrādātās modeļ- un pilotiekārtas, to darbības apraksti. Praktikumā ietvertie laboratorijas darbi sniedz priekšstatu par plūsmas raksturu, hidrauliskajām pretestībām, šķidruma izteces un verdošā slāņa parādībām. Tās ir praktiski katra tehnoloģiskā procesa aprēķina pamatā. Atsevišķi darbi ir saistīti ar konkrētiem tehnoloģiskajiem procesiem — tādiem kā šķidru sistēmu maisīšana, pārvietošana ar centrālās sūkņu palīdzību un šķidru neviendabīgu sistēmu sadalīšana filtrējot. Praktikumā izklāstīti vispārīgie metodiskie norādījumi laboratorijas darbu veikšanai un iegūto rezultātu apstrādei. Katrs no darbiem satur teorētisko pamatojumu, iekārtas aprakstu un darbības principus, kā arī iegūto rezultātu apstrādes metodiku. Visi darbi satur arī kontroles jautājumus, kas ļauj sasaistīt

kursa teorētiskos jautājumus ar veicamajiem eksperimentālajiem pētījumiem. Svarīga vieta darbu aprakstos ir atvēlēta darba drošības jautājumiem, kas noteikti jāievēro, strādājot ar konkrētajām iekārtām.

*Atsevišķus darbus var sadalīt vairākās daļās, kas ļauj izvērtēt atsevišķu parametru ietekmi uz procesa gaitu, piemēram, darbus, kas veltīti hidrauliskajām pretestībām vai šķidru sistēmu maisīšanai.*



## 1. Metodiskie norādījumi

Šiet aprakstīti galvenie norādījumi laboratorijas darba protokola noformēšanai, saturam un sniegts neliels ieskats rezultātu matemātiskajā apstrādē. Studentu darba grupa ir viena komanda, tāpēc pārrunājiet darba gaitu grupas ietvaros, lai tā visiem ir skaidra. Ja ir iespējami vairāki darba varianti (lielākajā daļā darbu tā ir), tad savstarpēji vienojieties, kuri trīs darba varianti, jūsuprāt, būtu salīdzināšanas vērti. Šī izvēle jāspēj pamatot ar eksperimentu plānošanas zināšanām vai kādu teorētisko sakarību.

Ne visus darbus ir iespējams kļūdas gadījumā atkārtot uzreiz — ja iekārta ir uzsilusi vai process sācies, tad jāgaida līdz iekārta atdziest vai process apstājas. Tas var aizņemt pat vairākas stundas. Šaubu gadījumā par darba norisi labāk jautāt mācībspēkam vai laborantam nekā veikt apšaubāmus mērījumus.

### 1.1. Vispārējie kontroljautājumi uzsākot darbu

- Kādi darba uzdevumi ir jāasniedz? Kādu praktisku vērtību tie sniedz? Piemēram, jānosaka izteces koeficients. Izteces koeficients raksturo ..., tā vērtības ir ..., ieteicams iekārtas konstruējot izvēlēties atveres ar lielāku/mazāku koeficientu.
- Ko un kā darīsiet? Kas ir jāmēra, kā regulē mainīgos parametrus u. tml.?
- Kā zināt, ka ir sasniegts apmierinošs rezultāts (atbilstošs darba uzdevumam)? Piemēram, ja jāasniedz turbulenta plūsma — kas par to liecinās? Ja jāuzņem kāda divu parametru sakarība, piemēram, ūdens staba augstums un sūkņa radītais spiediens, tad vai, pieaugot spiedienam, augstumam ir jāpieaug vai jākrīt, vai sakarība ir lineāra vai likne utt.?

### 1.2. Protokola noformēšana un tā saturs

Protokolus var noformēt gan datorrakstā, gan salasāmā rokrakstā uz A4 lapām, kā arī daļēji datorrakstā, papildinot ar roku (piemēram, formulas vai grafikus). Iekārtas shēmai jābūt zīmētai ar roku. Lapu vēlams aprakstīt no abām pusēm. Katra studentu grupa aizstāv darbu kopīgi, iesniedzot tikai vienu protokolu, bet visiem grupas biedriem jāorientējas protokolā, darba laikā veiktajās darbībās un to pamatojumā.

Protokols sastāv no šādām daļām: titullapas, teorētiskā pamatojuma, mērījumu rezultātiem (tabulas un grafiki), rezultātu novērtējuma un secinājumiem.

Protokola titullapa ietver šādu informāciju:

- autoru vārdi un uzvārdi,
- datums (dd.mm.gggg.),
- laboratorijas darba numurs,
- laboratorijas darba nosaukums,
- darba uzdevumi un darba variants.

Teorētiskajā pamatojumā konspektīvi izklāsta teoriju; tas satur nepieciešamās aprēķinu formulas un iekārtu shēmas. Šīs daļas mērķis ir uzskatāma, ātra palīdzība darba izstrādē, nevis aizpildīta lapa mācībspēkam par prieku. Vēlams pirms shēmas zīmēšanas iepazīties ar reālo iekārtu un, ja tas ir nepieciešams, koriģēt shēmu atbilstoši reālajai. Ieteicams iekļauties vienā A4 lapaspusē.

Mērījuma rezultāti jāapkopo uzskatāmā tabulā, noteikti norādot mērījuma kļūdu, aritmētisko vidējo un standartnovirzi (skat. zemāk norādījumus — sadaļā 1.3. Rezultātu matemātiskā apstrāde). Visur obligāti ir jānorāda mērvienības. Mērījuma precizitāte var būt ar lielāku kļūdu nekā mērāparāta precizitāte. Mērījuma precizitātē jāiekļauj arī cilvēciskais faktors. Piemēram, ja hronometrs dod rezultātu līdz sekundes tūkstošdaļai, tas nenozīmē, ka konkrētais process ir nomērīts ar precizitāti līdz sekundes tūkstošdaļai, ja procesa palaišana/apstāšanās ir veikta manuāli.

Ja tas ir nepieciešams, darba izpildes gaitā mērījumus apraksta papildus, piemēram, vizuāli novērojamas izmaiņas procesā vai skaņas, kas raksturo iekārtas darbību. Tabulas sadaļas var atšķirties no šajā praktikumā ieteiktajām. Mērījuma rezultāti uzskatāmi jāatdala no aprēķinātajiem/pārveidotajiem rezultātiem.

Jāuzrāda pilnīgi visi tālākajos aprēķinos izmantotie mērījumi. Ja kādi mērījumi vai rezultāti netiks tālāk izmantoti, tas atbilstoši jānorāda. Jāpaskaidro arī, kādēļ rezultāti netiek tālāk izmantoti (rupjā kļūda, kaut kas nepareizi izdarīts u. tml.).

Aprēķinos jānorāda visas izmantotās formulas un katrai jāuzraksta vismaz viens aprēķinu piemērs. Visiem apzīmējumiem ir jābūt atšifrētiem. Aprēķinu rezultāti tiek norādīti kopā ar mērvienībām.

Grafiki ir ļoti svarīgi inženiera darbā, jo sniedz iespēju uzskatāmi attēlot dažādu lielumu savstarpējās sakarības. Grafiki nav ar lauztu līniju savienoti punkti. Grafika mērķis ir attēlot funkcijas veidu (taisne, līkne, sinusoīda utt.), kas raksturo kādu sakarību. Secinājumos vienmēr jāizvērtē grafika atbilstība

teorētiskajai funkcijai. Piemēram, ja ir zināms, ka lielums  $y$  ir kvadrātiski proporcionāls lielumam  $x$ , tad grafikam ir jābūt liknei, kas aprakstāma ar kvadrātisko funkciju.

Grafikā noteikti ir jāatliek katra punkta standartnovirze. Konstruējot grafiku, visiem punktiem kļūdas (standartnovirzes) robežās vēlams iekļauties funkcijā, vienādi daudz punktiem būtu jābūt virs un zem līnijas. Punkti, kas divkārtas kļūdas robežās nepieskaras funkcijai, ir uzskatāmi par rupjo kļūdu, un ir jāizskaidro kļūdas cēlonis. Tā kā grafiki ir pietiekami sarežģīti, tad tiek pieļauts, ka izdruka sastāv tikai no punktveida grafika, bet nepieciešamā funkcija (piemēram, ir vairāki grafika apgabali, ko katru raksturo cita funkcija, un kritiskie punkti) tiek konstruēta ar zīmuli un lineālu vai lekālu.

Grafiki ir jānumurē un jānodod tiem nosaukumi. Koordinātu asīm jānorāda skalas vērtības un mērvienības. Uz asīm norādīto vērtību zīmīgo ciparu skaitam jāsakrīt ar atbilstošā lieluma precizitāti. Ieteicamais grafikos esošo likņu izmērs un arī asu mērogi ir jāizvēlas atbilstoši parādāmajam faktam.

Lai vieglāk noteiktu darba variantu ietekmi uz funkciju, vēlams vienas funkcijas grafikus apkopot vienā attēlā. Ja salīdzināmās funkcijas atšķiras, atcerieties izmantot otrās ass iespēju (programmā *MS Excel* — uzklikšķinot uz funkcijas, grafikā aktivizējiet „*secondary axis*” rīku).

Rezultātu novērtējums un secinājumi ietver visas darba norises analīzi un atbildes uz darba uzdevumos uzdotajiem jautājumiem. Rezultātiem jābūt novērtētiem — jānorāda rezultātu precizitāte (kļūda) un kļūdas ietvaros jānovērtē to sakrītība ar teoriju. Nesakrītības gadījumā jābūt izskaidrotiem iespējamajiem kļūdu cēloņiem. Jāanalizē, kuras kļūdas vairāk iespaido rezultātu, kuras ir ar mazu nozīmi. Ja ir izmantota papildus literatūra (arī interneta avoti) rezultātu skaidrošanai, tad šie avoti noteikti jānorāda. Atsaucoties uz grafikiem vai tabulām, norāda to numuru.

Jāatceras, ka inženierijā parasti nav tikai viena vienīga iespējamā risinājuma; bieži ir vairāki risinājumi, katrs labāks pēc kāda parametra. Šādā gadījumā ir jāizskaidro, kurš no risinājumiem būtu piemērotākais un kādos apstākļos. Secinājumos arī jāietver ieteikumi procesa optimizācijai (lielāka ražība, lietderības koeficients u. tml.).

Zem secinājumiem katrs grupas dalībnieks ar parakstu apliecina, ka ir iepazinies ar protokola saturu un ir pārliecināts, ka secinājumi ir pārdomāti, loģiski, nesatur rupjas kļūdas un ir uz vispārējām likumsakarībām balstīti, kā arī ir oriģināli (nesatur plaģiātu no citiem darbiem).

Ja darbs neatbilst šeit minētajiem kritērijiem, tas netiek pieņemts izskatīšanai līdz trūkumi ir novērsti.

### 1.3. Rezultātu matemātiskā apstrāde

Rezultātu matemātiskajai apstrādei ir diezgan plaša teorētiskā bāze atkarībā no datu kopu veida, kas ir jāapstrādā, un no datu iegūšanas veida. Šajā aprakstā dots ļoti īss ieskats pamatlietu atgādināšanai, jo gan vidusskolas fizikas kursā, gan universitātes fizikas kursā šie jautājumi jau ir aplūkoti. Padziļinātai tēmas izpratnei ir paredzēts kurss „Eksperimentu plānošana un analīze”. Laboratorijas darbu izstrādē, zinātniskajā pētniecībā un arī inženiera darbā mērījumu un aprēķinu precizitātes novērtējums ir ļoti svarīga datu interpretācijas daļa.

Turklāt jāatceras, ka jebkuras mērierīces cena tiešā veidā korelē ar tās precizitāti, tāpat arī reaģentu lielāka tīrība (piemēram, 99 % vai 99,9 %) ievērojami sadārdzina to cenu. Attiecīgi arī mainās iegūto datu kvalitāte atkarībā no izmantoto mērinstrumentu precizitātes, vielu un iekārtu kvalitātes. Nekorekti norādīta precizitāte maldina pārējos datu lietotājus. Tāpēc jau studiju procesā ir jāņem vērā, ka kļūdas jeb datu precizitātes norādīšana ir neatņemama datu apstrādes daļa. Nav pieļaujams, ka matemātisko darbību rezultātā iegūtie dati ir ar mazāku kļūdu nekā mērījumā iegūtie. Īpaši tas jāņem vērā lietojot datorprogrammas, piemēram, *MS Excel*, kas pēc noklusējuma nedalāmu skaitļu dalījumā uzrāda tik ciparus, cik pieļauj kolonnas platums.

Laboratorijas darba rezultāts var būt šādi datu tipi:

- atsevišķs tiešais mērījums (nolasījums no mērierīces);
- vairāku tiešo mērījumu vidējais aritmētiskais rezultāts;
- aprēķināta funkcija, kas ietver vairākus tiešos mērījumus;
- funkcijas vidējais aritmētiskais rezultāts.

### Kļūdu cēloņi

Tiešo mērījumu kļūdu avoti var būt mērinstruments, novērotājs, mērāmais objekts un apkārtējā vide.

**Mērinstrumenta kļūda.** Mērīšanai lieto mērierīces, kas tieši vai ar starpniekiem salīdzinātas ar mērvienību etaloniem, kuri glabājas speciālās valsts meteoroloģiskās iestādēs. Digitālo mērinstrumentu precizitāte ir atzīmēta to pasē. Mērinstrumentiem ar skalu, atkarībā no skalas iedaļu izmēra, precizitāte var būt skalas mazākā iedaļa vai puse no tās. Parasti var pieņemt, ka kvalitatīvu digitālo mērinstrumentu sīkāka iedaļa atbilst to precizitātei, ja nav norādīts savādāk. Dažu mērinstrumentu gadījumā ir jāievērs uzmanība tam, ka mērījuma precizitāte dažādos skalas apgabalos var atšķirties.

Ja mērinstrumenta viena vienība ir neprecīzi nokalibrēta, tad kļūda mērījuma laikā ar uzkrāties, piemēram, pulkstenis, kas steidzas, vai kilometrāža, ko rāda spidometrs, kas kalibrēts neatbilstošam riteņu diametram.

**Novērotāja kļūda** mūsdienu mērierīcēs sastopama aizvien retāk. Senāk mērierīces bieži vajadzēja nonullēt, darbu sākot, turēt precīzi vertikāli u. tml. Ķīmijā visbiežāk sastopamais subjektīvais mērījums ir pH noteikšana izmantojot lakmusa papīru — salīdzināt mērījuma un skalas krāsu sakritību.

**Mērāmā objekta kļūda** inženierijā ir sastopama ļoti bieži. It īpaši, ja nav pieredzes vai atbilstošas metodikas, tad mērāmā objekta izvēle vai nepārdomāts mērierīces sensora novietojums var dot nepareizus rezultātus. Piemēram, nosakot vielas blīvumu, var gadīties objekts ar tukšu vidu. Ar infrasarkanu termometru mērot temperatūru objektam, kas atrodas nestacionāros apstākļos (tikko pārvietots no siltākas vai aukstākas vietas) tiks noteikta temperatūra, kas atrodas kaut kur pa vidu starp iepriekšējās un esošās vides temperatūru. Lamināra plūsma caurules centrā vienmēr būs ievērojami ātrāka nekā nedaudz novirzoties no centra, tātad arī plūsmas citi raksturlielumi var nebūt vienādi caurules šķērsriezuma profilā.

**Apkārtējās vides radītā kļūda.** Ja mērāmo lielumu vai mērierīces precizitāti ietekmē dažādi apkārtējās vides faktori, tie ir jāņem vērā, jānorāda vai jānovērš, veicot mērījumu. Piemēram, svaru rādījumi, ja svārstās svaru galds; šķidrums blīvums un viskozitāte vienmēr jānorāda kopā ar tā temperatūru.

Kļūdu avoti aprēķinātai funkcijai, kas ietver vairākus tiešos mērījumus (šeit izšķirami divi gadījumi):

- 1) ja formula ir precīza sakarība starp mērāmajiem lielumiem (piemēram, ražības noteikšana, zinot iztecējušo tilpumu laikā), tad papildus kļūda var rasties tikai kļūdoties aprēķinos;
- 2) ja formula ir aptuvena un apraksta, piemēram, ideālu, nevis reālu sistēmu vai balstās uz kādu citu pieņēmumu. Piemēram, pieņem, ka turbulentai plūsmai vidējais plūsmas ātrums ir 0,8 no maksimālā ātruma.

Spēja samazināt kļūdas, noteikt to rašanās avotus un analizēt to cēloņus ir viens no būtiskiem eksperimentatora kvalifikācijas rādītājiem ikvienā nozarē — gan eksakto, gan humanitāro un sociālo zinātņu nozarēs.

## Kļūdu veidi

Izšķir gadījuma, sistemātiskās un rupjās kļūdas.

**Gadījuma kļūdas** jeb nejaušās kļūdas atbilst dabiskai nolasījumu izkliedei — atkārtojot vairākas reizes tiešos mērījumus, rezultāti parasti svārstās nelielā intervālā. Fizikā, ļoti precīzos mērījumos vai mērījumos ar lielu rezultātu izkliedi minimālais mērījumu skaits ir 5. Praksē parasti mērījumus veic trīs atkārtojumos un, ja iegūtie rezultāti ir ar pielietojumam pietiekamu precizitāti, tad papildus mērījumus neveic, jo katrs mērījums prasa resursus. Patieso lielumu vislabāk raksturo vidējais aritmētiskais rezultāts  $\bar{x}$ :

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n},$$

kur  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – atsevišķie mērījumi;

$n$  – mērījumu skaits.

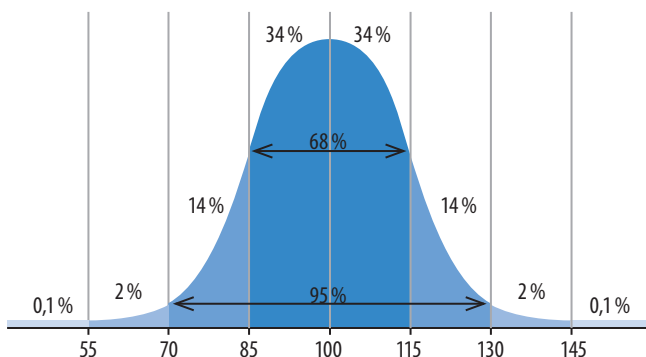
Ja tiešo mērījumu svārstībām ir gadījuma raksturs, tad var izrēķināt vidējā aritmētiskā rezultāta kļūdu (precizitāti), kas ir mazāka nekā katra atsevišķā mērījuma kļūda.

**Sistemātiska kļūda** visus mērījumus ietekmē vienā virzienā, tādēļ to nevar samazināt, mērījumus atkārtojot vienādos apstākļos. Sistemātisko kļūdu cēloņi var būt visi iepriekš minētie. Attiecīgi mērījumu precizitāti var uzlabot, mainot mērīšanas metodi, novērotāju (mērītāju), izmantojot precīzāku mēraparātu vai uzlabojot paraugu atlasī. Jo sarežģītāks mērījums vai dati neatbilst gaidītajam (tāpēc jābūt vismaz hipotēzei par iegūstamo lielumu), jo vairāk jāpārdomā metodikas ietekme uz mērīšanas rezultātu.

**Rupja kļūda** parasti rodas pārskatīšanās vai pierakstīšanas kļūmes rezultātā. Ja nolasījumu rindā viens vai vairāki rezultāti krasi atšķiras (divu vidējo kvadrātisko kļūdu attālumā no vidējā aritmētiskā rezultāta), tos var atņemt uzreiz, jo ar 95 % ticamības varbūtību visi rezultāti atrodas divu vidējo kvadrātisko kļūdu attālumā no vidējā aritmētiskā rezultāta.

## Standartnovirze jeb vidējā kvadrātiskā kļūda

Mērījumu rezultāti parasti atbilst Gausa sadalījumam vai normālam sadalījumam. Ir pierādīts, ka normālsadalījumā aptuveni 68 % visu elementu atrodas vienas standartnovirzes  $s$  attālumā no aritmētiskā vidējā un apmēram 95 % visu elementu atrodas divu standartnoviržu  $2s$  attālumā no aritmētiskā vidējā, bet trīs standartnoviržu  $3s$  attālumā atrodas 99,7 % visu elementu, skat. 1.1. att.



1.1. att. Gausa sadalījums. Šādam rezultātu sadalījumam parasti atbilst mērījumu izkliede. Sadalījuma centrā — aritmētiskais vidējais (piemērā vērtība 100), kam simetriski apkārt izvietojas pārējie mērījumi. Avots: [http://www.dzm.lu.lv/mat/IT/M\\_11/default.aspx@tabid=17&id=270.html](http://www.dzm.lu.lv/mat/IT/M_11/default.aspx@tabid=17&id=270.html)

Standartnovirzi jeb vidējo kvadrātisko kļūdu  $s$  nosaka pēc formulas:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(\bar{x} - x_1)^2}{n - 1}}$$

Programmā *MS Excel* standartnovirzi aprēķina ar formulu *STDEV*.

Palielinot mērījumu skaitu,  $s$  tuvojas konstantam lielumam  $\sigma$ , kas ir  $s$  robežlielums:

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} s,$$

tomēr šo lielumu praksē parasti neizmanto.

Ja jānosaka standartnovirze funkcijai, kas sastāv no vairākiem tiešajiem mērījumiem, tad standartnovirzi  $s_y$  aprēķina, izmantojot katra funkcijas parametra  $x, z$  utt. parciālkļūdas  $s_x, s_z$  utt:

$$s_y = \sqrt{s_x^2 + s_z^2 + \dots}$$

Ja visi mērījumi izdarīti tikai vienu reizi un tiem ir zināmas maksimālās kļūdas (mērinstrumentu vai mērījuma kļūdas), tad par parciāļajām kļūdām uzskata šīs maksimālās kļūdas.

Ja parametru skaits nepārsniedz 5 un viena kļūda ir vairākas reizes lielāka par visām pārējām, tad šīs mazākās kļūdas var neņemt vērā un kopējo kļūdu nerēķināt. Parciālo kļūdu salīdzināšana arī norāda, kurš ir mērījums ienes vislielāko kļūdu, un attiecīgi, ja nepieciešams uzlabot eksperimenta rezultātu, tad vispirms jāsamazina dominējošā kļūda. Savukārt nav vērts censties uzlabot precizitāti parametriem, kas dod salīdzinoši mazu kļūdu.

## Kļūdu izteikšanas veidi

Ja kļūda izteikta tādās pašās mērvienībās kā mērāmais lielums, tad to sauc par absolūto kļūdu. Piemēram, ja mērāmais lielums  $x$  ir izmērīts ar precizitāti  $\pm \Delta x$ , tad rezultātu pieraksta  $x \pm \Delta x$ , kur  $\pm \Delta x$  ir absolūtā kļūda.

Ja kļūdu izsaka kā daļu no mērāmā lieluma, tad tā ir relatīvā kļūda. Relatīvo kļūdu parasti izsaka procentos:  $(\Delta x/x) \cdot 100\%$ . Tā kā saskaitīt un atņemt drīkst tikai lielumus ar vienādām dimensijām, tad  $\pm$  zīmi šajā gadījumā rakstīt nedrīkst.

Absolūtā kļūda ļauj labāk salīdzināt datu kopas savā starpā, piemēram, ja dažādu kristalizācijas procesu rezultātā iegūst pulverus ar vidējo daļiņu izmēru  $5 \mu\text{m} \pm 0,7 \mu\text{m}$ ,  $6 \mu\text{m} \pm 0,8 \mu\text{m}$  un  $7 \mu\text{m} \pm 0,8 \mu\text{m}$ , tad laboratorijas darbos var pieņemt, ka pirmais un trešais paraugs savstarpēji atšķiras (jāskaita klāt kļūdas intervāls), bet otrais paraugs kļūdas robežās statistiski zīmīgi neatšķiras ne no pirmā, ne otrā parauga, jo kļūdas robežās intervāli pārklājas. Zinātniskajos eksperimentos, lai noteiktu datu kopu zīmīgu atšķirību, izmanto  $t$ -testu.

Relatīvā kļūda labāk raksturo mērījuma precizitāti. Ja  $x = 1 \text{ cm}$  un  $\Delta x = 1 \text{ mm}$ , tad relatīvā kļūda ir  $10\%$ , bet, ja  $x = 2 \text{ m}$  un  $\Delta x = 1 \text{ mm}$ , tad relatīvā kļūda ir tikai  $0,2\%$ , lai gan iespējams, ka abi mērījumi veikti ar vienu un to pašu mērlentu.

## Rezultātu noapaļošana

Kļūdas kļūda parasti nav mazāka par  $10\%$ , tādēļ nav nozīmes kļūdas aprēķināt un pierakstīt ar daudzām zīmēm, bet tās ir jānoapaļo. Viens no paņēmieniem ir kļūdu noapaļot, izmainot tās vērtību mazāk par  $10\%$ , piemēram, ja kļūda ir  $\pm 0,0883$ , tad to noapaļo uz  $\pm 0,09$ . Ja, kļūdu noapaļojot līdz vienam zīmīgajam ciparam, tas neizdodas  $10\%$  ietvaros, tad to noapaļo uz augšu; kļūda tādejādi palielinās, bet palielinās arī rezultātu drošība jeb ticamība, piemēram,  $\pm 0,145$  noapaļo uz  $\pm 0,2$ , nevis uz  $\pm 0,1$ .

Noapaļotā kļūda arī nosaka rezultāta noapaļojumu. Ja rezultātu izmantos tālākiem aprēķiniem, tad noapaļošanu veic tikai aprēķinātajam lielumam. Rezultāti jānoapaļo tā, lai noapaļotā kļūda ietekmētu tikai tā pēdējo ciparu labajā pusē. Piemēram,  $16,0588 \pm 0,09$  jānoapaļo uz  $16,06 \pm 0,09$  vai  $10\,341 \pm 400$  jānoapaļo uz  $10\,300 \pm 400$ . Ja pēc noapaļojuma pēdējais cipars aiz komata ir nulle, tas noteikti ir jāraksta, jo tas ir zīmīgais un ticamais cipars, piemēram,  $12,008 \pm 0,1$  jānoapaļo uz  $12,0 \pm 0,1$ .



## 2. Šķidruma kustības režīms caurulē

### 2.1. Teorētiskais pamatojums

2.

#### Iekšējā berze un viskozitāte

Plūstot reāliem šķidrumiem un gāzēm, rodas berze. Tā rodas starp atsevišķiem slāņiem, kas pārvietojas ar dažādu ātrumu attiecībā viens pret otru, un to sauc par **iekšējo berzi**. Iekšējā berze izpaužas kā vides pretestības spēks kustībai, un to raksturo šķidruma vai gāzes viskozitāte. Berzi starp šķidruma plūsmu un to ierobežojošo virsmu (piemēram, caurules vai reaktora sienu) sauc par **ārējo berzi**.

Šķidruma iekšējo berzi jeb viskozitāti pirmais pētīja Izaks Ņūtons. Saskaņā ar Ņūtona izvirzīto teoriju berzes spēks  $P$ , kas rodas, pārvietojoties vienam šķidruma slānim pret otru, ir tieši proporcionāls ātruma gradientam  $dw/dn$  un saskarē esošajai slāņa virsmai  $S$ :

$$P = \mu S \frac{dw}{dn}.$$

Šajā vienādojumā  $\mu$  ir proporcionalitātes koeficients, kas atkarīgs no šķidruma īpašībām, temperatūras un spiediena. To sauc par dinamiskās viskozitātes koeficientu vai vienkārši **dinamisko viskozitāti**. Dinamiskās viskozitātes mērvienība ir  $\text{Pa} \cdot \text{s}$  (paskālsekunde).  $1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  ir tādas vides dinamiskā viskozitāte, starp kuras  $1 \text{ m}^2$  lielu laukumu slāņiem, kas atrodas  $1 \text{ m}$  attālumā viens no otra un savstarpēji kustas ar relatīvo ātrumu  $1 \text{ m/s}$ , vides pretestības pārvarēšanai ir nepieciešams  $1 \text{ N}$  liels spēks.

Bieži lieto jēdzienu **kinemātiskā viskozitāte** —  $\nu$ . Kinemātisko viskozitāti  $\nu$  iegūst, dalot dinamisko viskozitāti  $\mu$  ar vides blīvumu  $\rho$ :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}.$$

#### Plūsmas raksturs un ātruma sadalījums caurules šķērsgriezumā

Aprēķinot tehnoloģiskos procesus, kas saistīti ar šķidrumu vai gāzu kustību, nepieciešams noteikt un ņemt vērā plūsmas režīmu.

Šķidrumu un gāzu kustība var noritēt divos plūsmas režīmos — **laminārā** (no latīņu valodas „kārtains”), kad šķidruma slāņi virzās paralēli un nesajaucas, vai **turbulentā** (no latīņu valodas „virpuļojošs, bangojošs”) jeb mutuļojošā (šķidruma slāņi kustas, intensīvi sajaucoties). Plūsmas pāreja no laminārā uz

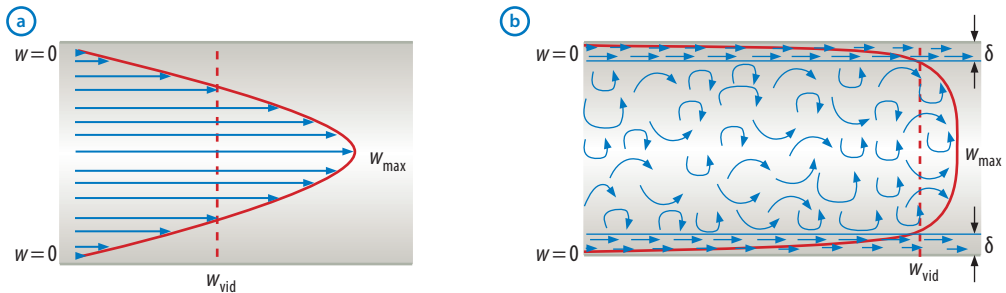
turbulento režīmu notiek pakāpeniski — sākumā slāņiem viļņojoties, tad aizvien intensīvāk sajaucoties.

Ārējās berzes dēļ pie caurules sienām veidojas hidrodinamiskais robežslānis, un ātrums tiešā caurules sieniņas tuvumā ir vienāds ar nulli. Maksimālais šķidruma plūsmas ātrums ir caurules centrā (skat. 2.1. att.). Ātruma sadalījumu caurules šķērsgriezumā raksturo rotācijas paraboloida forma. **Vidējais plūsmas ātrums**  $w_{\text{vid}}$  [m/s] **laminārai plūsmai** ir puse no maksimālā ātruma:

$$w_{\text{vid}} = 0,5w_{\text{max}}$$

Turbulentas plūsmas gadījumā ātruma sadalījums caurulē ir vienmērīgāks, tomēr arī šajā gadījumā pie pašas sieniņas  $w = 0$ . Hidrauliskā robežslāņa biezums  $\delta$  ir atkarīgs no šķidruma īpašībām un plūsmas ātruma. **Vidējais plūsmas ātrums turbulentai plūsmai** ir:

$$w_{\text{vid}} = 0,8\dots 0,9w_{\text{max}}$$



2.1. att. Ātruma sadalījums laminārā (a) un turbulenta (b) plūsmā.

Jāņem vērā, ka šāds ātruma sadalījums un plūsmas raksturojums attiecas uz **stacionāru plūsmu** — tādu plūsmu, kuras ātrums laikā nemainās. **Nestacionāra plūsma** jeb laikā mainīgs ātrums parasti ir procesa sākumā un beigās (palaižot un apturot plūsmu iekārtā vai caurulē).

## Reinoldsa skaitlis

Plūsmas režīmus un to atkarību no šķidruma īpašībām un plūsmas ātruma pirmais pētīja un aprakstīja angļu fiziķis Osborns Reinoldss 1883. gadā. Šķidruma (gāzes) plūsmas kustības režīms ir atkarīgs no plūsmas ģeometriskajiem izmēriem (cauruļvada diametra), vidējā plūsmas ātruma, plūstošās vides blīvuma un viskozitātes. Minēto lielumu saistību ar plūsmas režīmu raksturo

bezdimensionāls Reinoldsa kritērijs jeb Reinoldsa skaitlis —  $Re$ :

$$Re = \frac{wd\rho}{\mu} = \frac{dw}{\nu},$$

kur  $w$  – plūsmas vidējais ātrums, m/s;

$d$  – cauruļvada diametrs, m;

$\rho$  – šķidruma blīvums, kg/m<sup>3</sup>;

$\mu$  – šķidruma dinamiskā viskozitāte, Pa·s;

$\nu$  – šķidruma kinemātiskā viskozitāte, m<sup>2</sup>/s.

Reinoldsa skaitlis ir bezdimensionāls lielums. Tas parāda inerces spēka, ko raksturo plūsmas ātrums un ģeometrija, un iekšējās berzes spēka, ko raksturo plūsmas viskozitāte, attiecību. Turbulentā plūsmā dominē inerces spēki, laminārā plūsmā — iekšējās berzes spēki.

Eksperimentāli ir noskaidrots, ka eksistē **kritiskā Reinoldsa skaitļa vērtība**  $Re_{kr}$  vai, precīzāk, vērtību intervāls, kas raksturo lamināras plūsmas pakāpenisku pāreju turbulentā plūsmā.  $Re_{kr}$  ir atkarīgs no iekārtas vai cauruļu ģeometrijas. Taisnās, apaļās, pietiekami garās caurulēs stacionāras plūsmas gadījumā pieņem, ka  $Re_{kr}$  skaitlis ir 2300. Ja  $Re < 2300$ , tad plūsma parasti ir lamināra. Pilnīgi turbulenta plūsma ir pie  $Re > 10\,000$ , tomēr praktiski turbulenta tā ir jau pie  $Re > 4000$ . Robežās no 2300 līdz 4000 ir vērojama lamināras plūsmas pakāpeniska sajaukšanās un maisīšanās intensitātes palielināšanās. Dažādos hidraulisko pretestību gadījumos (likumos, vārstos u. c.) kritiskais Reinoldsa skaitlis var būt pat vairākas reizes zemāks. Noteiktos apstākļos lamināra plūsma var pastāvēt arī pie lielākas Reinoldsa skaitļa vērtības.

Ja plūsma neieņem apaļa cauruļvada šķērs griezumu, bet tai ir cita profila šķērs griezums (taisnstūra, gredzena veida, trīsstūra u. c.), tad Reinoldsa kritērija izteiksmē cauruļvada diametra vietā lieto **hidraulisko rādiusu**  $r_h$  vai **ekvivalento diametru**  $d_{ekv}$ . Hidrauliskais rādiuss  $r_h$  [m] ir plūsmas šķērs griezuma laukuma attiecība pret saslavinātā perimetra garumu:

$$r_h = \frac{S}{P},$$

kur  $S$  – plūsmas šķērs griezuma laukums, m<sup>2</sup>;

$P$  – saslavinātais perimetrs, m.

Ekvivalentais diametrs:

$$d_{ekv} = 4r_h = 4 \frac{S}{P}.$$

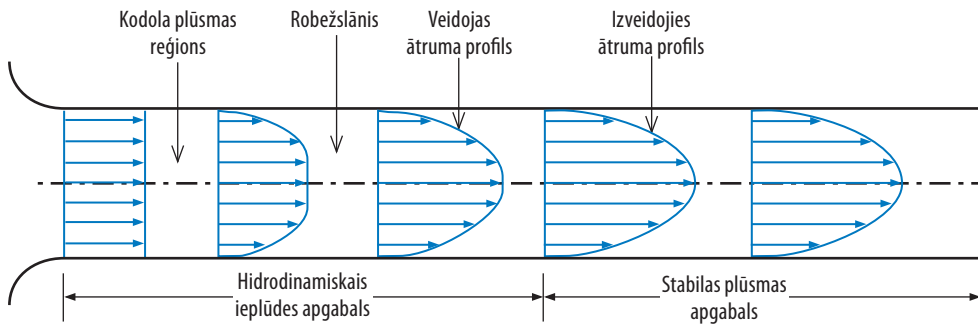
No tā izriet, ka Reinoldsa kritērijs neapaļām caurulēm ir:

$$Re = \frac{wd_{\text{ekv}}\rho}{\mu} = \frac{d_{\text{ekv}}w}{\nu}$$

## Hidrodinamiskais stabilizācijas apgabals

Aprakstītās ātruma sadalījuma likumsakarības (skat. 2.1. att.) lamināras un turbulentas plūsmas gadījumā ir spēkā, ja plūsma ir hidrodinamiski stabila. Stabilizācija ir novērojama ne uzreiz, bet zināmā attālumā no ieejas caurulē. Pie ieplūdes caurulē ir novērojams tā saucamais hidrodinamiskais robežslānis, kura biezums pakāpeniski palielinās. Plūsmas hidrodinamiskā stabilizācija parādīta 2.2. att. Hidrodinamiskie robežslāņi noteiktā attālumā no caurules sākuma saplūst, un izveidojas hidrodinamiski stabila plūsma. Šo apgabalu, kurā plūsmas profils pilnībā izveidojas un normalizējas, sauc par **hidrodinamiskās stabilizācijas apgabalu**. Tā izveidošanās parādīta 2.2. att.

Par **hidrodinamisko stabilizācijas apgabalu** sauc arī apgabalu, kurā kādu šķēršļu vai citu iemeslu dēļ plūsmā radītā turbulence dzēšas un izveidojas pilnībā lamināra plūsma.



2.2. att. Plūsmas ātruma gradienta veidošanās, šķidrumam no tvertnes ieplūstot caurulē.

Hidrodinamiskās stabilizācijas posma garumu  $L_{\text{hd}}$  [m] laminārai plūsmai var noteikt pēc formulas:

$$L_{\text{hd}} = 0,0575Re \cdot d,$$

kur  $d$  – caurules diametrs, m.

Turbulentai plūsmai stabilizācijas posma garumu nosaka pēc formulas:

$$L_{\text{hd}} \approx 15d.$$

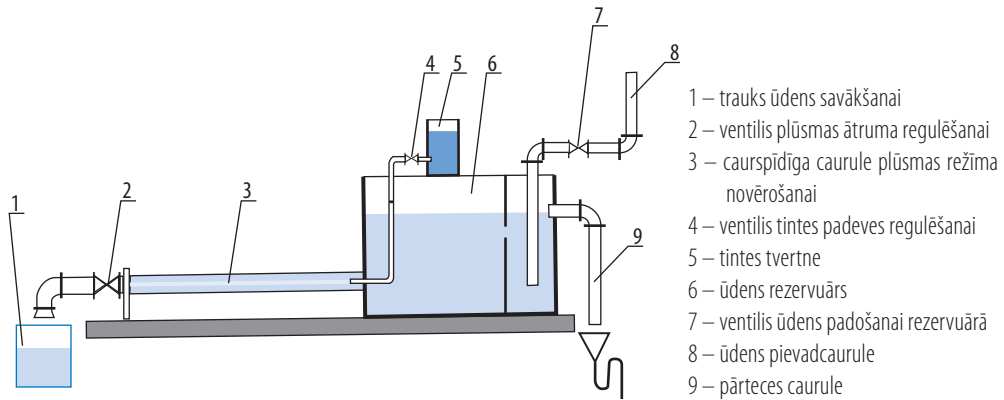
## Plūsmas režīmu izmantošana praksē

Turbulenta plūsma tiek plaši izmantota ražošanā. Piemēram, turbulenta plūsmas cauruļu veida reaktoros notiek slāpekļa dioksīda, metāna un ozona reakcijas ar hloru, kā arī citas gāzu un šķidrums reakcijas, jo turbulences nozīmē teicamu reaģentu sajaukšanos, tuklāt bez papildus maisītāju lietošanas. Turbulence caurulēs nodrošina suspensiju vai nestabilu emulsiju nenoslāņošanu, kas ir svarīgi gan rūpnīcas ietvaros, gan pilsētas kanalizācijas tīklā. Lai nodrošinātu siltummaiņu augstāku efektivitāti, siltumnesējam jāplūst turbulentā režīmā, lai pie sienas pievadītu aizvien jaunu karstās vielas slāni un atdzisusi viela aizplūstu prom no sienas. Kā zināms, siltumpārnese konvekcijas (sajaukšanās) ceļā ir efektīvāka nekā siltuma vadīšana (t. i. caur daļiņu sadursmēm). Lamināru plūsmu praksē izmanto reti.

### 2.2. Darba uzdevumi

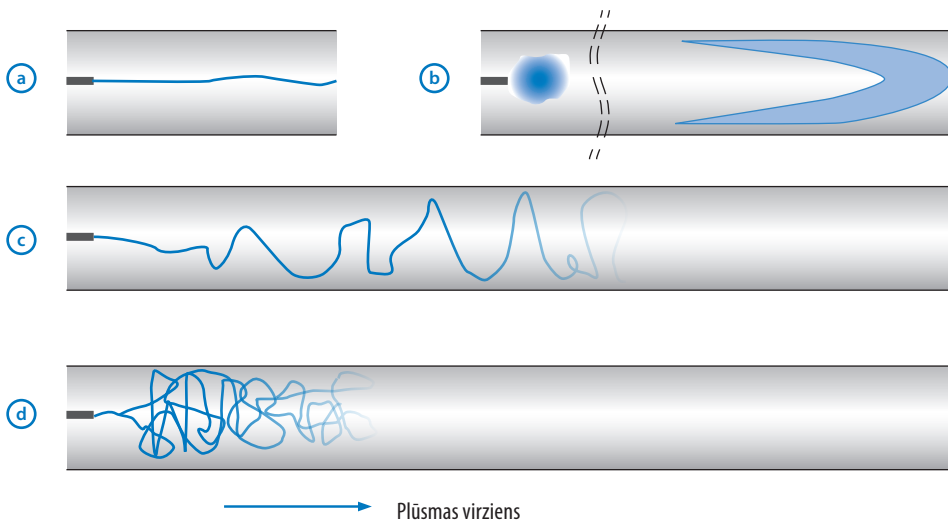
1. Eksperimentāli noteikt:
  - a) maksimālo ražību laminārai plūsmai (aiz hidrodinamiskā stabilizācijas apgabala slāņi nesajaucas);
  - b) minimālo ražību turbulentai plūsmai (slāņi sajaucas visā caurules garumā).
2. Eksperimentāli noteikt hidrodinamiskās stabilizācijas posma garumu a) gadījumam.
3. Aprēķināt kritisko plūsmas ātrumu un Reinoldsa skaitli pārejas režīmam dotajai iekārtai.
4. Spriest par  $Re_{kr}$  vērtībām dotajai iekārtai, salīdzinot ar teoriju. Raksturot, kādi faktori nosaka turbulences iestāšanos pie lielāka vai mazāka Reinoldsa skaitļa nekā teorētiskais  $Re_{kr}$ .

## 2.3. Iekārtas apraksts un darba gaita



2.3. att. Iekārtas šķidruma izteces pētīšanai shēma.

Rezervuārā pa cauruli (8) pievada ūdeni, regulējot plūsmu ar ventili (7). Konstanta hidrauliskā augstuma nodrošināšanai rezervuāram pievienota pārteces caurule (9). Šķidruma kustības režīmu novēro caurspīdīgajā caurulē (3), plūsmas ātrumu regulējot ar ventili (2). Plūsmas režīma vizuālai novērošanai pa kapilāru no rezervuāra (5) ievada iekrāsotu šķidrumu — tinti, kuras plūsmu regulē ar ventili (4). Tintes plūsmas ātrums aptuveni jāsaskaņo ar šķidruma plūsmas ātrumu caurulē.



2.4. att. Plūsmas raksturs: (a,b) lamināra plūsma; (c) pārejas režīms; (d) turbulenta plūsma.

Lamināru plūsmu raksturo slāņu nesajaukšanās. Eksperimentos to novēro kā relatīvi taisnu vai viegli viļņotu tintes līniju, ja tinti laiž līdzīgā ātrumā ar ūdens plūsmu (2.4. att. *a*). Lamināru plūsmu var arī konstatēt, strauji ielaižot caurulē tintes „mākonī” (2.4. att. *b*), tad ir novērojams, ka caurules centrā esošā tinte pārvietojas ievērojami ātrāk un izvirzās uz priekšu, bet tuvāk malām esošie slāņi aizvien vairāk atpaliek. Pārejas plūsmā ir vērojama slāņu neliela sajaukšanās, tomēr tintes viļņotā līnija ir ieraugāma lielā attālumā no izplūdes vietas un sajaukšanās notiek daļēji. Turbulenta plūsma ir gadījumos, kad intensīva sajaukšanās notiek tuvu pie tintes ieplūdes caurulē.

Eksperimentu veic, vispirms ieregulējot lamināru plūsmu pie maksimāli liela iespējamā ātruma. Iztecējušā ūdens daudzumu nosaka, savācot to mērtraukā (1) laikā  $\tau$ . Veic vismaz 3 atkārtotus mērījumus katram variantam. Atkārtojumus veic šādās secībā: lamināra plūsma, pārejas plūsma, turbulenta plūsma, tad vēl divas reizes secīgi: lamināra plūsma, pārejas plūsma, turbulenta plūsma. Šādi ir viegli noteikt mērījuma precizitāti, jo katru reizi plūsmas režīms tiek iestatīts no jauna.

2.1. tabula

Mērījumu un aprēķinu tabulas piemērs

Mērāmie lielumi				Aprēķināmie lielumi		
Nr. p.k.	Iztecējušā šķidruma tilpums $V, L$	Eksperimenta laiks $\tau, s$	Vizuālā vērojuma apraksts	Ražība $Q, L/s$	Plūsmas ātrums, $w, m/s$	$Re$
1a) maksimālā ražība, kad tintes plūsma visā caurules garumā nesajaucas						
1.						
2.						
3.						
1b) minimālā ražība turbulentai plūsmai						
...						

Tā kā plūsmas ātrums, pie kura tiek veikti mērījumi, tiek izvēlēts, spriežot par plūsmas režīmu vizuāli, tad noteikti jāveic vizuālā vērojuma apraksts. Ieteicams veikt mērījumus pie mazliet atšķirīgiem vizuālajiem vērojumiem, lai vieglāk noteikt plūsmas rakstura un  $Re$  izmaiņas sakarību. Ievērojiet aprēķinu precizitāti!  $Re$  norādiet veselos skaitļos!

## 2.4. Kontroljautājumi

1. Kādi plūsmu režīmi ir iespējami? Kuru no tiem biežāk izmanto praksē?
2. Kas ir  $Re$ ? Cik liels ir  $Re_{kr}$ ? Vai visām iekārtām  $Re_{kr}$  ir vienāds?
3. Kas ir ārējā berze?
4. Kas ir ekvivalentais diametrs?
5. Kas ir viskozitāte? No kā ir atkarīga viskozitāte?
6. Kas notiek hidrodinamiskajā stabilizācijas apgabalā?
7. Kā atšķiras ātruma sadalījums caurules šķērsgriezumā laminārai un turbulentai plūsmai?
8. Kā mainīsies  $Re$ , ja mainās šķidruma temperatūra?
9. Vai  $Re$  mainīsies, ja iekārtā izmantos atšķirīgus šķidrumus?



## 3. Šķidruma iztece

### 3.1. Teorētiskais pamatojums

3.

Tehnoloģiskajos procesos bieži sastopas ar dažāda veida šķidrumu izteces parādībām. Šķidruma iztece no iekārtām un tvertnēm parasti notiek pa caurumiem vai pa uzgaļiem. Tie var būt ierīkoti tvertnes apakšā vai sānu sienās. Izteces procesā novērojama šķidruma strūkļas sašaurināšanās parādība, kuras pamatā ir plūsmas daļiņu inerce, tām ieejot izteces atverē. Šķidruma strūkļas sašaurināšanos ietekmē arī šķidruma virsmas spraigums. Rezultātā no tilpnes iztek mazāk šķidruma, nekā aprēķinot pēc atveres faktiskā laukuma. Šīs parādības novērtē un izteces ražības samazinājumu raksturo **izteces koeficients**. Atkarībā no atveres formas izteces koeficienta vērtības var ievērojami atšķirties.

Šķidruma līmenis iekārtā var palikt nemainīgs (raksturīgi nepārtrauktas darbības iekārtām) vai arī nepārtraukti samazināties (tvertņu un iekārtu iztukšošana). Izteci mēdz saukt arī par izplūdi.

#### Iztece pa caurumiem un uzgaļiem

Tehnoloģiskos procesos ir nepieciešams aprēķināt cauruma vai uzgaļa diametru, kas nodrošinās vajadzīgo ražību vai tvertnes iztukšošanas laiku. Savukārt, ja ir definēti konstrukcijas izmēri, nepieciešams aprēķināt iespējamo sasniedzamo ražību vai arī tvertnes iztukšošanas laiku. Abus šos uzdevumus risina, izmantojot **Bernulli vienādojumu** (3.1. att.), kas apraksta enerģijas nezūdamību, šķidrumam plūstot.

$$\frac{\omega^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z + h_{\text{zud}} = \text{const}$$

**Kinētiskā enerģija:** lielāka ātri ( $\omega$ ) plūstošiem šķidrumiem

**Potenciālā enerģija:** atbrīvojas šķidrumam plūstot **lejup**, spiediena  $p$  vai augstuma starpības  $z$  dēļ, vai ir nepieciešama šķidruma pārvietošanai **augšup**

**Hidrauliskā augstuma zudumi,** berzes un vietējo pretestību (likumi, ventiļi u. c.) dēļ

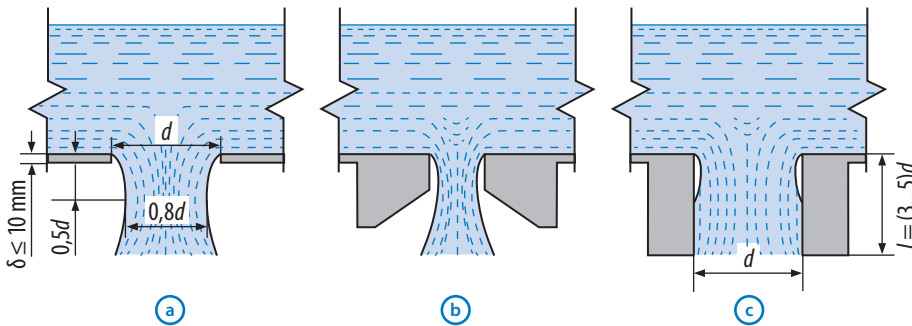
Šķidrumam tekot lejup, samazinās tā potenciālā enerģija, bet palielinās kinētiskā enerģija. Savukārt, ceļot šķidrumu augšup, iztērētā enerģija uzkrājas potenciālās enerģijas veidā. **Kopējais enerģijas daudzums ir konstants**

3.1. att. Bernulli vienādojums.

Vienādojums raksturo kopējo šķidruma **hidraulisko augstumu** jeb **enerģijas daudzumu, izteiktu šķidruma staba metros**.

Uzgaļus un caurumus izgatavo un pielieto atkarībā no vēlamā strūkļas veida. Par **uzgaļiem** sauc caurules, kuru garums ir  $l = (3...5)d$ , kur  $d$  ir caurules diametrs.

Atkarībā no traukā (aparātā, rezervuārā) izveidotā cauruma sienu konfigurācijas hidraulikā izšķir plānsienu un biežsienu traukus. Jēdziens „plānsienu” nav saistīts ar trauka faktisko sienas biezumu, bet ar izveidoto cauruma konfigurāciju, caur kuru plūstot šķidrums pārvar tikai vietējo pretestību, t. i. neslapina cauruma sienas (3.2. att. *a* un *b*).



3.2. att. Šķidruma izteces veidi: caurums plānā sienā (*a*, *b*) un uzgālis (*c*).

Ja **caurums** atrodas zem šķidruma līmeņa 5...10 reizes dziļāk par savu vertikālo izmēru, tad tādus caurumus sauc par „maziem”. Ja caurums atrodas tuvāk šķidruma līmenim, tad tas uzskatāms par „lielu” caurumu. No maziem caurumiem plānās sienās izplūstošajai strūklai šķidruma daļiņu inerces dēļ attālumā  $0,5d$  no izplūdes sākuma ir vismazākais šķērsgriezums —  $0,8$  no cauruma diametra (3.2. att. *a*). Šo parādību sauc par strūkļas kontrakciju; tās pamatā ir šķidruma virsmas spraiguma un daļiņu inerces spēki. Attiecību starp strūkļas šaurākās vietas šķērsgriezuma laukumu  $S_{\text{str}}$  un cauruma šķērsgriezumu  $S_c$  sauc par **kontrakcijas koeficientu**  $\alpha_k$ :

$$\alpha_k = \frac{S_{\text{str}}}{S_c}.$$

Plānām sienām  $\alpha_k = 0,64$ .

Ideāla šķidruma iztecēšanas gadījumā šķidruma plūsmas ātrumu  $w$  [m/s] iztecē raksturo **Torričelli vienādojums** (skat. kinētiskās enerģijas komponenti Bernulli vienādojumā):

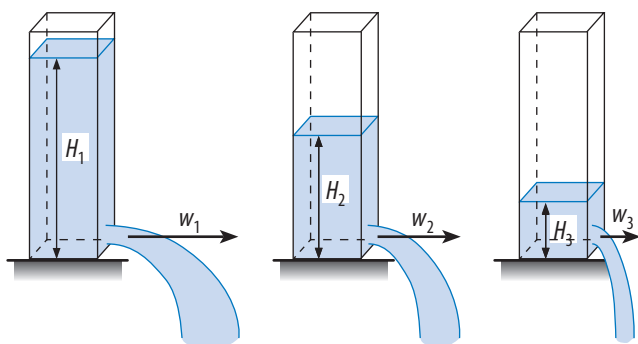
$$w = \sqrt{2gH},$$

3.

kur  $g$  – brīvās krišanas paātrinājums, 9,81 m/s<sup>2</sup>;

$H$  – šķidruma staba augstums virs izteces vietas, m.

Kā redzams, izteces ātruma kvadrāts ir tieši proporcionāls šķidruma slāņa augstumam (skat. 3.3. att.).



3.3. att. Šķidruma izteces ātruma atkarība no šķidruma staba augstuma,  $w_1 > w_2 > w_3$ .

Ideālā gadījumā šķidruma izteces ātrums ir vienāds ar ātrumu, ko ķermenis sasniedz, brīvi krītot no augstuma  $H$ . Reālu šķidrumu gadījumā daļa no hidrauliskā augstuma  $H$  tiek patērēta hidraulisko pretestību pārvarēšanai. Šo daļu izsaka ar iztecēšanas ātruma koeficientu  $\varphi$ .

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_{vp}}},$$

kur  $\zeta_{vp}$  – vietējās pretestības koeficients.

Ātruma koeficienta  $\varphi$  skaitliskā vērtība ir robežās no 0,96 līdz 0,99 atkarībā no sienas biezuma. Tātad reāla šķidruma iztecēšanas ātrums  $w$  ir:

$$w = \varphi \sqrt{2gH}.$$

Strūklas kontrakcijas un hidrauliskās pretestības ietekmi uz šķidruma iztecēšanu izsaka ar **patēriņa koeficientu** jeb **izteces koeficientu**  $\mu$ :

$$\mu = \alpha_k \varphi.$$

Izteses koeficienta  $\mu$  vērtību nosaka eksperimentāli. Orientējoši, apaļiem caurumiem izteses koeficients ir 0,62, cilindriskam uzgalim — 0,82, koniskam paplatinātam uzgalim — 0,45, koniskam sašaurinātam — 0,96. Viskoziem šķidrumiem, salīdzinot ar ūdens konsistences šķidrumiem, šīs vērtības ir mazākas.

### Šķidruma iztece pie konstanta šķidruma līmeņa

Konstants šķidruma līmenis parasti ir nepārtrauktas darbības procesos. Šādos procesos ir svarīgi samērot ieplūdes un izplūdes ātrumu, tādēļ aprēķinu precizitāte var būtiski ietekmēt procesa gaitu.

Iztecējušā šķidruma **tilpuma ražība**  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] **ideālā gadījumā** ir:

$$Q = S_c w,$$

kur  $S_c$  – atveres (cauruma) laukums,  $\text{m}^2$ ;

$w$  – iztecēšanas ātrums,  $\text{m}/\text{s}$ .

Faktisko iztecējušā šķidruma daudzumu reāla šķidruma gadījumā iztecei pie konstanta šķidruma līmeņa aprēķina pēc vienādojuma:

$$Q = \mu S_c w = \mu S_c \sqrt{2gH}.$$

No šī vienādojuma var izteikt **izteses koeficientu**  $\mu$ :

$$\mu = \frac{Q}{S_c \sqrt{2gH}}.$$

### Šķidruma iztece pie mainīga šķidruma līmeņa

Šis izteses veids novērojams, iztukšojot tvertnes, cisternas, baseinus utt. Iztece pie mainīga šķidruma līmeņa saistīta ar nepārtrauktu hidrauliskā augstuma samazināšanos. Tas savukārt rada nepārtrauktu izteses ātruma samazināšanos. Procesam ir izteikti nestacionārs raksturs.

Tvertnē ar konstantu šķērsriezuma laukumu  $S$  **iztecei** no piepildījuma līmeņa  $H_1$  līdz līmenim  $H_2$  **nepieciešamais laiks**  $\tau$  [s] ir:

$$\tau = \frac{2S(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})}{\mu S_c \sqrt{2g}}.$$

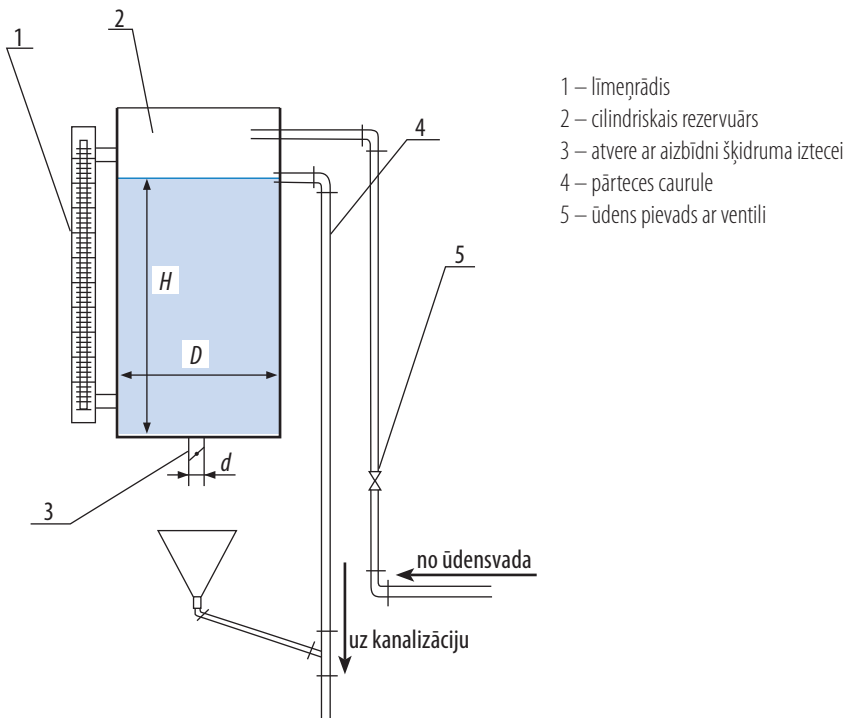
No šī vienādojuma izsaka **izteses koeficientu**  $\mu$ :

$$\mu = \frac{2S(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})}{\tau S_c \sqrt{2g}}.$$

### 3.2. Darba uzdevumi

1. Noteikt teorētisko uzpildītas iekārtas ražību pie konstanta šķidruma līmeņa pēc Torričelli formulas un salīdzināt ar praktiski iegūto.
2. Noteikt izteces koeficientu dotajai iekārtai pie diviem konstantiem šķidruma līmeņiem.
3. Noteikt izteces koeficientu dotajai iekārtai pie četriem mainīgiem šķidruma līmeņiem.
4. Secinājumos izvērtēt izteces ātruma atkarību no šķidruma augstuma.
5. Atrisināt teorētisko uzdevumu, izmantojot eksperimentāli noteikto izteces koeficientu (katrs grupā rēķina savu variantu, visiem tvertne ir ar vienu tilpumu, bet mainās  $H$  un  $D$  vai  $d$ ).

### 3.3. Iekārtas apraksts



3.4. att. Iekārtas shēma.

### 3.4. Darba gaita

#### Iztece pie konstanta šķidruma līmeņa

1. Pārlicinās, ka tvertnes izteces aizbīdnis (3) ir aizvērts.
2. Atver ventili (5) un piepilda tvertni līdz izvēlētajam līmenim. Šeit iespējami ir divi gadījumi:
  - a) piepildīt tvertni līdz pārteces caurulei. Ja pieplūstošā ūdens daudzums būs lielāks par aizplūstošā ūdens daudzumu, tad liekais ūdens aizplūdis pārtecē;
  - b) piepildīt tvertni līdz jebkuram brīvi izvēlētam augstumam un ieregulēt pieplūdi tādā pašā ātrumā kā iztece pēc izplūdes vārsta atvēršanas.
3. Mērījumu veic, uzņemot laiku, kurā iztek izvēlētais tilpuma daudzums. Tilpumu nomēra, ūdeni uzpildot spainī un nosverot vai mērot tā tilpumu mērcilindrā.
4. Veic vismaz trīs atkārtotus mērījumus katram darba variantam.

3.

#### Iztece pie mainīga šķidruma līmeņa

Nosakot izteces koeficientu mainīga šķidruma līmeņa gadījumā, uzņem laiku, kādā līmenis mainās no augstuma  $H_1$  līdz augstumam  $H_2$ . Šo eksperimentu laikā šķidruma pievadīšanas ventilis (5) ir aizvērts.

Lai dotajai iekārtai iegūtu izteces koeficienta vidējo skaitlisko vērtību, katrā augstumu diapazonā veic vismaz 3 atkārtotus mērījumus. Lai samazinātu izplūdes aizbīdņa virināšanas radītās vibrācijas un ūdens inerces ietekmi, darbu veic, atverot izplūdes ventili tikai vienreiz un nolasot secīgi laiku vairākiem augstumiem pēc kārtas, ūdens līmenim tvertnē samazinoties par izvēlēto intervālu, piemēram, ik pa 10 cm, 15 cm vai 20 cm. Kad sasniegts zemākais pētāmais augstums, tad aizbīdni aizver, iekārtu piepilda un mērījumu virkni atkārtoti veic vairākas reizes.

#### Rezultātu pārbaude

Ja darbs izstrādāts precīzi, tad izteces koeficientiem kļūdas robežās vajadzētu sakrist. Tāpēc ieteicams izrēķināt izteces koeficientu vismaz dažiem mērījumiem, neaizejot no laboratorijas. Tad nesakritības gadījumā var viegli atkārtot nepieciešamo eksperimentu. Rezultātu pierakstam var lietot tabulas 3.1. un 3.2. Izmantojot mazus šķidruma slāņa augstumus, ņemt vērā virpuļa veidošanos un dziļumu, analizēt tā ietekmi uz izteces koeficientu.

3.1. tabula

Mērījumu un rezultātu tabulas piemērs izteces koeficienta noteikšanai pie konstanta šķidruma līmeņa

Nr. p.k.	Mērījumu rezultāti			Aprēķinu rezultāti	
	Šķidruma līmenis $H$ , m	Iztecējušā šķidruma tilpums $V$ , m <sup>3</sup>	Izteces laiks $\tau$ , s	Ražība $Q$ , m <sup>3</sup> /s	Izteces koeficients $\mu$
1.					
2.					
...					

3.2. tabula

Mērījumu un rezultātu tabulas piemērs izteces koeficienta noteikšanai pie mainīga šķidruma līmeņa

Nr. p.k.	Mērījumu rezultāti			Aprēķinu rezultāti	
	Šķidruma līmenis		Izteces laiks $\tau$ , s	$\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}$	Izteces koeficients $\mu$
	sākumā $H_1$ , m	beigās $H_2$ , m			
1.					
2.					
...					

### 3.5. Teorētiskais uzdevums

**Atrisināt uzdevumu** pēc viena no dotajiem variantiem, izmantojot iepriekš noteikto  $\mu_{vid}$ .

Cik ilgā laikā no rezervuāra, kura diametrs ir  $D = \_\_\_ [m]$ , iztecēs  $V = \_\_\_ [m^3]$  ūdens, ja izteces caurums, kura  $S_c = \_\_\_ [mm]$ , atrodas rezervuāra apakšā? Kāda būs ūdens izplūdes ražība, ja augstums saglabāsies konstants? Risinot uzdevumu, dot iekārtas skici. Nezināmos lielumus izvēlēties līdzīgus laboratorijas iekārtai, un arī brīvi izvēloties, kuru lielumu izmainīt. Uzdevuma rezultātus iekļaut secinājumos, salīdzinot ar reālo iekārtu, tās iztukšošanās laiku un ražību izplūdē.

### 3.6. Kontroljautājumi

1. Kā izteces ātrums ir saistīts ar:
  - trauka formu,
  - šķidruma līmeņa augstumu,
  - atveres atrašanās vietu tvertnē?
2. Cik atmosfērām atbilst viens metrs ūdens staba?
3. Kurā gadījumā no 5 m augstas tvertnes 10 L iztecēs ātrāk – ja līmenis būs konstants (5 m) vai mainīgs?
4. Ar ko atšķiras iztece caur uzgali un caur caurumu?
5. Kas nosaka vai caurumu uzskata par mazu vai par lielu?
6. Kura tvertne ātrāk iztukšosies — 8 m augsta ar šķērsriezuma laukumu  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  vai 4 m augsta ar šķērsriezuma laukumu  $2\text{ m} \times 1\text{ m}$ ?



## 4. Centrbēdzes sūknis

### 4.1. Teorētiskais pamatojums

#### Spiediens un tā mērīšana

4.

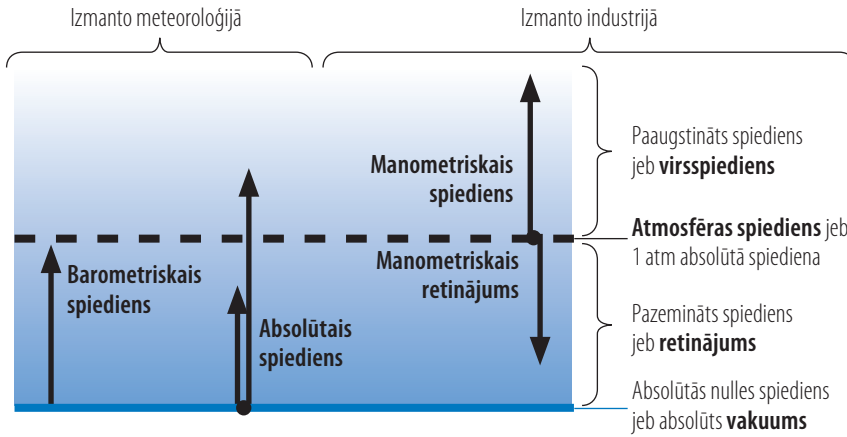
Par spiedienu sauc spēku, kas iedarbojas uz laukuma vienību perpendikulāri virsmai. SI sistēmā spiedienu mēra ņūtonos uz kvadrātmetru ( $\text{N/m}^2$ ) jeb paskālos (Pa). Dažādas spiediena mērvienības un to savstarpējās sakarības dotas 3. pielikumā.

Zemes gāzveida apvalks jeb atmosfēra zemes gravitācijas dēļ ar savu svaru iedarbojas uz Zemes virsmu, radot spiedienu. Šo spiedienu sauc par atmosfēras spiedienu. Normālu atmosfēras spiedienu tehnikā pieņem par 760 mm Hg jeb 101,35 kPa, jeb  $10^{13}$  mbar. Reāli atmosfēras spiediens laika apstākļu ietekmē gan nedaudz svārstās.

Spiedienu parasti izsaka vienā no divām atskaites sistēmām. Ja spiedienu izsaka attiecībā pret absolūtu vakuumu, tad to sauc par **absolūto spiedienu** jeb **barometrisko spiedienu**. Savukārt, ja par atskaites sistēmas nulles punktu ņem apkārtējo spiedienu, tad to sauc par **manometrisko spiedienu** (skat. 4.1. att.). Ja manometriskais spiediens ir augstāks par apkārtējās vides spiedienu, to sauc par virsspiedienu. Ja manometriskais spiediens ir zemāks par apkārtējās vides (atmosfēras) spiedienu to sauc par retinājumu jeb vakuummetrisko spiedienu.

$$\boxed{\text{Absolūtais jeb barometriskais spiediens}} = \boxed{\text{Atmosfēras spiediens}} + \boxed{\text{Manometriskais spiediens jeb spiediens sistēmā}}$$

Ierīci, ar kuru mēra virsspiedienu, sauc par **manometru**. Retinājumu mēra ar **vakuummetru**. Savukārt absolūto spiedienu nosaka ar **barometru**. Cauruļvados, iekārtās un reaktoros uzstāda manometrus.



4.1. att. Barometriskā un manometriskā spiediena atskaites punkti.

## Sūkņi un to klasifikācija

Sūkņi ir ierīces, kuras izmanto šķidrumu pārvietošanai, piešķirot šķidrumiem kinētisko enerģiju. Sūkņi var būt ļoti dažādi gan pēc paredzētā pielietojuma (darba vides temperatūra, vielu koncentrācija šķidrumā, šķidruma ķīmiskā agresivitāte u. c.), gan pēc konstrukcijas (darbības principa un uzbūves).

Sūkņu tipi, kurus izmanto ķīmiskajā, pārtikas un citās rūpniecības nozarēs, ir ļoti daudzveidīgi. Vienotas sūkņu klasifikācijas nav. Sūkņus var iedalīt pēc vairākiem parametriem. Pēc darbības principa sūkņus var iedalīt tilpuma un dinamiskajos sūkņos. **Tilpuma sūkņu** darbības pamatā ir izspiešanas princips — pārvietojamās vides spiediens palielinās saspiešanas rezultātā. Pie šāda tipa pieder virzuļsūkņi, zobratu, rotējošo plāksņu sūkņi, montežū u. c. **Dinamisko sūkņu** darbības pamatā ir spēka pielikšana pārvietojamajam šķidrumam. Enerģija šķidrumam tiek dota, sūkņa darba rata lāpstiņām griežoties. Pie šī tipa pieder centrālās sūkņi, aksiālie sūkņi, virpuļsūkņi, kā arī strūklas sūkņi un gaisa lifta sūkņi u. c.

Pēc konstrukcijas sūkņus iedala: **lāpstiņveidīgajos** (centrbēdzes, aksiālie, virpuļsūkņi), **virzuļsūkņos** un **rotācijas sūkņos** (zobratu, rotējošo plāksņu, skrūvju sūkņi). Tādi aparāti kā gaisa lifti, gāzes un tvaika izspiedēji, hidrauliskais triecis, arī strūklas sūkņi un magnētiskie hidrodinamiskie sūkņi arī ir sūkņu paveidi.

Pēc pielietojuma veida sūkņus iedala auksta un karsta ūdens, naftas, benzīna un eļļas sūkņos u. c. Piemēram, naftas centrālās sūkņim ir jābūt sprādziendrošam, jāiztur augstas temperatūras, kā arī jābūt jutīgam pret

šķidruma viskozitātes izmaiņām un izturīgam pret dažādiem materiāla sablīvējumiem.

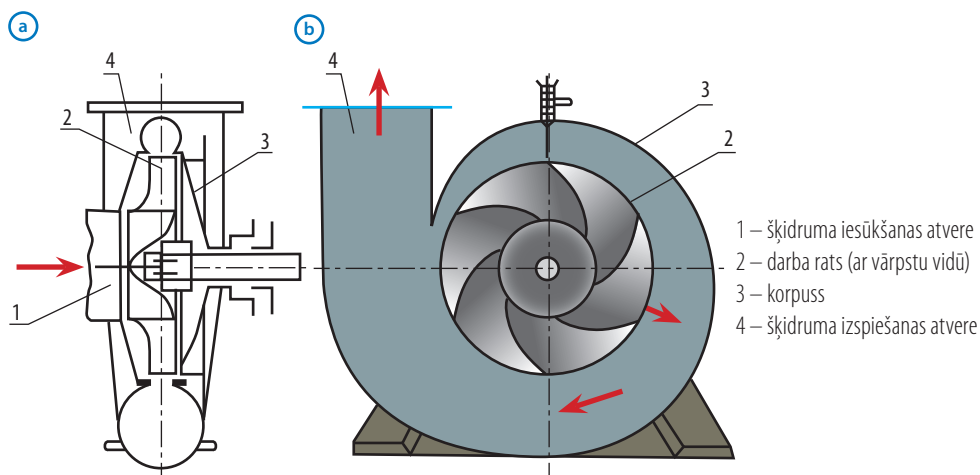
Pēc darba ratu skaita uz vārpstas centrālās sūkņus iedala vienpakāpes un vairākpakāpju centrālās sūkņos.

Pēc radītā spiediena centrālās sūkņus iedala zemspiediena sūkņos — spiedienam līdz 0,2 MPa; vidēja spiediena sūkņos — spiedienam 0,2...0,6 MPa un augstspiediena sūkņos — spiedienam virs 0,6 MPa.

4.

## Centrālās sūkņi

Centrālās sūkņus lieto lielu šķidruma daudzumu pārvietošanai pie relatīvi nelieliem spiedieniem. Vienpakāpes centrālās sūkņa uzbūves shēma parādīta 4.2. att.



4.2. att. Centrālās sūkņa shēma: (a) sānskats; (b) priekšskats.

Centrālās sūkņi sastāv no vārpstas un no darba rata, kas ekscentriski ievietots korpusā. Darba rats izveidots no diviem diskem, kurus savieno izliektas lāpstiņas. Šķidrums, kas atrodas starp diskem, rotē kopā ar darba ratu. Centrālās spēka ietekmē šķidrums pārvietojas radiāli prom no centra, vienlaikus iegūstot aploces ātrumu, kas ir vienāds ar darba rata ātrumu. Tādējādi šķidrums no centra, kur pievienots sūcivads, pārvietojas uz perifērijā esošo spiedvadu. Palielinoties spirālveida kanāla šķērsgriezuma laukumam, samazinās šķidruma ātrums, ko tas iegūst, izejot no darba rata. Daļa no kinētiskās enerģijas pāriet potenciālajā enerģijā, palielinot spiedienu

spiedvadā. Šķidrums aizplūstot no darba rata centra, veidojas retinājums, savukārt šķidruma krātuvē parasti ir atmosfēras spiediens. Spiedienu starpības rezultātā notiek šķidruma pieplūde no šķidruma krātuves pa sūc vadu līdz sūknim. Darba rats griežas nepārtraukti, tāpēc šāds sūknis rada vienmērīgu, nepārtrauktu šķidruma plūsmu.

Pirms sūkņa darbināšanas sūc vadu un sūknis jāpiepilda ar pārsūknējamo šķidrumu, jo darba rats, griežoties gaisa vidē, nespēj radīt pietiekamu retinājumu, lai sūknī varētu ieplūst šķidrums. Tā kā, sūknī izslēdzot, šķidrums gravitācijas ietekmē iztek no sistēmas, tad sūc vada galā vienmēr pievieno pretvārstu, kas, izslēdzot sūknī, nepieļauj šķidruma iztecēšanu atpakaļ tā avotā (šķidruma rezervuārā).

4.

## Sūkņus raksturojošie lielumi

**Galvenie sūkņus raksturojošie lielumi** ir šķidruma padeve (ražība), šķidruma celšanas augstums, patērētā jauda un lietderības koeficients. Sūkņa tilpuma ražība  $Q$  ir pārsūknētā šķidruma tilpums laika vienībā. Sūkņa tilpuma ražības mērvienības ir  $\text{m}^3/\text{h}$  vai  $\text{L}/\text{s}$ , vai  $\text{L}/\text{min}$ , vai arī ražību var izteikt masas vienībās, piemēram,  $\text{kg}/\text{s}$ .

**Sūkņa tilpuma ražība** jeb padeve  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]:

$$Q = \frac{V}{\tau},$$

kur  $V$  – pārsūknētais šķidruma daudzums,  $\text{m}^3$ ;

$\tau$  – darbības laiks, s.

**Sūkņa masas ražība**  $G$  [ $\text{kg}/\text{s}$ ]:

$$G = \rho Q,$$

kur  $\rho$  – pārsūknējamā šķidruma blīvums,  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

**Sūkņa celšanas augstums** raksturo enerģiju, ko sūknis nodod pārsūknējamā šķidruma svara vienībai. Sūkņa kopējo šķidruma celšanas augstumu var noteikt, sastādot Bernulli vienādojumu sūkšanas un spiešanas gājieniem. Ģeometrisko celšanas augstumu  $H_g$  (skat. 4.3. att.) kopā ar zaudēto spiedienu sūc vadā un spiedvadā sauc par **manometrisko celšanas augstumu**  $H_m$  [m].

$H_m$  parasti izsaka metros, un to var aprēķināt no vakuumetra  $p_1$  un manometra  $p_2$  rādījumiem pēc formulas:

$$H_m = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + h + \frac{(w_2^2 - w_1^2)}{2g},$$

kur  $p_1$  – vakuumetra rādījums, Pa;

$p_2$  – manometra rādījums, Pa;

$\rho$  – pārsūknējamā šķidruma blīvums, kg/m<sup>3</sup>;

$g$  – brīvās krišanas paātrinājums, m/s<sup>2</sup>;

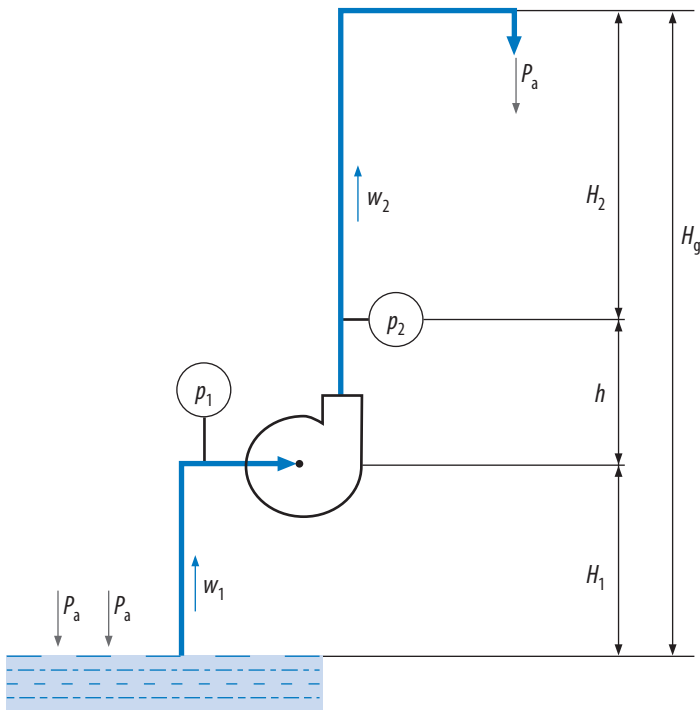
$h$  – augstuma starpība starp manometru un vakuummetru, m;

$w_1$  – šķidruma plūsmas ātrums sūcvadā, m/s;

$w_2$  – šķidruma plūsmas ātrums spiedvadā, m/s.

Ja spiedvada un sūcvida diametri ir vienādi, tad  $w_1 = w_2$  un aprēķins vienkāršojas:

$$H_m = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + h.$$



4.3. att. Sūkņa sūkšanas augstumi.

Viens metrs ūdens staba atbilst 0,097 bar jeb noapaļojot 10 m ūdens staba ir 1 bar. Tātad, zinot kopējo spiedienu, ko spēj attīstīt sūknis bāros, ir viegli pāriet uz kopējo celšanas augstumu ūdens staba metros. Tomēr jāņem vērā, ka reālais celšanas augstums būs mazāks, jo sistēmā esošās vietējās pretestības rada spiediena zudumus jeb celšanas augstuma samazinājumu.

**Sūkšanas augstumu**  $H_1$  [m] var noteikt, sastādot Bernulli vienādojumu sūkšanas gājienam (skat. 5.3. att.). Risinot vienādojumu, iegūstam:

$$H_1 \leq \frac{p_a}{\rho g} - \frac{p_1}{\rho g} - h_z^{\text{suc}},$$

kur  $h_z^{\text{suc}}$  – augstuma zudumi sūcīdā, m.

Līdz ar to sūkšanas augstums  $H_1 < p_a/\rho g$ . Tas nozīmē, ka, piemēram, auksta ūdens gadījumā **teorētiskais uzsūkšanas augstums**  $H_{\text{max}}$  [m] ir:

$$H_{1\text{max}} = \frac{p_a}{\rho g} = \frac{101\,325 \text{ [Pa]}}{1000 \text{ [kg/m}^3\text{]} \cdot 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}} = 10,33 \text{ [m]}.$$

Teorētiskais uzsūkšanas augstums praksē nav sasniedzams, jo praksē  $h_z^{\text{suc}} > 0$ . Tīrģū piedāvātajiem sūkņiem garantētais sūkšanas augstums ir 6...9 m.

Jāņem vērā arī katra pārvietojamā šķidrums tvaika spiediens, jo pie zināma retinājuma sūcīdā šķidrums sāk iztvaikot. Tas var novest pie nevēlamas parādības — kavitācijas. Par minimālo rezervi uzskata sūcīdā garuma samazinājumu par 0,5 m no teorētiskā augstuma.

**Kavitācija** ir saistīta ar pārsūkņējamā šķidrums strūklas nepārtrauktības traucējumiem. Ja spiediens, šķidrumam ieplūstot darba ratā, ir mazāks par tā tvaika parciālo spiedienu pārsūkņēšanas temperatūrā, tad šķidrums daļēji iztvaiko. Kavitācijas procesā veidojas tvaika burbuļi, tie aug un tad, strauji kondensējoties gāzei, izzūd. Šo procesu rezultātā notiek strauja mikromēroga tilpuma un temperatūras maiņa, kas sūknī rada mikrosprādzieniem līdzīgu efektu. Kavitācija ir nevēlama parādība — tā izraisa papildus trokšņus, bojā sūkņu sastāvdaļas, izraisa vibrācijas. Kavitācijas dēļ strauji samazinās sūkņa ražīgums, lietderības koeficients un kalpošanas ilgums.

Lai arī sūkņos no kavitācijas ir noteikti jāizvairās, ķīmijas un pārtikas tehnoloģijā šo parādību izmanto koloidālu šķidrumu homogenizēšanai un daļiņu sadalīšanai. Tad kavitācija tiek radīta speciālos maisītājos vai homogenizācijas vārstos, kur šķidrums plūst cauri sašaurinājumam, aiz kura seko straujš paplašinājums. Krasā spiediena izmaiņa rada kavitāciju. Šādās iekārtās parasti izmanto ļoti cietus materiālus, piemēram, polikristālisku dimantu. Kavitāciju plaši izmanto krāsu ražošanā un piena homogenizācijā.

**Sūkņa lietderīgā jeb inducētā jauda**  $N_1$  [W] ir darbs, kas jāpatērē, lai no-teiktu daudzumu šķidruma paceltu augstumā  $H_m$ :

$$N_1 = Q\rho gH_m,$$

kur  $\rho$  – šķidruma blīvums,  $\text{kg/m}^3$ ;

$g$  – brīvās krišanas paātrinājums,  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

Kā redzams, palielinoties šķidrumu viskozitātei un blīvumam, sūkņa ražība un celšanas augstums samazinās, bet patērētā jauda palielinās.

Jauda  $N$  [W], ko faktiski patērē sūkņa iekārta ir:

$$N = UI \cos\varphi,$$

kur  $I$  – strāvas stiprums, A;

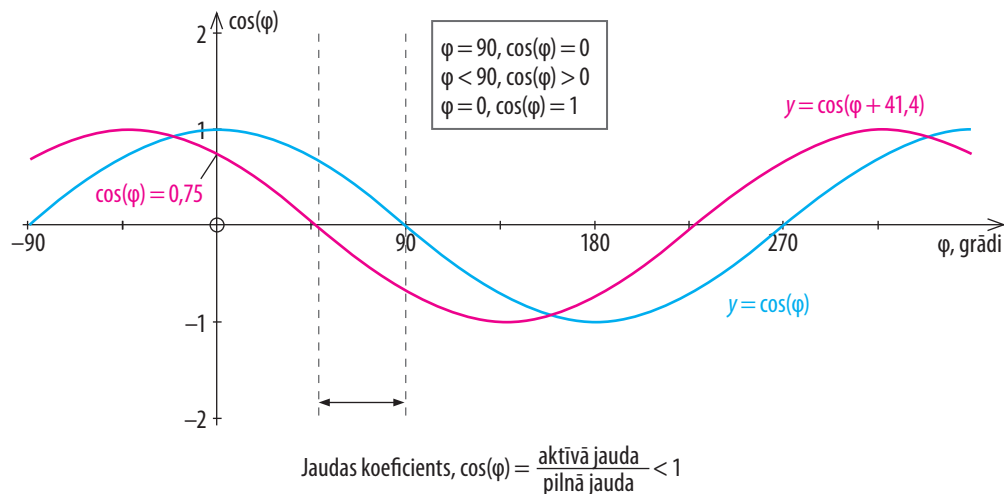
$U$  – spriegums, V;

$\cos\varphi$  – **jaudas koeficients** jeb jaudas faktors.

Jaudas koeficients var būt robežās no 0 līdz 1. Pieņem, ka tas ir 0,75 (skat. 4.4. att.).

Sūkņa **lietderības koeficientu**  $\eta$  aprēķina pēc vienādojuma:

$$\eta = \frac{N_1}{N} 100, \%$$



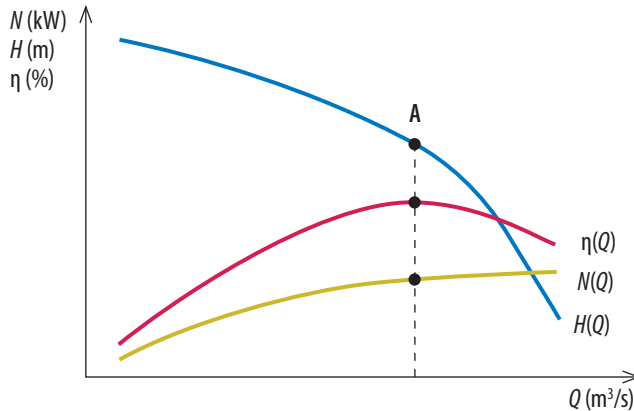
4.4. att. Jaudas koeficienta izcelsme.

Elektriskās ierīces (t. i., motori, transformatori, solenoīda vārsti), kuru konstrukcija ietver tādus elementus kā kondensatori vai indukcijas spoles, rada īslaicīgu papildus enerģijas uzkrāšanu šajos elementos. Katrā maiņstrāvas ciklā šī papildus enerģija tiek daļēji atgriezta energosistēmā, radot strāvas un sprieguma fāžu nobīdi  $\varphi$ . Šī nobīde izraisa  $\cos\varphi$  vērtības un līdz ar to sūkņa iekārtas jaudas samazināšanos.

## 4.

## Centrbēdzes sūkņa raksturlīknes

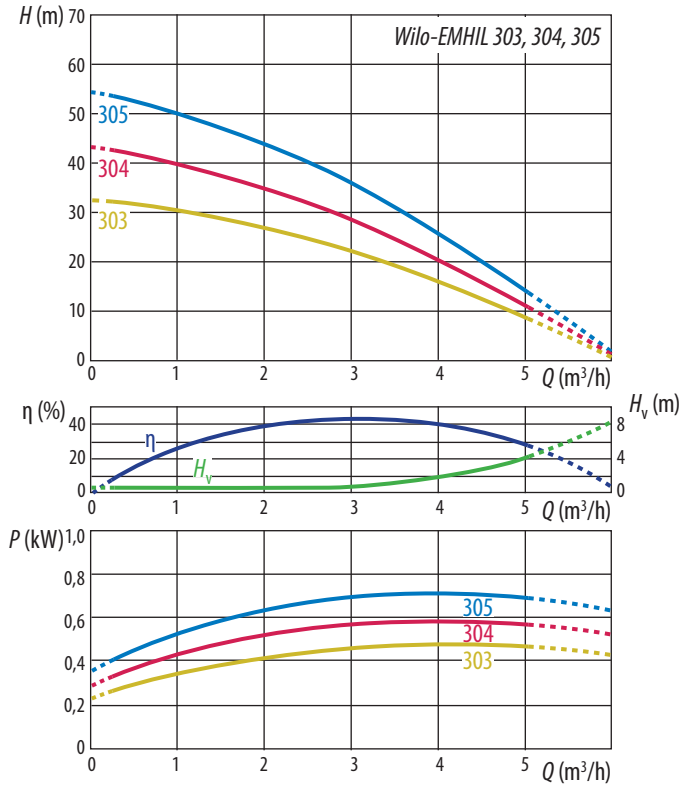
Centrbēdzes sūkņiem, mainot padevi, mainās arī citi sūkņi raksturojošie lielumi — celšanas augstums, jauda un lietderības koeficients. Lielumus, kas raksturo sūkņa darbību pie noteikta pastāvīga motora vārpstas apgriezīenu skaita, parasti attēlo grafiski sakarību veidā: sūkņa celšanas augstums  $H$ , sūkņa jauda  $N$  un lietderības koeficients  $\eta$  kā funkcijas no sūkņa ražības  $Q$ . Tās sauc par sūkņa raksturlīknēm. Sūkņa raksturojumus ražotājs nosaka katram sūkņa tipam eksperimentāli. Centrbēdzes sūkņa raksturlīknes parādītas 4.5. att. Punkts A atbilst optimāliem sūkņa darba apstākļiem, jo sūkņa lietderības koeficients šajā gadījumā ir maksimālais.



4.5. att. Centrbēdzes sūkņa raksturlīknes.

Atkarībā no sūkņa tipa un konstrukcijas šīs līknes var nedaudz mainīt izliekuma formu. Konkrētā sūkņa raksturlīknes var atrast sūkņu ražotāju vai piegādātāju mājaslapās. Viena tipa sūkņiem līknes parasti ir līdzīgas (kā parādīts 4.6. att., kur attēlotas līknes dažādas jaudas viena modeļa sūkņiem, kuriem attiecīgi atšķiras celšanas augstuma raksturlīkne, savukārt lietderības koeficienta un sūkšanas augstuma raksturlīkne neatšķiras).





4.6. att. Centrbēdzes sūkņa raksturlielņu piemērs līdzīgiem sūkņa modeļiem Wilo-EMHIL 303, 304 un 305. Avots: <http://productfinder.wilo.com>

## Centrbēdzes sūkņa proporcionalitātes likums

Mainot centrālās sūkņa darba rata apgriezību skaitu  $n$  nelielā diapazonā, mainās arī citi rādītāji: sūkņa tilpuma ražība  $Q$ , celšanas augstums  $H$  un jauda  $N$ . Starp darba rata (vārpstas) apgriezību skaitu  $n$  un pārējiem sūkņa raksturlielumiem pastāv šādas sakarības:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}, \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2, \quad \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3.$$

## 4.2. Darba uzdevumi

1. Uzņemt centrālās sūkņa raksturlīknes (jaudu, manometrisko celšanas augstumu un lietderības koeficientu atkarībā no sūkņa ražīguma) pie divām atšķirīgām sūcvada retinājuma vērtībām.
2. Teorētiski salīdzināt trīs dažādu vielu (pēc izvēles): benzīna, olīveļļas, karstā dzeramā ūdens, kanalizācijas, sērskābes, transportbetona, klijģerīšu tinktūras, vīna, dzesējošā ūdens, piena vai jogurta pārvietošanai būtiskos sūkņa parametrus. Atrast šiem parametriem atbilstošāko sūkņa tipu.

Tā kā sūkņa izvēles pamatā nav tikai sūknējamais šķidrums, tad definēt kādi vēl parametri ir jāņem vērā un raksturot kādu konkrētu gadījumu. Nosaukt un raksturot pēc iespējas vairāk parametru, kas atšķir dotās vielas un kam būtu nozīme sūkņa izvēlē. Pamatot izvēli norādot informācijas avotus.

## 4.3. Darba gaita

Pārbauda, ka ventiļi uz spiedvada ir daļēji atvērti (atvērti par aptuveni 30...45°), bet uz sūcvada ventīlis ir aizgriezts. Ieslēdz iekārtas galveno slēdzi (drošinātāju). Ieslēdz sūkņa motoru un vienlaicīgi (!) atver sūcvada ventīli.

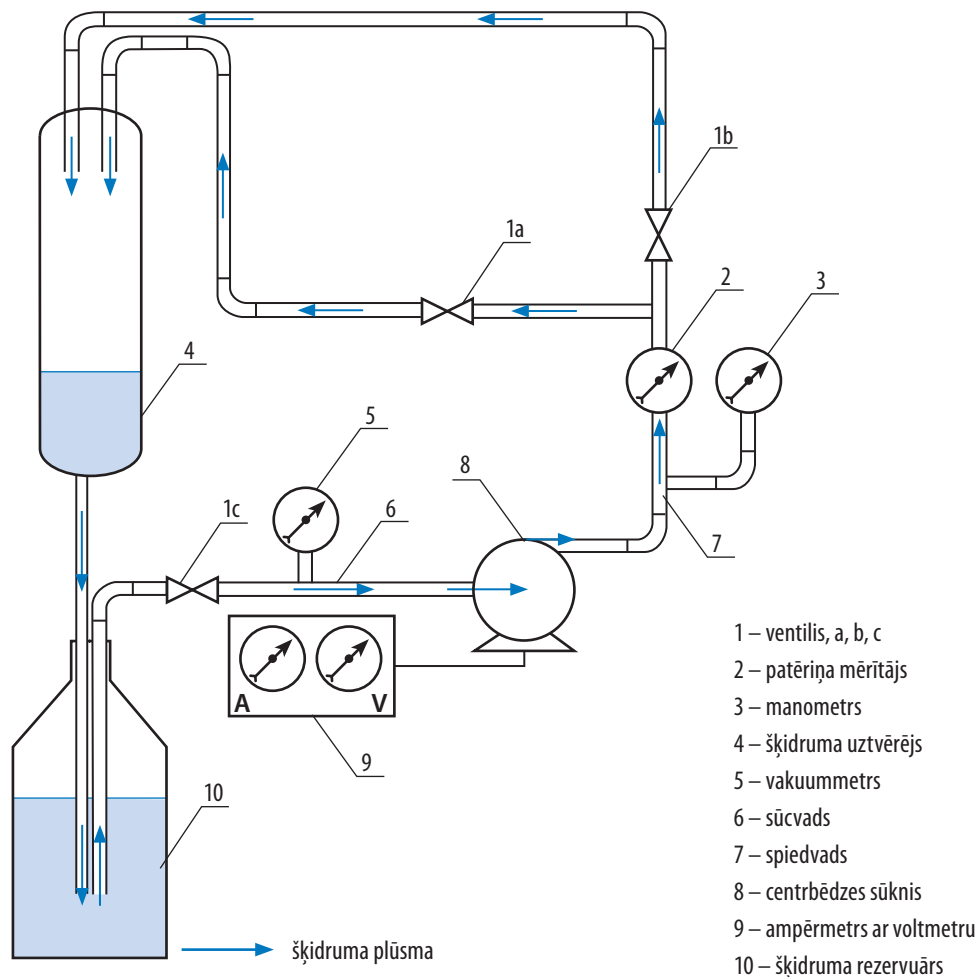
Ar ventiļa palīdzību noregulē darba uzdevumam atbilstošo spiedienu spiedvadā.

Lai uzņemtu raksturlīknes, ir nepieciešami vismaz četri mērījumi pie atšķirīgas ražības jeb celšanas augstuma (vismaz četri punkti ir jebkuras līknes pamatā). Celšanas augstums ir proporcionāls sūkņa radītajam spiedienam. Maksimālo spiedienu, kādu sūknis spēj attīstīt, nosaka, uzmanīgi verot ciet spiedvada vārstu un vērojot plūsmu ūdensvada izplūdē – nevis ventiļa pagrieziena leņķi! Minimālā pieļaujamā plūsma ir tieva strūkliņa uz īsu brīdi (maksimums 1 min). Kad ir zināms maksimālais spiediens, tad arī zināms ar kādu spiediena intervālu jāveic mērījumi, lai iegūtu nepieciešamo punktu skaitu raksturlīknei.

Pēc spiediena ieregulēšanas nolasa un pieraksta ampēmetra, voltmetra, vakuummētra un manometra rādījumus, ar hronometru uzņem laiku un no ūdens skaitītāja nolasa pārsūknētā ūdens tilpumu u. c. lielumus atbilstoši darba uzdevumam.

Kad sūknis jāizslēdz, tad vienlaicīgi (!) izslēdz sūkni un aizgriež sūcvada ventīli, 4.7. att. 1c.

4.



4.7. att. Centrbēdzes sūkņa iekārtas shēma.

## Mērījumu un aprēķinu tabulas piemērs

Izmērītos un aprēķinātos lielumus sakārto 4.1. tabulā, atceroties mērījumiem un aprēķinu rezultātiem norādīt precizitāti.

4.1. tabula

Mērījumu un aprēķinu tabulas piemērs

Mērījumu nolasījumi					Aprēķinu rezultāti							
Nr. p. k.	Laiks $\tau$ , s	Skaitītāja rādījums, L	Spiediens, $p_1$ , bar	Retinājums, $p_2$ , bar	Tilpums $V$ , m <sup>3</sup>	Kopējais celšanas augstums $H$ , m H <sub>2</sub> O	Strāvas stiprums $I$ , A	Spriegums $U$ , V	Šķidruma padeve $Q$ , m <sup>3</sup> /s	Lietderīgā jauda $N_1$ , W	Faktiskā jauda, $N$ , W	Lietderības koeficients $\eta$ , %
1.												
...												

4.

#### 4.4. Kontroljautājumi

1. Kā sauc sūkņa ūdens pievada un izvada caurules?
2. Kas nosaka maksimālo sūkņa celšanas augstumu? No kādām divām pamatdaļām sastāv celšanas augstums?
3. Vai centrālās sūknis ir periodiskas vai nepārtrauktas darbības iekārta? Kādas priekšrocības tas nodrošina?
4. Vai sūcvadam ir garuma/platuma ierobežojumi?
5. Vai spiedvadam ir garuma/platuma ierobežojumi?
6. Iekārta atrodas 4. stāvā (10 m līdz zemei, 13 m līdz dīķim) un tajā jānodrošina ūdens spiediens 1 atm.
  - Cik liels spiediens sūknim ir jārada?
  - Vai tādu var nodrošināt ar centrālās sūknis?
  - Vai sūkņa atrašanās vietai ir ierobežojumi (piem., vai likt to 4. stāvā vai 1. stāvā)?
7. Nosauciet galvenos sūkņa tehniskos raksturlielumus.
8. Kādas ir būtiskākās vielas īpašības, kas jāņem vērā, lai izvēlētos piemērotu sūknis?
9. Vai 6 stāvu laboratorijas korpusā būs pietiekama ūdens padeve, ja sūknis spiedvadā spēj attīstīt 1 atm (vai 200 kPa, vai 5 bar) spiedienu?

## 5. Hidraulisko pretestību noteikšana cauruļvados

### 5.1. Teorētiskais pamatojums

**Hidrodinamika** aplūko likumus, kādiem pakļauti šķidrumi kustībā. Šķidrumu plūsmu rada līmeņu starpība vai spiedienu starpība, kuru izraisa, piemēram, sūkņa darbība.

5.

Šķidrumu (gāzes) plūsmas, virzoties pa caurulēm, kanāliem vai iekārtām, pārvar pretestības, kas rodas:

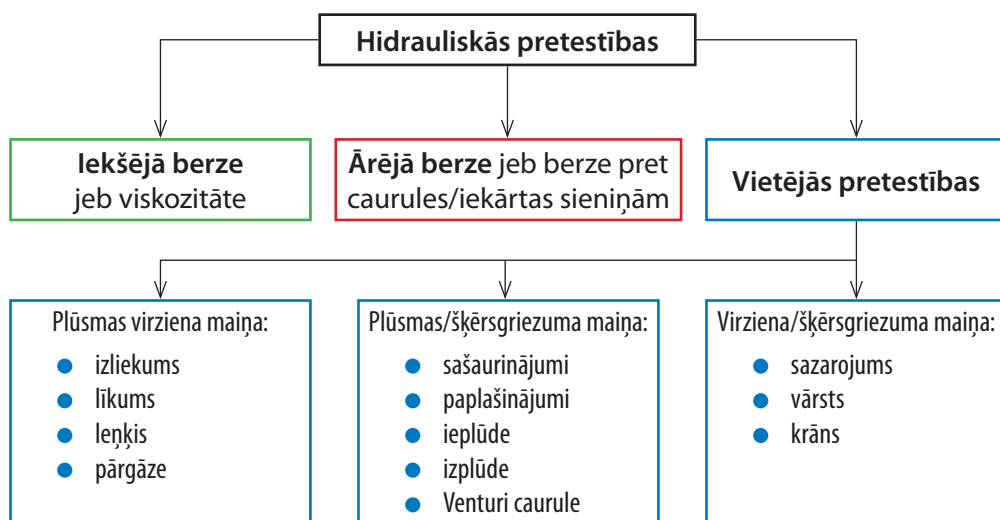
- a) plūsmas slāņiem beržoties vienam gar otru,
- b) plūsmai beržoties gar sienām,
- c) mainot virzienu,
- d) mainot šķērsriezumu.

Tās sauc par **hidrauliskajām pretestībām**. To pārvarēšanai zūd daļa plūsmas enerģijas, kas aizplūst siltuma enerģijas veidā.

Hidrauliskās pretestības stacionārai (vienmērīgai) plūsmai iedala (skat. 5.1. att.):

- iekšējā berze jeb viskozitāte,
- ārējā berze jeb berze pret caurules/iekārtas sieniņām,
- vietējās pretestības.

**Vietējā pretestība** ir jebkura plūsmas virziena vai šķērsriezumu maiņa (likņi, ieplūde, izplūde, ventiļi u. c.). Plūsmai pārvarot vietējo pretestību, hidrauliskā augstuma zudumu izsaka kā daļu no kinētiskā augstuma. Vietējās pretestības koeficients atkarīgs ne tikai no pretestības veida, bet arī no plūsmas režīma, t. i., no Reinoldsa skaitļa.



5.1. att. Hidraulisko pretestību iedalījums.

## Hidrauliskās pretestības koeficients $\lambda$

Viens no svarīgākajiem praktiskās hidraulikas uzdevumiem ir cauruļvadu aprēķins, kas ir saistīts ar enerģijas zudumu noteikšanu, kustoties pa tiem šķidrumiem vai gāzēm. Kustoties reāliem šķidrumiem, rodas hidrauliskās pretestības visā cauruļvada garumā un enerģijas zudumi vietējās pretestībās (noslēdzoša armatūra, likņi, atzarojumi, cauruļvadu paplašinājumi vai sašaurinājumi u. c.). Hidraulisko pretestību pārvarēšanai tiek patērēta daļa no enerģijas; enerģijas samazināšanās izpaužas kā spiediena kritums.

Zaudētā spiediena vai zaudētā augstuma noteikšana ir saistīta ar enerģijas patēriņu to kompensācijai, kā arī lai nodrošinātu šķidruma pārvietošanu pa cauruļvadiem. Stacionāra šķidruma plūsma var tikt aprakstīta ar vispārīgu vienādojumu:

$$Eu = f(Re, G_1, G_2, \dots),$$

kur  $Eu$  – Eilera kritērijs,  $Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2}$ ;

$Re$  – Reinoldsa kritērijs,  $Re = \frac{wd\rho}{\mu}$ ;

$G_1, G_2$  – ģeometriskās līdzības simpleksi;

$\Delta p$  – spiediena zudumi, Pa;

$w$  – vidējais plūsmas ātrums, m/s;

$d$  – caurules diametrs, m;

$\rho$  – šķidruma blīvums, kg/m<sup>3</sup>;

$\mu$  – šķidruma viskozitāte, Pa·s.

Zinot Eilera kritērija vērtību, ir viegli atrast **spiediena zudumus**:

$$\Delta p = Eu \cdot \rho \cdot w^2.$$

**Eilera kritērija** vērtību, šķidrumam kustoties pa taisnu cauruli, var noteikt pēc šāda vienādojuma:

$$Eu = CRe^m G_1 G_2^n,$$

kur  $G_1 = l/d$  – ģeometriskais simpleks, kurā ņemts vērā caurules garums  $l$ ;

$G_2 = k_e/d$  – ģeometriskais simpleks, kurā ņemts vērā cauruļvada ekvivalentais raupjums  $k_e$ ;

$C, m, n$  – koeficienti, kas ir atkarīgi no plūsmas režīma.

Eilera kritēriju var tuvināti aprēķināt, noskaidrojot koeficientu  $C$  un pakāpes rādītāju ( $m, n$ ) lielumus. Plūsmai virzoties cauri vietējām pretestībām, noteikt Eilera kritēriju, kā arī Reinoldsa skaitli un ģeometrisku simpleksu funkciju nav iespējams. Līdz ar to spiediena zudumu  $\Delta p$  [Pa] vai  $\Delta h$  [m] berzes pārvarēšanai praksē parasti nosaka ar empīriskiem vienādojumiem:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho w^2}{2},$$

$$\Delta h = \lambda \frac{l}{d} \frac{w^2}{2g},$$

kur  $\lambda$  – hidrauliskās pretestības koeficients;

$w$  – plūsmas vidējais ātrums, m/s;

$l$  – caurules garums, m;

$d$  – caurules diametrs, m;

$\rho$  – šķidruma blīvums, kg/m<sup>3</sup>.

No šīm formulām redzams, ka spiediena jeb augstuma zudumi berzes pārvarēšanai ir proporcionāli kinētiskajam spiedienam —  $\rho w^2/2$ . Aprēķinu sarežģī apstākļi, ka  $\lambda$  nav konstants lielums, bet ir atkarīgs no plūsmas režīma un cauruļvadu virsmas raupjuma.

Laminārai plūsmai ir spēkā sakarība — hidrauliskās pretestības koeficients  $\lambda = f(Re)$ , jeb:

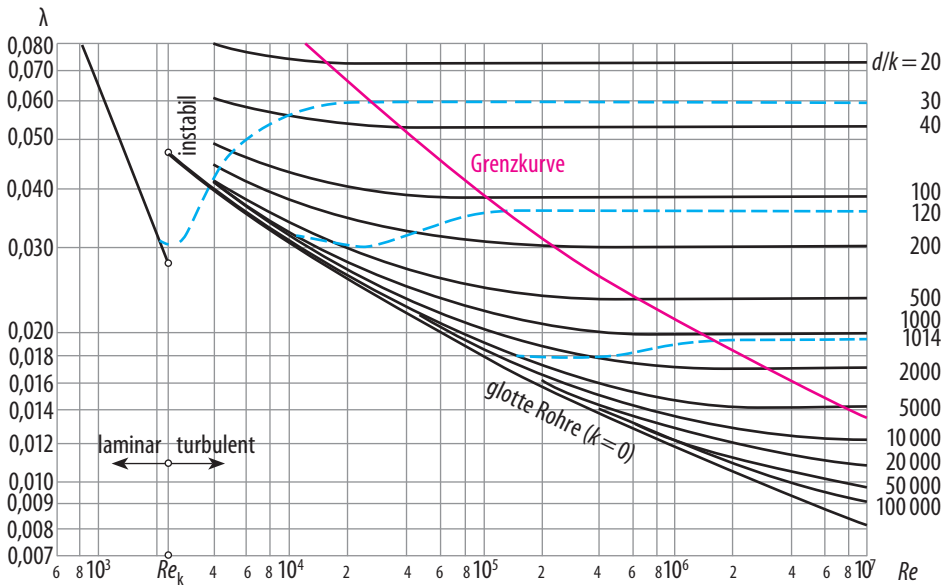
$$\lambda = \frac{A}{Re},$$

kur  $A$  – koeficients, kas ir atkarīgs no caurules ģeometrijas (apaļai caurulei  $A = 64$ , kvadrātveida caurulei  $A = 57$ , gredzenveida plūsmai  $A = 96$ ).

**Turbulentas plūsmas** gadījumā, ja  $4 \cdot 10^3 < Re < 10^5$ ,  $\lambda$  aprēķina pēc **Blaziusa formulas**:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}.$$

Praktiskiem aprēķiniem hidrauliskās pretestības koeficienta skaitliskās vērtības dažādiem plūsmas režīmiem, ievērojot cauruļvadu diametru  $d$  un raupjumu  $k$ , nosaka izmantojot diagrammas  $\lambda = f(Re, d/k)$ , skat. 5.2. att.



5.2. att. Sakarība  $\lambda = f(Re, d/k)$ .

### Vietējās pretestības koeficients $\zeta_{vp}$

Spiediena zudumus vietējo pretestību pārvarēšanai  $\Delta p_{vp}$  [Pa] aprēķina pēc vienādojuma:

$$\Delta p_{vp} = \zeta_{vp} \frac{\rho w^2}{2}.$$

Zinot, ka  $\Delta p = \Delta h \rho g$ , var izteikt kā augstuma zudumus  $\Delta p_{vp}$  [m]:

$$\Delta p_{vp} = \zeta_{vp} \frac{w^2}{2g},$$

kur  $\zeta_{vp}$  – vietējās pretestības koeficients.



Vidējās  $\zeta_{vp}$  vērtības dažādiem vietējo pretestību gadījumiem, kas noteiktas, pamatojoties uz lielu eksperimentālo datu kopu, ir atrodamas rokasgrāmatās un speciālajā literatūrā. **Vidējo** šķidruma plūsmas ātrumu  $w_{vid}$  [m/s], kas ietilpst formulās, nosaka pēc vienādojuma:

$$w_{vid} = \frac{Q}{S},$$

kur  $Q$  – tilpuma ražība, t. i., šķidruma tilpums, kas ieplūst caur caurules šķērs-griezuma laukumu laika vienībā,  $m^3/s$ ;

$S$  – caurules šķērsriezuma laukums,  $m^2$ .

5.

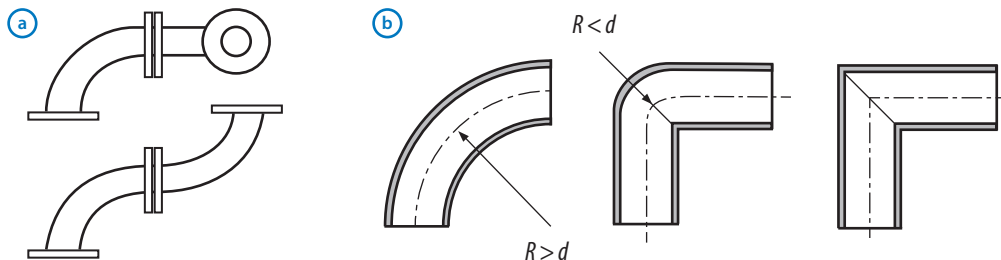
Kopējo spiediena zudumu  $\Delta p_z$  [Pa] berzes un vietējo pretestību pārvarēšanai nosaka pēc formulas:

$$\Delta p_z = \left( \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta_{vp} \right) \frac{\rho w^2}{2},$$

kur  $l$  – kopējais cauruļvada garums (ieskaitot vietējās pretestības), m.

**Laboratorijas darbā** pēc aprakstītajiem vienādojumiem jāaprēķina  $\lambda$  un  $\zeta_{vp}$  vērtības dažādiem vietējās pretestības elementiem, eksperimentāli nosakot spiediena zudumus un plūsmas vidējo ātrumu.

## Līkumi caurulē

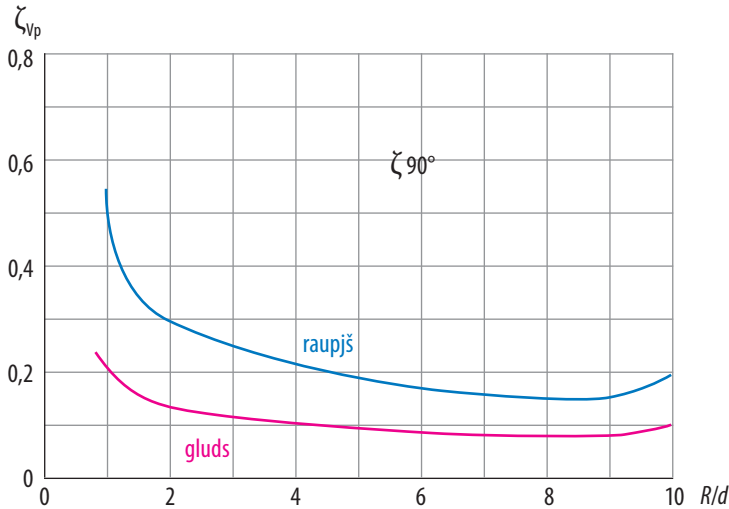


5.3. att. Kombinētie cauruļu savienojumi un līkumi: (a) gulbja kakla līkums; (b) leņķa līkums.

Izplatītākie līkumu veidi ir redzami 5.3. att. Līkumus raksturo to liekuma rādiuss  $R$  un liekuma diametrs  $d$ , kur  $R > d$  vai  $R < d$ . Līkumus izmanto, lai mainītu plūsmas virzienu, plūsmas ātrumu caurulē un atsevišķos gadījumos arī, lai kompensētu caurules termisko izplešanos.

Cauruļu līkumiem berzes pretestības koeficients ir atkarīgs no plūsmas pagriezienu leņķa un attiecības starp izliekuma rādiusu  $R$  un caurules diametru

$d$ , turklāt berzes pretestības koeficientu ietekmē arī likuma forma. Gadījumam ar  $90^\circ$  likumu lietojama zemāk aplūkojamā diagramma (5.4. att.) gludām un raupjām caurulēm.



5.4. att. Izliekuma rādiusa un vietējās pretestības koeficienta sakarība gludām un raupjām caurulēm.

Likumiem, kuru izliekuma rādiuss ir mazāks par caurules diametru ( $R/d < 1$ ), berzes pretestības koeficients ir līdzīgs lēzenāku likumu koeficientam. Piemēram, izliekumam ar leņķi  $90^\circ$ :  $\zeta_{gluds} = 1,13$ , bet  $\zeta_{raupjs} = 1,68$ , taču izliekumam ar  $45^\circ$  pagriezienu —  $\zeta_{gluds} = 0,24$  un  $\zeta_{raupjs} = 0,36$ .

Likumiem ar pagriezienu leņķi  $\delta < 90^\circ$ , pretestību var aprēķināt pēc lineāras proporcijas:

$$\zeta_{vp} = \zeta_{90^\circ} \frac{\delta}{90^\circ}.$$

Savienojumiem, kuri veidoti no vairākiem komponentiem, kopējā pretestība ir lielāka nekā atsevišķu komponentu pretestību summa, jo pastāv pretestība no vēl nenoguldinātajām savienojuma vietām (skat. 5.3. att. a un 5.3. att. b):

- dubults līkums ( $180^\circ$ ):  $\zeta_{vp} = 2,5\zeta_{90^\circ}$ ;
- telpisks līkums, skat. 5.3. att. a:  $\zeta_{vp} = 1,5\sum\zeta_i$ ;
- gulbja kakla līkums, skat. 5.3. att. b:  $\zeta_{vp} = 2\sum\zeta_i$ , kur  $\zeta_i$  — katra atsevišķā komponenta berzes pretestība.

## Šķērsriezuma maiņa caurulē

Laboratorijas iekārtā hidraulisko pretestību noteikšanai ir iemontēti divi elementi (skat. 5.5. att.), kas modelē pēkšņu cauruļvada paplašinājumu un sašaurinājumu. Enerģijas zudumus šajos elementos var aprēķināt teorētiski. Praktiskiem aprēķiniem nosaka attiecīgo vietējās pretestības koeficientu  $\zeta_{vp}$ , izmantojot empīriskas sakarības krasi izteiktam paplašinājumam (1) un sašaurinājumam (2):

5.

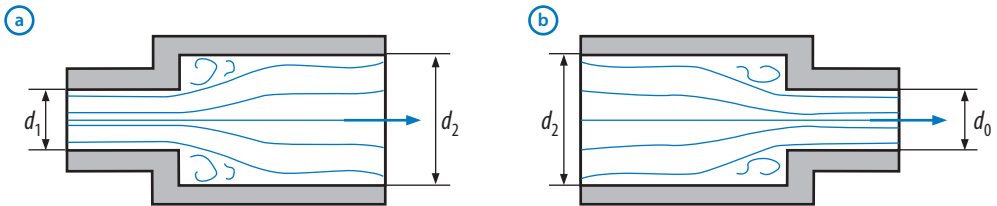
$$\zeta_{vp} = 1 - \left( \frac{w_2}{w_1} \right)^2 = \left( 1 - \frac{S_1}{S_2} \right)^2 = \left[ 1 - \left( \frac{d_1}{d_2} \right)^2 \right]^2, \quad (1)$$

$$\zeta_{vp} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{S_2}{S_1} \right) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^2 \right], \quad (2)$$

kur  $S_1, S_2$  – attiecīgie šķērsriezuma laukumi,  $m^2$ ;

$w_1, w_2$  – attiecīgie plūsmas ātrumi,  $m/s$ ;

$d_1, d_2$  – attiecīgie diametri,  $m$ .



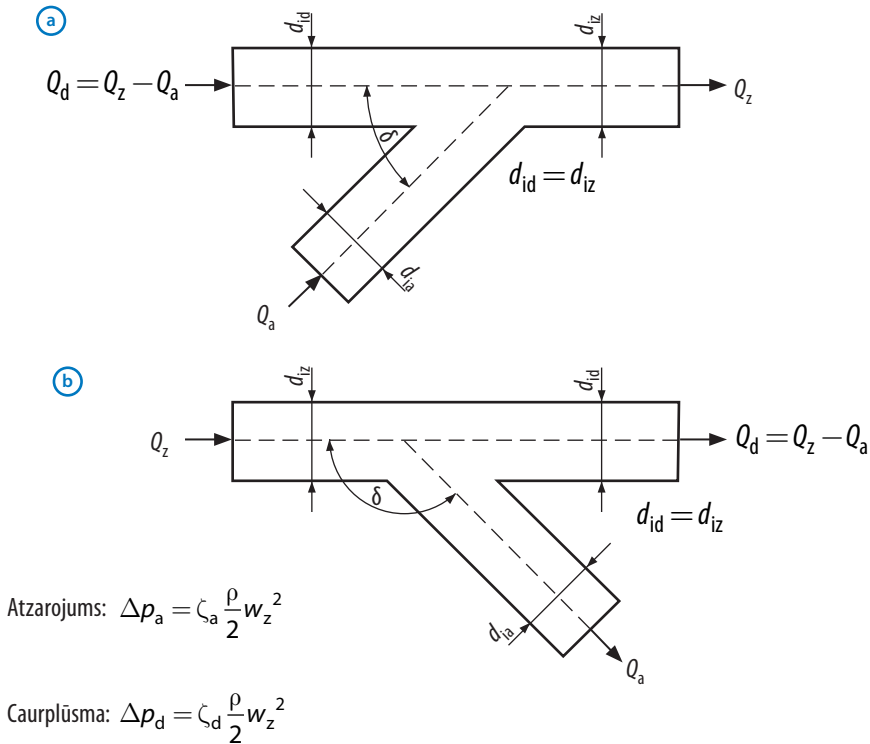
5.5. att. Krasi izteikts paplašinājums (a); un sašaurinājums (b).

Eksistē **Bordā–Karno teorēma** enerģijas zudumu noteikšanai, bet tā šeit netiks iztirzāta.

## Caurules sazarojums

Sadalot plūsmu divās daļās (skat. 5.6. att.), sazarojuma vietā veidojas ievērojams spiediena kritums plūsmas dalīšanās un virziena maiņas dēļ. Summārie plūsmas zudumi ir atkarīgi no dažādiem parametriem, it sevišķi no sazarojuma ģeometrijas un ražības caurulēs pēc sazarojuma. Aprēķinos lieto ražību vai ātrumu vēl nesadalītajai vai arī apvienotajai plūsmai.

Ja notiek divu plūsmu saplūšana, noteiktos apstākļos vienā no atzarojuma elementiem spiediens var pat pieaugt. Par iemeslu tam ir inžekcijas efekts, kas var rasties, ja, mainoties plūsmas apstākļiem, otrā atzarojuma elementā plūsmas ātrums pieaug vienlaicīgi samazinoties spiedienam (Bernulli princips).



5.6. att. Raksturīgās sakarības: (a) plūsmas sakļaušanās; (b) sadalījums caurulē.

Vietējās pretestības koeficientu skaitliskās vērtības caurules sazarojuma gadījumā atkarībā no atzarojuma leņķa, caurules diametra un plūsmu attiecībām parādītas 5.1. tabulā.

5.1. tabula

Vietējo pretestību koeficienta  $\zeta_{vp}$  vērtības atkarībā no atzarojuma leņķa, cauruļu diametra attiecības un plūsmas attiecības ( $Q_a/Q_z$  — ražības attiecība)

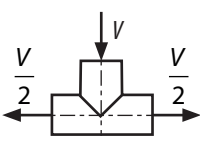
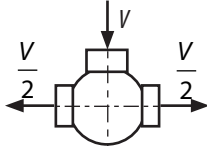
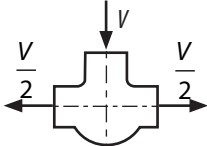
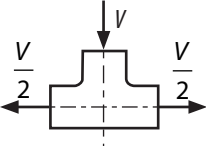
		Zarojuma leņķis $\delta$ , grādi								
		90°			120°			135°		
$Q_a/Q_z$		dzeta koeficients atzarojumā $\zeta_a$								
		cauruļu diametra attiecība, $d_{ia}/d_{iz}$								
	1,0	0,8	0,6	1,0	0,8	0,6	1,0	0,8	0,6	
	0,2	0,79	0,84	1,00	0,71	0,75	0,88	0,68	0,72	0,83
	0,4	0,74	0,88	1,31	0,57	0,69	1,07	0,51	0,61	0,98
0,6	0,81	1,05	1,89	0,53	0,75	1,53	0,43	0,64	1,4	
0,8	1,00	1,37	2,72	0,97	0,96	2,26	0,44	0,78	2,09	
1,0	1,3	1,82	3,81	0,75	1,27	3,26	0,54	1,06	3,05	
$Q_a/Q_z$		dzeta koeficients caurtecē, $\zeta_d$								
		cauruļu diametra attiecība $d_{ia}/d_{iz}$								
	1,0	0,8	0,6	1,0	0,8	0,6	1,0	0,8	0,6	
	0,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,4	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
0,6	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	
0,8	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	
1,0	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	

		Zarojuma leņķis $\delta$ , grādi								
		45°			60°			90°		
$Q_a/Q_z$		dzeta koeficients caurtecē, $\zeta_a$								
		cauruļu diametra attiecība $d_{ia}/d_{iz}$								
	1,0	0,8	0,6	1,0	0,8	0,6	1,0	0,8	0,6	
	0,2	-0,41	-0,31	-0,11	-0,4	-0,3	-0,09	-0,38	-0,28	-0,06
	0,4	-0,03	0,22	0,94	0,00	0,27	0,99	0,1	0,37	1,11
0,6	0,22	0,69	2,22	0,31	0,79	2,33	0,52	1,03	2,61	
0,8	0,35	1,09	3,73	0,51	1,27	3,93	0,89	1,69	4,43	
1,0	0,35	1,43	5,47	0,6	1,7	5,8	1,2	2,35	6,57	

		Zarojuma leņķis $\delta$ , grādi								
		45°			60°			90°		
$Q_a/Q_z$	dzeta koeficients atzarojumā, $\zeta_d$									
	cauruļu diametra attiecība $d_{iā}/d_{iz}$									
	1,0	0,8	0,6	1,0	0,8	0,6	1,0	0,8	0,6	
0,2	0,16	0,2	0,19	0,17	0,22	0,23	0,2	0,27	0,32	
0,4	0,17	0,17	0,03	0,22	0,26	0,18	0,35	0,46	0,54	
0,6	0,06	-0,04	-0,44	0,18	0,15	-0,1	0,47	0,6	0,71	
0,8	-0,18	-0,44	-1,22	0,04	-0,11	-0,62	0,56	0,7	0,82	
<b>1,0</b>	<b>-0,53</b>	-1,03	-2,32	<b>-0,19</b>	-0,51	-1,39	<b>0,62</b>	0,76	0,86	

5.2. tabula

Trejgabalu veidi un vietējās pretestības koeficienti

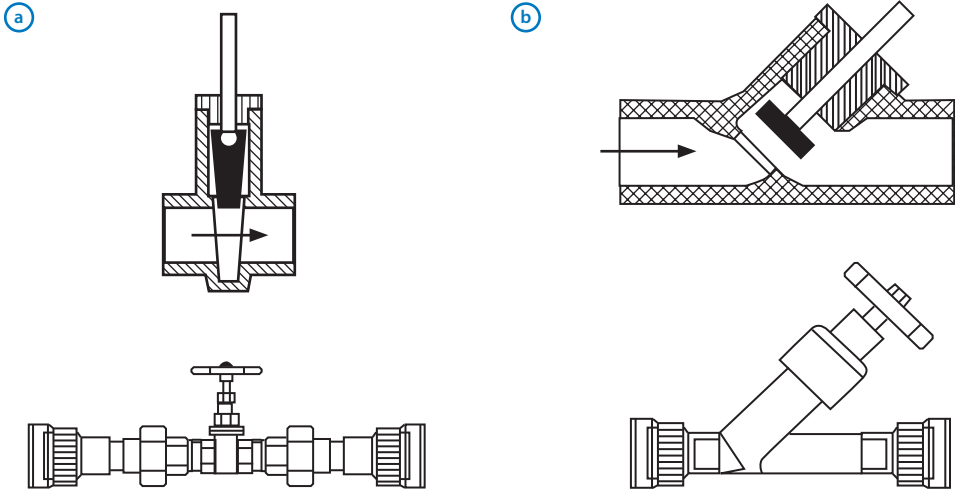
			
asu malu	sfērisks	sfērisks ar iekšēji noapaļotu kaklu	noapaļots ar taisnu apakšu
$\zeta_T = 1,3$	$\zeta_T = 5$	$\zeta_T = 0,9$	$\zeta_T = 0,7$

Ja plūsmas dalīšanai izmanto trejgabalus, tad, atkarībā no to formas, vietējās pretestības koeficientu vidējās vērtības parādītas 5.2. tabulā.

## Hidrauliskās pretestības koeficients cauruļvadu armatūras elementos

Laboratorijas darbā paredzēts noteikt vietējās pretestības koeficienta  $\zeta_{vp}$  vērtības divu veidu cauruļvadu armatūras elementiem: **aizbīdnim** un **taisnplūsmas** vārstam (skat. 5.7. att.).

Aizbīdņi kalpo, lai pilnībā noslēgtu vai atvērtu cauruļvadu plūsmu. Tie parasti netiek lietoti plūsmas regulēšanai. Aizbīdņos, griežot darbvārpstu noslēgšanas elements (ķilis vai disks) tiek pilnībā pacelts uz augšu, nodrošinot plūsmu maksimālo atveri. Ar vārstiem plūsmu var gan noslēgt, gan vienmērīgi regulēt. Kā noslēgšanas elements kalpo plūsmdalis, kas ir pievienots darbvārpstas galā un pieslēpēts vārstiņa sēžai. Griežot darbvārpstu, tā kopā ar plūsmdali pārvietojas uz augšu un uz leju.



5.7. att. Ķīļveida aizbīdnis (a) un taisnplūsmas ventilis (b) ar atbilstošo noslēdzošo armatūru.

## Ražības mērīšana ar mērdiafragmu un Venturi cauruli

Ražības  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] noteikšanai bieži izmanto mērdiafragmu un Venturi cauruli (skat. 5.8. att.). To darbības pamatā ir spiediena starpība, kas rodas sašaurinājumā. Caurplūstošo ražību var aprēķināt pēc formulas:

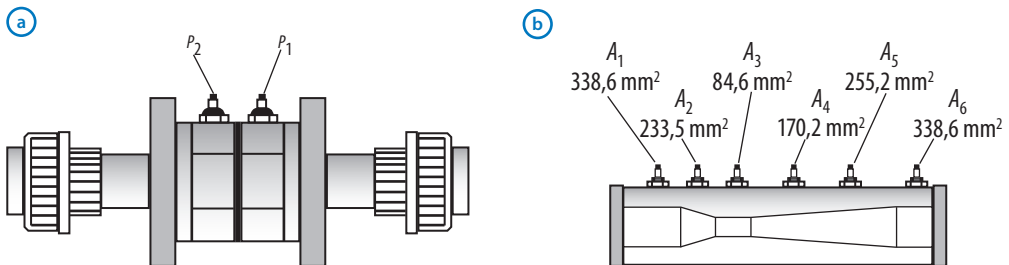
$$Q = \mu \varepsilon A_d \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}},$$

kur  $\varepsilon$  – izplešanās koeficients (pieņem, ka mērdiafragmai  $\varepsilon = 1$ );

$A_d$  – cauruma šķērsriezuma laukums, šeit  $268,8 \text{ mm}^2$ ;

$\mu$  – plūsmas jeb izteces koeficients,  $\mu = f(Re)$ , pieņem, ka Venturi caurulei  $\mu = 1$ , un mērdiafragmai  $\mu = 0,67$ ;

$\rho$  – plūstošās vielas blīvums,  $\text{kg}/\text{m}^3$ .



5.8. att. Mērdiafragma (a); Venturi caurule (b).

## 5.2. Darba uzdevumi

1. Eksperimentāli noteikt spiediena zudumus  $p_v$  un augstuma zudumus  $h_v$  plūsmas berzes dēļ.
2. Izpētīt cauruļu speciālo detaļu un piederumu ietekmi uz spiediena zudumiem:
  - a) līkumi,
  - b) sazarojumi,
  - c) šķērsriezuma maiņa,
  - d) ventiļi un vārsti.
 Noteikt atbilstošos hidraulisko pretestību koeficientus  $\zeta_{vp}$ . Salīdzināt eksperimentāli iegūtos datus ar teorētiski izrēķinātajiem un literatūrā atrodamajiem hidraulisko pretestību datiem.
3. Eksperimentāli noteikt iekārtas ražības maiņu atkarībā no plūsmas ceļā esošajām pretestībām.
4. Eksperimentāli noteikt ražības izmaiņu kādā posmā, ja atvērts ir arī cits posms. Salīdzināt iegūtos eksperimentālos datus ar atbilstošiem aprēķiniem.

Katru mērījumu nolasa ar abiem manometriem! Piemēram, ar labās puses manometru, tad ar kreisās un vēlreiz ar labās puses manometru un uzreiz salīdzina trīs iegūtās vērtības  $\Delta h$ . Ja tās atšķiras vairāk nekā par 10 %, veic papildus mērījumus. Tāpat arī tilpuma ražību nosaka uzreiz un, ja nepieciešams, veic papildus mērījumus. Mērījumus pieraksta, skat. 5.3. tabulu.

5.3. tabula

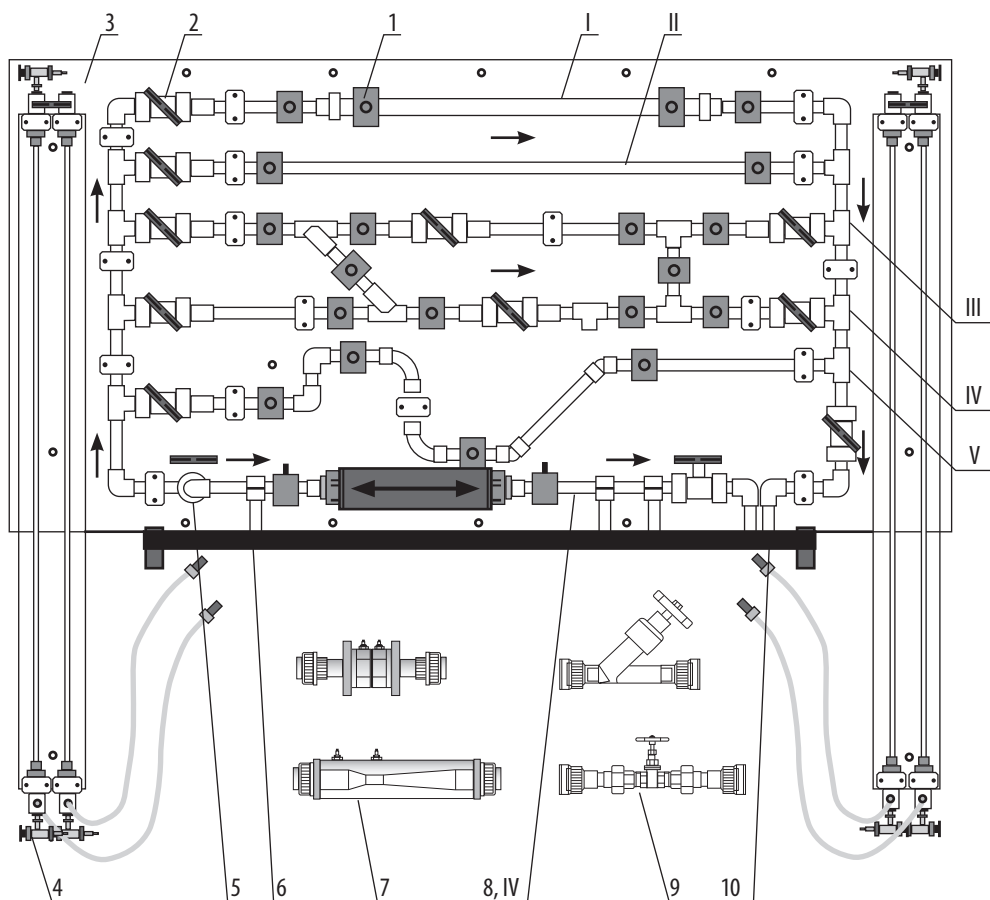
Mērījumu un aprēķinu rezultātu tabulas piemērs

Pretestība: paplašinājums; parametri: $d_1 = 17 \text{ mm}$ , $d_2 = 28,4 \text{ mm}$ , $l = 125 \text{ mm}$				
Mērījuma Nr.	1	2	3	Vidējais $\pm \sigma$
$V, \text{ L}$				-
$\tau, \text{ s}$				-
$Q, \text{ m}^3/\text{s}$				-
$w, \text{ m/s}$				-
$h_1, \text{ m}$				-
$h_2, \text{ m}$				-
$\Delta h = h_z, \text{ m}$				-



### 5.3. Iekārtas apraksts

Iekārta sastāv no polivinilhlorīda caurulēm, kas ir izvietotas kvadrātveidā uz paneļa (skat. 5.9. att.).



5.9. att. Iekārtas shēma: (1) gredzenveida kamera ar spiediena mērījumu vietu (nipeli); (2) lodveida krāni sekciju noslēgšanai; (3) aizmugurējais panelis; (4) manometrs; (5) ieplūde (apslēpta); (6) cauruļu stiprinājuma elementi; (7) plūsmas mērīšanas ierīces; (8) maināmie elementi; (9) dažāda noslēdzošā armatūra; (10) notece/izplūde; (I-IV) mērījumu sekcijas.

### 5.4. Darba gaita

Uz izslēgtas iekārtas pārlicinieties, ka veikli izdodas pieslēgt un atvienot manometrus ar spraudsavienojumiem. Manometrus pievieno, turot aiz spraudsavienojumu uzgriežņa, atvieno — spraudsavienojumu turot aiz kustīgās

muciņas. Ja manometru pieslēdz lēnām pie palaistas ūdens plūsmas, tad no savienojuma vietas pieslēgšanas brīdī var šļākties ūdens.

1. Ieslēdziet galveno ierīces slēdzi.
2. Pārbaudiet, ka **vārsts uz padeves caurules** (caurule, kas nāk no sūkņa) ir daļēji atvērts vai pilnīgi atvērts (atbilstoši nepieciešamajai ražībai).
3. Pārbaudiet, ka **vārsti sistēmā ir atvērti atbilstoši eksperimenta variantam** un pārējie ir aizvērti.
4. Atveriet abu manometru augšējos (atgaisošanas) un apakšējos (izteces) ventiļus.
5. Ieslēdziet sūkni.
6. **Plūsmas ražību** var nomērīt, aizverot tvertnes aizbidni pilnībā un uzņemot tvertnes piepildīšanās ātrumu.
7. Pievienojiet manometru ar spraudsavienojumiem pie vēlamajiem mērījumu punktiem uz stenda (pievieno – turot aiz uzgriežņa, atvieno – turot aiz kustīgās mucīņas).
8. Kad manometra pievadu un aizvadu caurulēs ūdens plūsmā vairs nav burbuļu, tad iestādiet ūdens līmeni tā, lai abās kolonnās tas būtu aptuveni mērījumu skalas vidū.
9. Aizveriet manometros atgaisošanas vārstus un vienlaicīgi aizveriet abus katra manometra noteces vārstus.
10. Nolasiet manometra rādījumus. Lai pārliecinātos par precīzu rezultātu, katru mērījumu jāveic vismaz trīs reizes ar dažādi pieslēgtiem manometriem, piemēram, ar labās puses manometru, tad ar kreisās un vēlreiz ar labās puses manometru. Salīdzina trīs iegūtās vērtības. Ja tās atšķiras par vairāk nekā 10 %, veic papildus mērījumus.
11. Pārvietojiet manometra pieslēgus uz nākamo eksperimenta variantu.
12. Kad viena eksperimentu sērija pie konstantas ražības ir pabeigta, ieregulējiet nākamo ražību, pārliecinieties kā tā vismaz par 30 % atšķiras no iepriekšējās (darba gaitas 6. punkts) un atkārtojiet eksperimentu sēriju (darba gaitas 7.–12. punkts).
13. Pēc eksperimentu sērijas beigām izslēdziet sūkni!
14. Atveriet manometru atgaisošanas un noteces vārstus un pārliecinieties, ka manometri ir pilnībā iztukšoti.
15. Izslēdziet iekārtas galveno slēdzi.

## Diferenciālā spiediena noteikšana

**Diferenciālā spiediena (spiediena starpības) mērīšana** parādīta 5.10. att. a. Šim nolūkam tiek aizvērts atgaisošanas vārsts. Virs abām ūdens kolonnām izveidojas gaisa spilvens ar spiedienu  $p_g$ . Tas ļauj veikt sekojošus mērījumus spiedieniem  $p_1$  un  $p_2$ :

$$p_1 = p_g + h_1 \rho g,$$

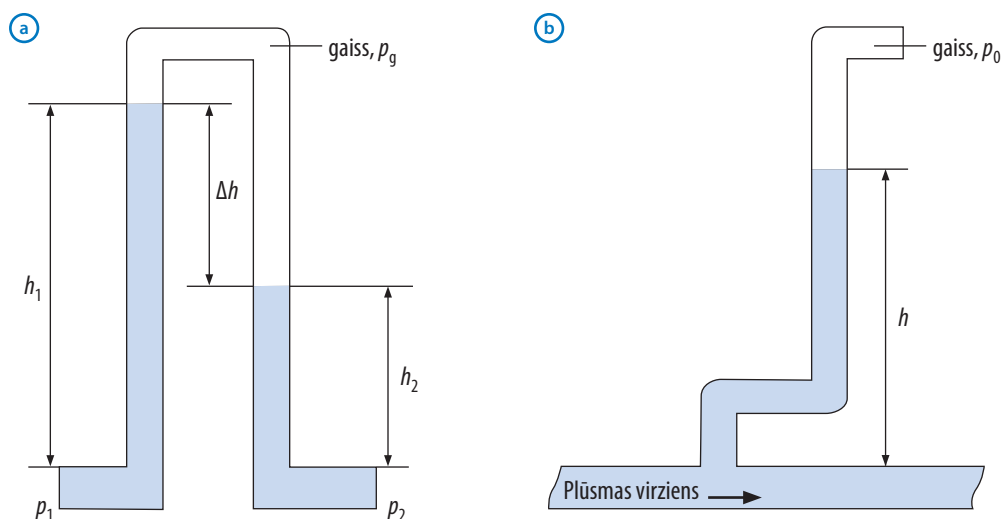
$$p_2 = p_g + h_2 \rho g.$$

No tā izriet:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = p_g + h_1 \rho g - p_g - h_2 \rho g.$$

Vienkāršojot šo izteiksmi, diferenciālais spiediens ir:

$$\Delta p = \Delta h \rho g.$$



5.10. att. (a) diferenciālā manometra shēma; (b) absolūtā spiediena noteikšana.

## Absolūtā spiediena noteikšana

Absolūtā spiediena mērīšana redzama 5.10. att. b. Absolūtā spiediena  $p_{\text{abs}}$  mērīšanai atgaisošanas ventis ir atvērts un tiek mērīts manometriskais spiediens. Spiediens  $p_g$  atbilst atmosfēras spiedienam  $p_0$ . Vispirms augstums  $h$

jāizmēra pirms pieslēgu pievienošanas pretestībai (nulles punkts) un tad pēc pievienošanas pretestībai. Augstums  $h$  ir augstums starp manometra pieslēga pievienošanas vietu uz iekārtas un ūdens līmeni manometrā. Absolūtais spiediens ir:

$$p_{\text{abs}} = p_0 + h\rho g.$$

## 5.5. Kontroljautājumi

1. Nosauciet trīs galvenos hidraulisko pretestību veidus!
2. Kāpēc rodas hidrauliskā pretestība, kādu plūsmas parametru tā maina?
3. Kādās vienībās izsaka hidrauliskās pretestības?
4. Nosauciet vietējās pretestības!
5. Vai caurules forma ietekmē hidrauliskās pretestības? Kādi vēl caurules raksturlielumi ietekmē hidrauliskās pretestības?
6. Kādi parametri raksturo likumus caurulēs?
7. Kāda tipa vārsti rada vislielākās hidrauliskās pretestības? Kādi – vismazākās?
8. Nosauciet trīs veidus, kā laboratorijas darbā var noteikt ražību!
9. Cik atmosfērām atbilst viens metrs ūdens staba?

## 6. Maisītājs

### 6.1. Teorētiskais pamatojums

Maisīšana ir viens no ķīmijas tehnoloģijas pamatprocesiem. Tās pamatuzdevums ir veicināt kontaktu starp dažādām fāzēm un iegūt viendabīgu (koncentrācijas vai temperatūras ziņā) vidi.

Maisīšanas operācijas var iedalīt sekojoši:

- homogenizācija — savstarpēji šķīstošu vielu samaisīšana, koncentrācijas un temperatūras gradienta izlīdzināšana;
- suspendēšana — cieto daļiņu vienmērīga izkliedēšana tilpumā;
- emulgēšana — savstarpēji slikti šķīstošu šķidrumu disperģēšana vienam otrā;
- aerācija — šķidrās un gāzveida fāzes maisīšana;
- siltumapmaiņas intensifikācija starp šķidrumu un sildvirsmu.

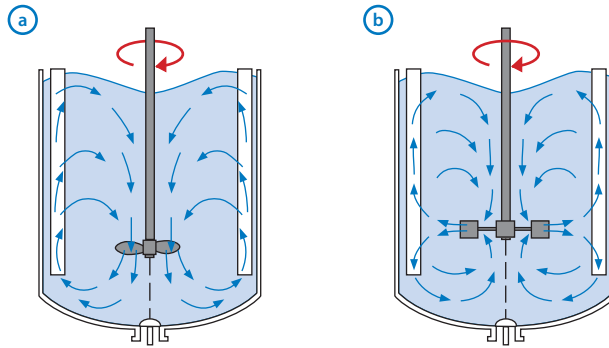
Maisīšana šķidrā vidē iedalās mehāniskajā un pneimatiskajā. Mehānisko maisīšanu veic ar dažāda veida maisītājiem, pneimatisko — ar gāzes palīdzību.

Maisīšanas procesa parametri, kas raksturo dažāda tipa maisītājus, ir maisīšanas intensitāte un efektivitāte. **Maisīšanas intensitāte**  $I$  ir spēja sasniegt noteiktu tehnoloģisko rezultātu noteiktā laikā  $I = f(\tau)$ . Intensīvāku maisīšanu veic tas maisītājs, kas pie vienāda apgriezīnu skaita ( $n = \text{const}$ ), īsākā maisīšanas laikā sasniedz to pašu rezultātu.

**Maisīšanas efektivitāte**  $E$  ir spēja sasniegt noteiktu tehnoloģisko rezultātu patērējot noteiktu darbu  $E = f(N, \tau)$ , kur  $N$  ir patērētā jauda. Efektīvāku maisīšanu veic tas maisītājs, kas patērējot mazāku darbu, sasniedz to pašu rezultātu.

### Mehānisko maisītāju veidi

Maisītājus var iedalīt pēc dominējošā plūsmas veida, kuru tie rada: aksiālie, radiālie un tangenciālie. **Aksiālie** maisītāji galvenokārt rada plūsmu maisītāja ass virzienā (6.1. att.). **Radiālie** veido šķidruma plūsmu virzienā prom no maisītāja ass uz trauka malām, savukārt **tangenciālie maisītāji** veido plūsmu maisītāja rotācijas virzienā pa trauka aploci.



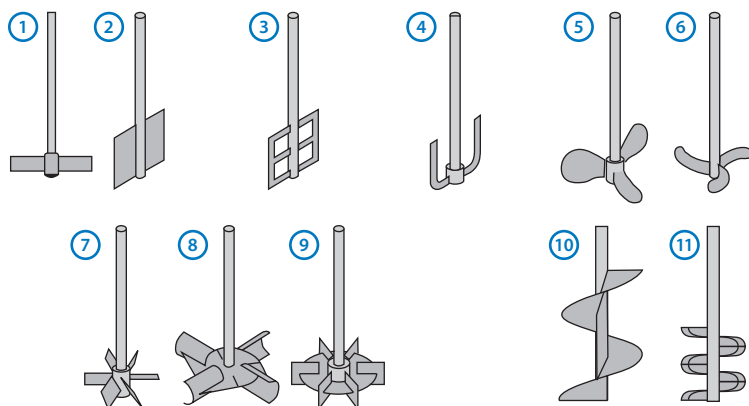
6.1. att. Maisītāju iedalījums pēc maisīšanā radītās plūsmas virziena: (a) propellera veida maisītājs — aksiāla plūsma; (b) turbīnas tipa maisītājs — radiāla plūsma.

Izmantojot pietiekami liela diametra maisītājus, kas iebūvēti trauka centrā, pie liela vārpstas apgriezību skaita, maisot šķidrumu ar nelielu viskozitāti, uz virsmas veidojas gaisa piltuve. Piltuve samazina maisīšanas efektivitāti, var veidoties putas, var tikt iesūkts gaiss, suspensijas var noslāņoties centrālās spēka ietekmē. Šos nevēlamos efektus var būtiski samazināt, gar tvertnes sienām izvietojot **atsitiena vairogus** (skat. 6.1. att.). Atsitiena vairogi ir garenas plāksnes, ko ievieto pie maisīšanas tvertnes sienām, lai novērstu šķidruma plūsmas rotāciju gar tām.

Pēc konstruktīvām pazīmēm mehāniskos maisītājus iedala:

- lāpstiņveida,
- propellerveida,
- turbīnveida,
- speciālajos maisītājos.

Daži maisītāju piemēri parādīti 6.2. att.



6.2. att. Mehānisko maisītāju veidi: (1, 2) – lāpstiņveida; (3) – rāmņveida; (4) – enkurveida; (5, 6) – propellerveida; (7, 8, 9) – turbīnveida; (10) – gliemežveida; (11) – lentveida.

**Lāpstiņu maisītājus** lieto mazviskozu ( $(1...2) \cdot 10^2$  Pa·s) šķidrumu maisīšanai, kā arī šķīdinot vai disperģējot cietas vielas ar mazu blīvumu. Konstruktijas ziņā lāpstiņu maisītāji ir vienkārši. Lāpstiņu novieto vertikāli vai slīpi pret kustības virzienu. Lāpstiņu slīpums atkarīgs no cietās fāzes blīvuma. Ja jāuzduļķo vai jāmaisa suspensijas, kur cietās fāzes blīvums lielāks par šķidruma blīvumu, tad, lai varētu izveidot augšup kāpjošo plūsmu, lāpstiņas izgatavo ar slīpumu, kas lielāks par  $90^\circ$  pret horizontu. Un otrādi — ja cieto daļiņu blīvums ir mazāks par šķidruma blīvumu, lieto lāpstiņas ar slīpumu, kas mazāks par  $90^\circ$ .

Lielās tvertnēs maisīšanai nav ieteicams lietot garas lāpstiņas, jo tas ievērojami palielina maisīšanai nepieciešamo jaudu. Izdevīgāk vienā tvertnē ievietot divus vai vairākus maisītājus ar neliela garuma lāpstiņām.

Lāpstiņu maisītājos vārpstas apgriezību skaits ir  $0,3...1,3$  (pat līdz 6,6) apgriezieni sekundē. Palielinot apgriezību skaitu virs minētā, maisīšanas efektivitāte samazinās.

Intensīvai siltuma apmaiņai un maisīšanai sistēmā šķidrums-šķidrums un šķidrums-cieta viela, ja šķidrās fāzes viskozitāte ir līdz  $5 \cdot 10^{-2}$  Pa·s, lieto maisītājus ar platām lāpstiņām jeb plākšņveida maisītājus.

Lāpstiņu maisītāju priekšrocības: viegli izgatavojami un lēti, derīgi šķiedrainu vielu maisīšanai un lēnai šķīdināšanai; lielos tilpumos ar tiem iespējams uzduļķot suspensijas, kurās cietās fāzes koncentrācija ir līdz 60 %.

Lāpstiņu maisītāju trūkumi: ja nav atsietena vairogu, maisīšanas laikā maisītāji rada dziļu gaisa piltuvi un iespējama maisāmas masas griešanās līdzī maisītājiem. Nav noderīgi viegli atslāņojamu suspensiju maisīšanai.

**Enkurveida maisītājus** izmanto nogulšņu pārvietošanai gar trauka sienām un siltuma apmaiņas veicināšanai. Maisītāja kontūra atbilst trauka formai. Enkurveida maisītājus izmanto ļoti viskozu vielu maisīšanai. Enkurveida maisītājs rada tangenciālu plūsmu, šķidrums kustība notiek galvenokārt pa aploci maisītāja griešanās virzienā. Šim maisītājam lamināra plūsma saglabājas ilgāk, salīdzinot ar pārējiem.

**Propellerveida maisītājos** lāpstiņu slīpums ir mainīgs ( $0\ldots 90^\circ$ ). Propellerveida maisītājiem raksturīga aksiāla plūsma — šķidrums kustība virzīta paralēli maisītāja asij. Maisītājam rotējot, lāpstiņas veicina šķidrums pārvietošanos visos virzienos un nodrošina augstu samaisīšanas efektivitāti. Šiem maisītājiem ir 2 līdz 4 (parasti 3) lāpstiņas. Pie liela maisīšanas ātruma veidojas gaisa piltuve, kuru var novērst, izmantojot atsietena vairogu.

Maza diametra tvertnēs ar lielu šķidrums slāņa augstumu, lai izveidotu plūsmu maisītāja ass virzienā, maisītājam izgatavo cilindrisku vai konisku apvalku — **difuzoru**. Ja maisīšanas laikā šķidrums silda vai atdzesē, tad difuzora funkcijas pilda glodenes. Ja šķidrums samaisīšana jāveic salīdzinoši dziļā tvertnē, tad uz vienas vārpstas dažādos līmeņos izvieto divus maisītājus. Liela tilpuma maisīšanai maisītāju novieto slīpi ( $10\ldots 20^\circ$  leņķī pret horizontu), līdz ar to samazinot gaisa piltuvi, kas rodas maisīšanas laikā.

Propellerveida maisītājus ieteicams lietot mazviskozu šķidrums maisīšanai, kā arī iegūstot emulsijas un uzduļķojot suspensijas, kurās cietā fāze ir līdz 10 % un daļiņu izmēri līdz 0,15 mm. Tos var lietot arī sistēmu šķidrums-gāze maisīšanai.

**Turbīnveida maisītāji** ir piemēroti nepārtrauktiem procesiem. Tos var izmantot mazviskozu un arī ļoti viskozu (līdz 450 Pa·s) šķidrums maisīšanai. Turbīnu maisītājiem raksturīga radiāla plūsma — šķidrums kustība notiek galvenokārt virzienā prom no ass pret trauka sienām. Uz darba rata ir 3 līdz 16 lāpstiņas.

Turbīnveida maisītājus izmanto šķidrums, suspensiju un arī sistēmu gāze-šķidrums maisīšanai. Turbīnas tipa maisītājiem bezdimensionālais jaudas kritērijs (saukts arī par jaudas skaitli) parasti ir no 2,5 līdz 6,5.

Pie **speciālajiem maisītājiem** pieder cilindriskie, lentes, diskveida un šķīvjuveida maisītāji u. c.

**Lentveida un gliemežveida maisītājus** lieto tad, ja jāmaisā ļoti viskozi šķidrums, piemēram, cementa java.

Maisīšanai nepieciešamā jauda, izmantojot mehāniskos maisītājus, ir atkarīga no daudziem faktoriem. Maisīšanai nepieciešamo jaudu iedala



iedarbināšanas jaudā  $N_p$  un darba jaudā  $N_d$ . **Iedarbināšanas jauda**  $N_p$  [W] maisītājiem summējas no divām daļām:

$$N_p = N_i + N_d,$$

kur  $N_i$  – jauda inerces pārvarēšanai, W;

$N_d$  – darba jauda (nepieciešama šķidrums berzes pārvarēšanai), W.

Vispārīgā veidā vienādojums maisītāja jaudas inerces pārvarēšanas noteikšanai ir:

$$N_i = a\rho n^3 d^5,$$

kur  $a$  – attiecīgo maisītāju raksturojošs koeficients;

$\rho$  – maisāmās vides blīvums,  $\text{kg/m}^3$ ;

$n$  – vārpstas apgriezienu skaits,  $\text{s}^{-1}$ ;

$d$  – maisītāja diametrs, m.

**Darba jauda**  $N_d$  ir jauda, ko maisītājs patērē vienmērīgā maisīšanas darba procesā. Tā ietver pārvarēto vides berzes pretestību un motora (tukšgaitas) jaudu. Darba jauda  $N_d$  atkarīga no vides dinamiskās viskozitātes  $\mu$ , blīvuma  $\rho$ , maisītāja apgriezienu skaita  $n$  un maisītāja diametra  $d_m$ . Maisītāja darba jaudu  $N_d$  aprēķina sekojoši:

$$N_d = 2\pi nM$$

kur  $M$  – griezes moments, N·m;

$n$  – apgriezienu skaits,  $\text{s}^{-1}$ .

Berzes pretestībai patērēto jaudu iegūst, atņemot no darba jaudas motora jaudu pie atbilstošā apgriezienu skaita. Motora jaudu iegūst veicot eksperimentu tukšgaitā – darbinot maisītāju tukšā iekārtā.

## Jaudas kritērijs

Jaudas novērtēšanai izmanto līdzības teorijas principus. Lai aprakstītu šķidruma kustību aparātā ar maisītāju, stacionāra procesa gadījumā var izmantot vispārīgu kritēriālo vienādojumu:

$$Eu = f(Re, Fr, G_1, G_2),$$

kur  $Eu$  – Eilera kritērijs;

$Re$  – Reinoldsa kritērijs (skaitlis);

$Fr$  – Frūda kritērijs;

$G_1, G_2$  – ģeometriskās līdzības simpleksi.

Aparātos ar rotējošu mehānisko maisītāju par noteicošo lineāro ģeometrisko izmēru pieņem maisītāja diametru  $d_m$ . Tā kā īsteno šķidrumu kustības ātrumu noteikt ir sarežģīti, šo lielumu aizstāj ar tam proporcionālu lielumu —  $nd_m$ , kur  $n$  — maisītāja apgriezību skaits. Rezultātā iegūstam modificētos vai centrālās līdzības kritērijus:

$$Re_c = \frac{\rho n d_m^2}{\mu}, \quad Fr_c = \frac{n^2 d_m}{g}, \quad Eu_c = \frac{\Delta p}{\rho n^2 d_m^2},$$

kur  $\rho$  — šķidruma blīvums,  $\text{kg/m}^3$ ;

$n$  — apgriezību skaits,  $\text{s}^{-1}$ ;

$d_m$  — maisītāja diametrs,  $\text{m}$ ;

$\mu$  — šķidruma viskozitāte,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;

$\Delta p$  — spiediena zudumi,  $\text{Pa}$ ;

$g$  — brīvās krišanas paātrinājums,  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

Ja  $Eu_c$  izteiksmē lielumu  $\Delta p$  aizvieto ar **patērēto jaudu**  $N$ , iegūst bezdimensionālu jaudas izteiksmi jeb **jaudas kritēriju**  $K_N$ :

$$K_N = \frac{N}{\rho n^3 d_m^5}.$$

Jaudas kritērijs ir konkrēto maisītāju raksturojošs lielums, ko var atrast rokasgrāmatās vai maisītāja tehniskajā specifikācijā. Tādējādi, zinot maisīšanas uzdevumu (maisāmo vielu raksturojumus un sasniedzamo rezultātu), izvēlas piemērotākos maisītāja tipus, kuriem pēc iepriekšējās izteiksmes nosaka konkrētā maisītāja patērēto jaudu. Parasti izvēlas maisītāju, kam nepieciešama vismazākā jauda konkrētā uzdevuma veikšanai.

Ģeometriskās līdzības gadījumā vispārīgais vienādojums mehāniskā maisītāja jaudas noteikšanai ir:

$$\frac{N}{\rho n^3 d_m^5} = C \left( \frac{\rho n d_m^2}{\mu} \right)^m \left( \frac{n^2 d_m}{g} \right)^k,$$

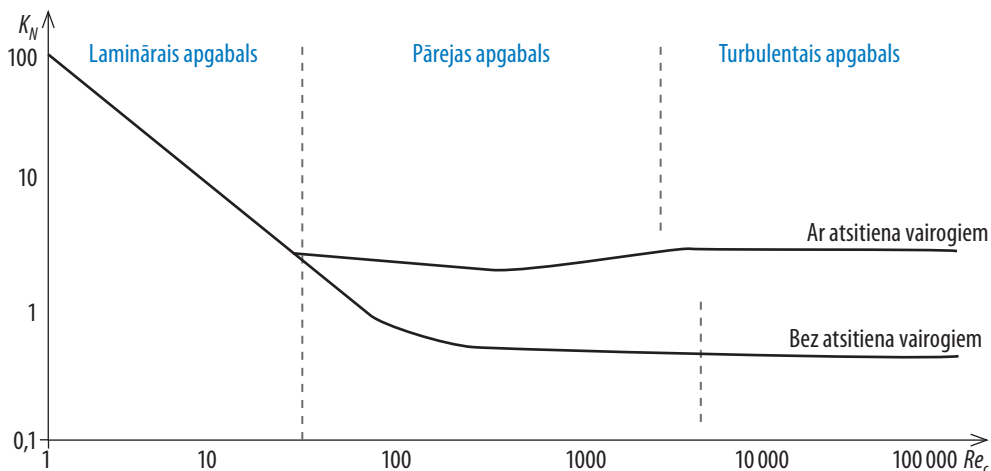
kur  $C$ ,  $k$ ,  $m$  — konstantes, ko nosaka eksperimentāli dažādiem maisītāju tipiem.

Smaguma spēks ietekmē piltuves un viņņu veidošanas uz šķidruma virsmas. Šis parādības var samazināt un pat novērst, uzstādot atsitienu vairogus. Šajos gadījumos smaguma spēka ietekme būs ļoti niecīga un to var neievērot. Jaudas kritērija izteiksme vienkāršojas:

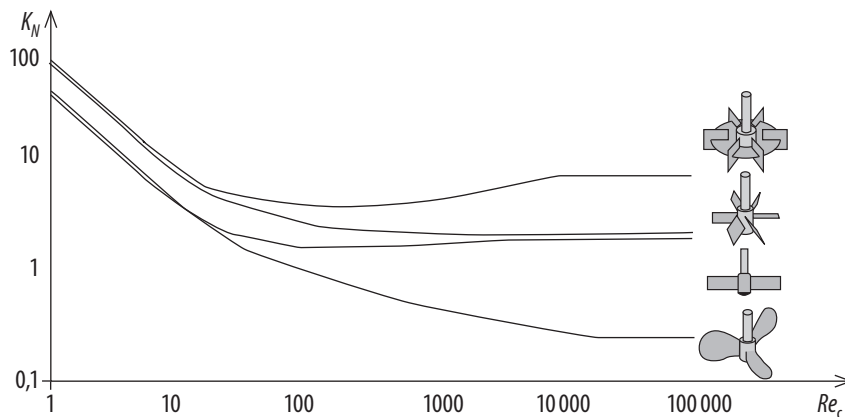
$$K_N = C Re_c^m.$$

Eksperimentālos datus parasti attēlo grafiski sakarības  $K_N = f(Re)$  veidā.

Tie nedaudz atšķiras, ievietojot atsitiena vairogus vai citus elementus tvertnē, (skat. 6.3. att.), kā arī dažādiem maisītāju tipiem (skat. 6.4. att.). Vislielākās izmaiņas vērojamas turbulentajā apgabalā.



6.3. att. Jaudas kritērija  $K_N$  atkarība no  $Re_c$  tvertnēs ar un bez atsitiena vairogiem.

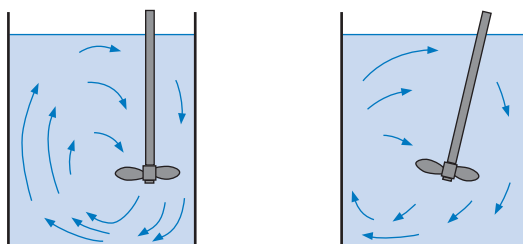


6.4. att. Jaudas kritērija  $K_N$  atkarība no  $Re_c$  maisīšanas tvertnē ar atsitiena vairogiem un dažādiem maisītājiem.

Grafikā  $K_N = f(Re)$  var novērot, kā jaudas kritērijs mainās atkarībā no plūsmas rakstura. Laminārajā apgabalā ( $Re < 10 \dots 60$ ) jaudas kritērijs lineāri samazinās, pieaugot Reynolds skaitlim. Laminārā režīmā parasti maisa ļoti viskozas vielas. Pārejas apgabalā pie minētajiem nosacījumiem viskozitāte un blīvums maisītāja jaudu ietekmē nedaudz.

Turbulentajā apgabalā ( $Re > 10^4$ ) jaudas skaitlis ir konstants. Šādu stāvokli sauc par **automodelo režīmu**. Turbulentas plūsmas iestāšanās ir atkarīga no vairākiem faktoriem un konkrēts  $Re$  skaitļa diapazons jānosaka empīriski. Jaudas skaitlis turbulentas plūsmas gadījumā (atbilstošajā grafika posmā veidojas taisne) ir atkarīgs no maisītāja un tvertnes konfigurācijas. Turbulentās plūsmas gadījumā samaisīšanās notiek strauji, procesu limitējošais faktors ir reakcijas vai masas pārneses ātrums.

Maisīšanas efektivitāti var uzlabot, mainot maisītāja novietojumu — novietojot to nevis trauka centrā, bet nedaudz novirzot to sāņus vai ievietojot to slīpi, kā parādīts 6.5. att.



6.5. att. Plūsmas trajektorija novietojot maisītāju nesimetriski.

## Faktori, kas ietekmē maisītāja jaudu

Maisīšanai nepieciešamo enerģiju palielina maisīšanas plūsmā ievietoti objekti, piemēram, atsitienu vairogi, glodenes, termometra caurules u. c. Tvertnēs ar plakanu dibenu enerģijas patēriņš ir lielāks nekā tvertnēs ar izliektu dibenu, turklāt tas palielinās, pieaugot šķidrums slāņa augstumam. Novietojot uz vienas vārpstas divus propellerveida maisītājus, enerģijas patēriņš pieaug apmēram 1,5 reizes.

## 6.2. Darba uzdevumi

1. Vizuāli novērot un raksturot maisīšanu atkarībā no maisītāja apgriezīnu skaita:
  - a) ja reaktorā nav ievietoti papildus elementi;
  - b) ja reaktorā ir ievietoti atsitienu vairogi un/vai glodene.
2. Noteikt eksperimentāli griezes momentu un attēlot grafiski sakarību  $K_N = f(Re)$ ; dažādus darba variantus pēc iespējas attēlot vienā grafikā. Noteikt maisītāja lamināro, pārejas un turbulento apgabalu raksturojošos Reynolds skaitļus, datus apkopot tabulā.

3. Novērtēt samaisīšanas kvalitāti un ilgumu atkarībā no maisītāja apgriezīnu skaita, šķīdinot ūdenī vielu X un mērot elektrovadītspēju  $\kappa$ . Rezultātus attēlot vienā grafikā  $\kappa = f(\tau)$ .
4. Uzzīmēt maisīšanas tvertnes shēmu, atlikt tajā būtiskos ģeometriskos izmērus.

Maisīšanas veidi:

- ar/bez atsītienu vairogiem;
- ar/bez glodenes;
- ar maisītāju Nr. 1...8;
- ar slīpi novietotu maisītāju.

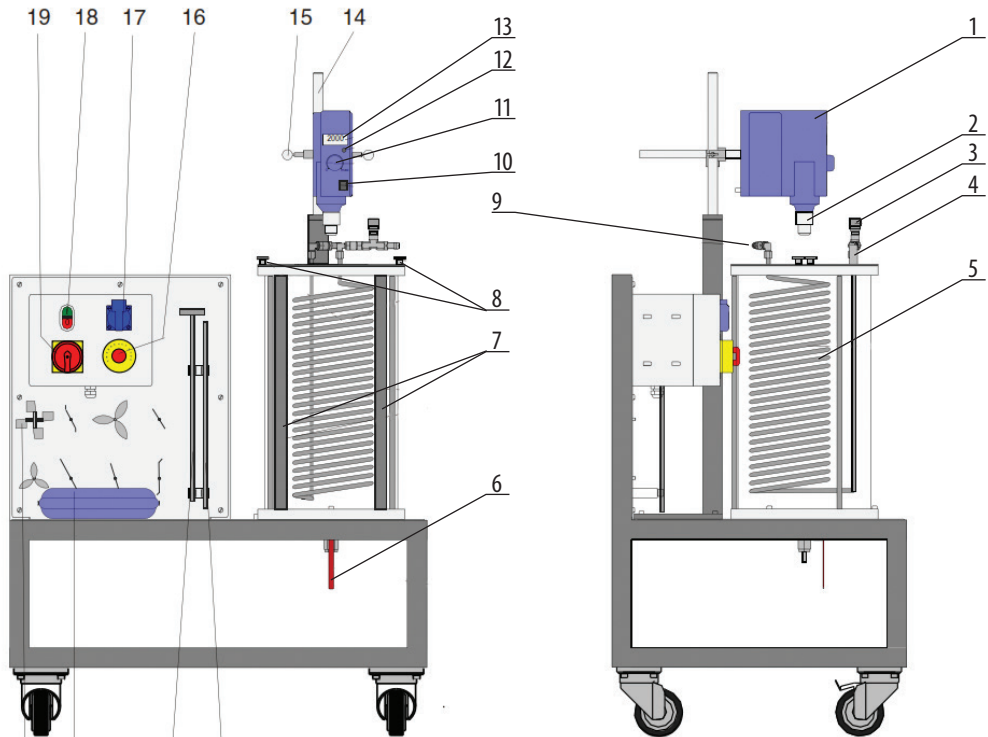
Temperatūras:

- sildot;
- dzesējot;
- nemainot temperatūru.

Process:

- vielas X šķīdināšana;
- suspensiju (viela A, B u. c.) uzduļķošana;
- emulsijas homogenizēšana.

### 6.3. Iekārtas apraksts



1 — laboratorijas maisītāja motors

2 — iestiprināšanas patrona

3 — plūsmas kontroles ventilis

4 — silta/auksta ūdens pievade

5 — glodene

6 — noteces krāns

7 — atsietna vairogi

8 — atsietna vairogu nostiprinošās skrūves

9 — siltā/aukstā ūdens izvade

10 — maisītāja motora ieslēgšanas/  
izslēgšanas slēdzis

11 — maisītāja ātruma regulators

12 — optiskais sensors

13 — laboratorijas maisītāja LCD ekrāns

14 — maisītāja motora statīvs

15 — spaiļe motora nostiprināšanai

16 — avārijas izslēgšanas slēdzis

17 — savienojums maisītājam

18 — iekārtas ieslēgšanas/izslēgšanas poga

19 — galvenais iekārtas slēdzis

20 — maisītāji

21 — elektrovadītspējas mērierīce ar zondi

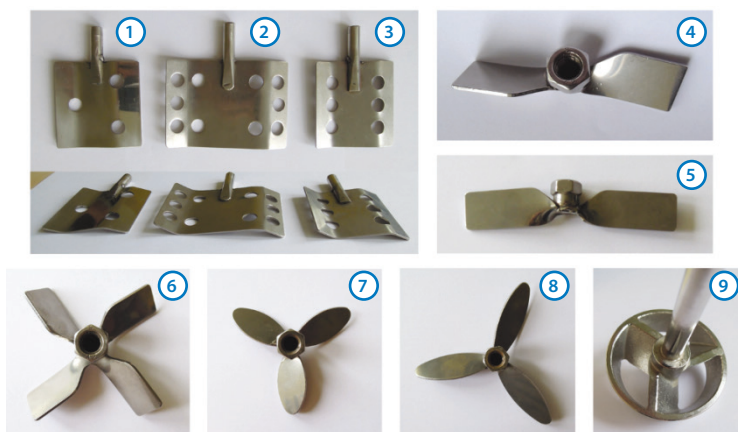
22 — turbīnveida maisītājs

23 — maisītāja ass

6.6. att. Iekārtas shēma.

## Maisītāju veidi

Iekārtas komplektācijā ietilpst deviņi dažādu tipu un izmēru maisītāji (skat. 6.7. att.).



6.7. att. Iekārtas komplektācijā ietilpstošie maisītāji: (1–5) plāksņu tipa maisītāji; (6) turbīnas tipa maisītājs; (7–8) propellera tipa maisītāji; (9) turbīnas tipa maisītājs ar difuzoru.

Iekārtas komplektā ietilpstošie maisītāju galvenie ģeometriskie izmēri:

1. plāksņu tipa maisītājs, 70 mm × 70 mm ar trim caurumiem;
2. plāksņu tipa maisītājs, 70 mm × 100 mm ar desmit caurumiem;
3. plāksņu tipa maisītājs, 70 mm × 70 mm ar sešiem caurumiem;
4. lāpstiņveida maisītājs, 2 lāpstiņas, lāpstiņu leņķis 45°, diametrs 70 mm;
5. lāpstiņveida maisītājs, 2 lāpstiņas, diametrs 70 mm;
6. lāpstiņveida maisītājs, 4 lāpstiņas, lāpstiņu leņķis 45°, diametrs 70 mm;
7. propellera tipa maisītājs, diametrs 70 mm;
8. propellera tipa maisītājs, diametrs 100 mm;
9. turbīnas tipa maisītājs ar difuzoru, diametrs 50 mm, vārpstas garums 350 mm.

## 6.4. Darba gaita



- Uzmanību! Pastāv risks gūt traumas no kustīgām iekārtas detaļām. Brīvi apgērba fragmenti, auklas, ķēdītes, gari mati var tikt aptīti ap maisītāju vai maisītāja asi.
- Lietot maisītāju pie tādiem apgriezieniem, lai notiktu būtiska vibrācija.

### Plūsmas rakstura novērojumi un maisītāja jaudas noteikšana

1. Reaktoru sagatavo atbilstoši darba variantam: uzstāda vai noņem glodeni un atsitiena vairogu.
2. Piepilda tvertni ar ūdeni.
3. Plūsmas vizualizācijai tvertnē ieber dažus mililitrus suspendējamās vielas (jonapmaiņas sveķus, PE graudiņus, smiltis).
4. Iestiprina darba variantam atbilstošo maisītāju.
5. Nolaiž maisītāju nepieciešamajā dziļumā.
6. Ieslēdz galveno slēdzi (19).
7. Ieslēdz maisītāja strāvas padevi (18).
8. Ieslēdz maisītāja motoru (10).
9. Uzstāda eksperimentā norādīto minimālo maisītāja griešanās ātrumu (11).
10. Novēro suspendētās vielas kustību un uzskicē vai apraksta — daļiņu atrašanās vietu, sadalījuma vienmērību tvertnē (piemēram, maksimālo pacelšanās augstumu), piltuves dziļumu u. c. Jāpieraksta tādi dati, lai secinājumos varētu salīdzināt un analizēt daļiņu kustību dažādiem darba variantiem.
11. Uzstāda nākamo maisītāja griešanās ātrumu (intervāls 50...100 apgr./min). Mērījumus veikt tikai līdz notiek pilnīga samaisīšanās. Nelietot maisītāju pie tādiem apgriezieniem, kad veidojas būtiskas vibrācijas.
12. Vispirms nosaka motora brīvgaits griezes momentu mērījumiem tukšā tvertnē (vai paceļot maisītāju virs šķidrums līmeņa).
13. Darba jaudai nepieciešamo faktisko griezes momentu nosaka, pagaidot, kamēr šķidrums maisīšana kļūst vienmērīga jeb tvertnē iestājas stacionārs režīms.
14. Lai iegūtu faktisko griezes momentu pie nākamā apgriezienu skaita, maisītāju uz brīdi izslēdz, tad ieslēdz un darbu turpina.



15. No griezes momenta aprēķina darba jaudu un jaudu berzes pārvarēšanai. Aprēķina  $K_N$  un  $Re_c$ , konstruē  $K_N = f(Re_c)$  grafiku. Labākai grafika analīzei attēlot posmu, kurā  $Re > 10$ .

Laboratorijas maisītājs faktisko griezes momentu parāda ekrānā tikai optiskās pogas (12) nospiešanas brīdī pirmajā reizē pēc maisītāja ieslēgšanas. Pēc tam tiek rādīta griezes momentu izmaiņa no pogas nospiešanas brīža. Ja rādījums svārstās konkrētās robežās, tad to var uzskatīt par faktiskās jaudas mērījuma precizitāti.

Rezultātus apkopo tabulās. Tālāk doti tabulu piemēri (tabulas 6.1., 6.2. un 6.3), kuri jāpielāgo eksperimenta rezultātiem pēc vajadzības.

6.

6.1. tabula

Plūsmas rakstura novērojumi maisīšanas procesā, tabulas piemērs

Maisītāja veids: lāpstiņu skaits: ....., $D = \dots\dots\dots$ mm; Atsietena vairogi: ir/nav Glodene: ir/nav		Tilpums: Daļiņu veids: Maisītāja pozīcija: $H = \dots\dots\dots$ cm $\alpha$ (leņķis starp maisītāja lāpstiņām) = .....°	
Novērojumi			
$n$ , apgr./min: Kustības raksturojums: $H$ , cieto daļiņu pacelšanās augstums, cm; $Z$ , gaisa piltuves dziļums, cm; $M$ , griezes moments, N·cm.		Skats no sāna	Skats no augšas

6.2. tabula

Maisītāja jaudas mērījumu un aprēķinu tabulas piemērs

$n$ , apgr./min	Griezes moments $M$ , N·cm	Jaudas kritērijs $K_N$	Reinoldsa kritērijs $Re$	Frūda kritērijs $Fr$
100				
200				
300				
400				
500				

## Sāļu šķīdināšana, elektrovadītspējas noteikšana

### Darba uzsākšana

1. Sagatavot reaktoru atbilstoši darba variantam (uzstādīt vai noņemt gļo-  
deni un atsitiena vairogus).
2. Piepildīt reaktoru ar ūdeni līdz vēlamajam līmenim.
3. Iestiprināt X maisītāju.
4. Ieslēgt galveno slēdzi (19).
5. Ieslēgt maisītājas strāvas padevi (18).
6. Ieslēgt maisītāju.
7. Ieregulēt vēlamo maisītāja ātrumu (apgr./min).

6.

### Darba gaita

1. Nolasa un pieraksta elektrovadītspēju un temperatūru, lietojot elektrova-  
dītspējas mērierīci.
2. Iebērt ūdenī ..... g vielas:.....
3. Nolaist un nofiksēt maisītāju.
4. Ieslēgt maisītāju.
5. Nolasīt elektrovadītspējas un temperatūras rādījumus ik minūti, līdz ie-  
stājas stacionārs režīms.

### Darba beigšana

1. Izslēdz maisītāju, maisītāja strāvas padevi un galveno slēdzi.
2. Paceļ maisītāju virs tvertnes.
3. Iztukšo reaktoru, savāc cietās daļiņas.
4. Izskalo tvertni ar ūdens strūklu, noskalo arī maisītāju un maisītāja asi.

Maisītāja jaudas mērījumu un aprēķinu tabulas piemērs

Maisītāja veids: lāpstiņu skaits: ..... , $D = \dots\dots\dots$ mm; Atsitiena vairogi: ir/nav Glodene: ir/nav				Tilpums: Šķīdin. viela: Masa: .....g $T: \dots\dots^\circ\text{C}$		Maisītāja pozīcija: $H = \dots\dots\dots$ cm $\alpha = \dots\dots\dots^\circ$	
200 apgr./min		300 apgr./min		400 apgr./min		500 apgr./min	
$\tau$ , min	$k$ , mS/cm	$\tau$ , min	$k$ , mS/cm	$\tau$ , min	$k$ , mS/cm	$\tau$ , min	$k$ , mS/cm

6.

## 6.5. Kontroljautājumi

1. Kas ir šķidrums, šķīdums, suspensija, emulsija? Nosaukt piemērus.
2. Vai maisīšanas ātrums un ilgums ietekmē samaisīšanās kvalitāti?
3. Kādi parametri jāņem vērā, izvēloties konkrētajam procesam maisītāju?
4. Kādi parametri raksturo maisītāju?
5. Kādi ir maisīšanas pamatuzdevumi?
6. Kāda var būt plūsmas virzieni tvertnē maisīšanas procesā?
7. Kā maisīšanu ietekmē tvertnē ievietoti elementi (sildelementi, temperatūras un līmeņa sensori, atsitiena vairogi)?
8. Nosaukt maisītāju tipus, kas paredzēti mazviskozu šķidrumu maisīšanai!
9. Nosaukt maisītāju tipus, kas paredzēti viskozu šķidrumu maisīšanai!
10. Kādi kritēriālie lielumi raksturo maisīšanu?
11. Kas ietekmē maisītājam nepieciešamo jaudu?
12. Kā iespējams uzlabot samaisīšanās kvalitāti katram no maisītāju ti-  
piem?

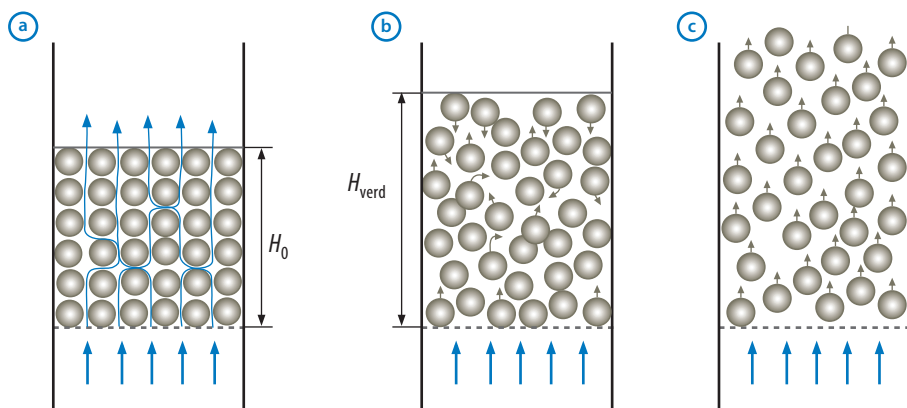
## 7. Verdošais slānis

### 7.1. Teorētiskais pamatojums

#### Ķermeņa pārvietošanās šķīdumā (gāzē)

Ķīmijas tehnoloģijas procesos bieži notiek gāzes vai šķīduma plūsmas mijiedarbība ar graudainu, dispersu cietu materiāla slāni (žāvēšana, heterogēnā katalīze, adsorbīcija (t. sk. smalku daļiņu pārklājumu veidošana), ekstrakcija, termiskā apstrāde vai strauja sasaldēšana, degšanas procesi u. c.). Minētos procesus realizē iekārtās ar **verdošo slāni**. Verdošā slānī, intensīvi sajaucoties gāzei vai šķīdumam un cietai vielai, ievērojami paātrinās masas pārnese, siltuma un ķīmiskie procesi.

Graudainos slāņus veido nogulsnes, sasmalcināts (līdz zināmam raupjumam) apstrādājama materiāls, katalizators vai speciāli aparātā iepildīti dažādas formas ķermeņi (pildījums). Ja caur graudainu slāni no apakšas transportē gāzes vai šķīduma plūsmu, vienmērīgi palielinot plūsmas ātrumu  $w$  (m/s), ir novērojami trīs stāvokļi, skat. 7.1. att.



7.1. att. Graudainā slāņa stāvokļi: (a) nekustīgs slānis; (b) verdošais slānis; (c) pneimotransports.

Nekustīgs jeb stacionārs pildījuma slānis (7.1. att. *a*). Sākot sasmalcinātu materiālu slānī virs režģa augstumā  $H_0$  un laižot tam cauri gāzi (vai šķīdumu) ar nelielu ātrumu, nekādas redzamas izmaiņas nenotiek, jo gāze (vai šķīdums) filtrējas cauri graudainā slāņa kanāliem.

Sasniedzot noteiktu plūsmas ātrumu, ko sauc par **pirmo kritisko ātrumu**  $w'_{kr}$ , plūstošās vides spiediens kļūst lielāks par slāņa spiedienu, kopējais cieto

daļiņu slāņa aizņemtā tilpums palielinās, tās sāk intensīvi cirkulēt un rotēt ap savu asi. Tādējādi ir izveidojies **verdošais (suspendētais jeb pseidosasšķidrinātais) slānis** (7.1. att. b). Slāņa augstums pēc pirmā kritiskā ātruma  $w'_{kr}$  sasniegšanas ir izmainījies no  $H_0$  līdz  $H_{verd}$ . Šādu graudainā slāņa izkliedēšanu ar gāzes (vai šķidrums) palīdzību sauc arī par pseidosasšķidrināšanu jeb fluidizāciju.

Turpinot palielināt gāzes (vai šķidrums) ātrumu un sasniedzot otro kritisko ātrumu  $w''_{kr}$ , sākas **pneimotransports** — daļiņas kopā ar gāzi (vai gadījumā, kad vide ir ūdens — hidrotransports) tiek transportētas prom no iekārtas (7.1. att. c).

Graudainais slānis var sastāvēt no viena izmēra graudiem — **monodisperss** slānis — vai no dažāda izmēra graudiem — **polidisperss** slānis. Graudainos slāņus raksturo **porainība** jeb īpatnējais brīvais tilpums  $\varepsilon$ , t. i., tukšumu tilpums kubikmetros, kas atrodas 1 m<sup>3</sup> graudainā slāņa.

Ja slānī ar tilpumu  $V$  (m<sup>3</sup>) ir  $V_t$  (m<sup>3</sup>) tukšumu, tad **slāņa porainība**  $\varepsilon$  ir:

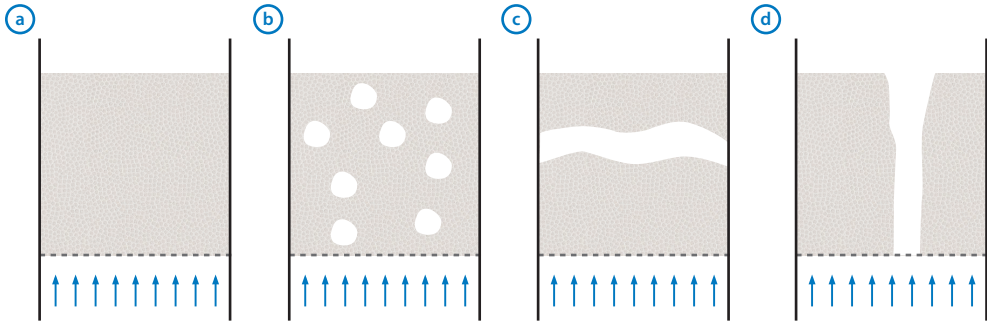
$$\varepsilon = \frac{V_t}{V}.$$

**Stacionāra slāņa porainību** apzīmē ar  $\varepsilon_0$ . Ja stacionāro slāni veido lodītes, tad  $\varepsilon_0 = 0,4$ . Rūpniecības iekārtās verdošajam slānim porainība mainās no  $\varepsilon = 0,55$  līdz  $\varepsilon = 0,75$ .

Daudzos ķīmijas tehnoloģijas procesos jāiegūst laba saskare starp cieto fāzi un gāzveida (šķidro) fāzi, piemēram, katalīzes un sorbcijas procesos, kā arī apdedzinot iežus, žāvējot, dedzinot kurināmo u. c. Šādos procesos ir ļoti svarīgi, lai cietā fāze būtu smalka. Ļoti smalkai cietajai fāzei (putekļiem) būs liela saskarsmes virsma, bet ātri tiks sasniegts otrais kritiskais ātrums  $w''_{kr}$ . Jo smalkāks materiāls, jo lielāka kopējā saskares virsma starp fāzēm — līdz ar to process uz virsmas noris daudz intensīvāk. Atkarībā no disperso daļiņu īpašībām un gāzes plūsmas ātruma ir sastopami dažādi graudainā slāņa veidi (skat. 7.2. att.):

- suspendētam graudainam slānim tāpat kā šķidrumam ir noteikts tilpums. Slāņa vienmērīga kustēšanās līdzinās šķidrums viršanai. Tāpēc to sauc par verdošo slāni. Slānim ir **vienmērīgs cieto daļiņu sadalījums** pa visu aparāta tilpumu;
- slānis var virst arī nevienmērīgi ar dažādiem defektiem, piemēram, veidojas burbuļi. Burbuļi veicina intensīvu daļiņu slāņa sajaukšanos;
- neliela diametra aparātos burbuļi, kas veidojas tieši virs režģa, saplūst kopā. Tādējādi izveidojas gāzes virzulis (spilvens), kas pārvieta uz augšu daļiņas. Šādu slāņa suspendēšanu sauc par virzuļveida suspendēšanu;

d) ja daļiņas ir sīkas vai tām piemīt tieksme veidot aglomerātus, var rasties slāņa caurrāvumi, kad gāze pārvietojas pa izveidotajiem kanāliem. Šajā gadījumā gāzes un graudainā slāņa sajaukšanās intensitāte ir vismazākā no aplūkotojiem gadījumiem.

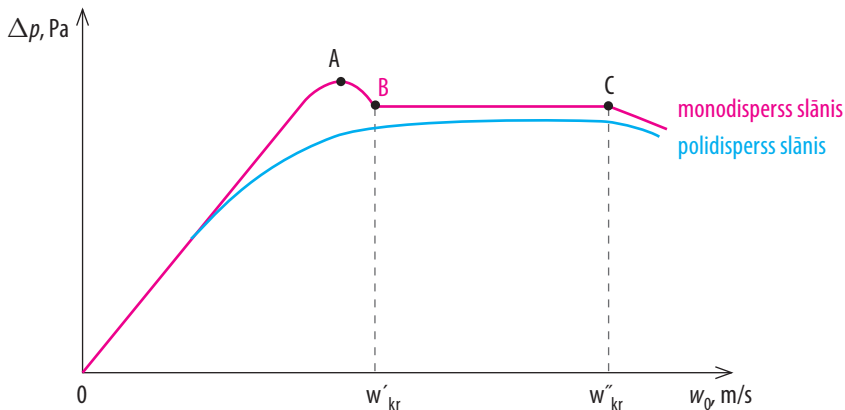


7.2. att. Suspendēta graudainā slāņa veidi.

7.

### Suspendētā slāņa hidrauliskā pretestība

Suspendētā graudainā slāņa raksturošanai izmanto slāņa hidraulisko pretestību. Graudainā slāņa hidrauliskā pretestība ir atkarīga no gāzes (šķidruma) plūsmas ātruma (7.3. att.). Atliekot uz ordinātas slāņa pretestību  $\Delta p$ , bet uz abscisas gāzes plūsmas fiktīvo ātrumu  $w_0$ , iegūst attēlā redzamo līkni. Par **fiktīvo ātrumu** sauc ātrumu, ko iegūst plūsmas patēriņu ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) attiecinot pret tukša aparāta pilnu šķērsriezuma laukumu ( $\text{m}^2$ ). Patiesībā plūsmas ātrums  $w$  tukšumos starp slāņa daļiņām vienmēr būs lielāks nekā fiktīvais ātrums, bet to ir grūti praktiski noteikt.



7.3. att. Suspendētā graudainā slāņa hidrauliskās pretestības līknes.

Visuzskatāmāk viršanas efekts novērojams **monodispersam graudainajam slānim** (7.3. att.). Posmā 0A graudainais slānis ir nekustīgs. Slāņa pretestība, pieaugot plūsmas ātrumam, pieaug lineāri. Pārejas brīdī no nekustīga uz suspendētu slāni novērojams spiediena maksimums (punkts A), kas saistīts ar berzes un ar inerces spēku pārvarēšanu. Aiz punkta B graudainais slānis ir suspendēts. Sustendētā slāņa hidrauliskā pretestība  $\Delta p$  [Pa] paliek nemainīga.

Suspendētā slāņa pretestība (7.3. att.) pieaug līdz brīdim, kad rodas suspendētais slānis (punkts B) jeb gāze sasniegusi pirmo kritisko ātrumu  $w'_{kr}$ . Suspendētam slānim pretestība nemainās ( $\Delta p = \text{const}$ ) līdz plūsmas ātrums sasniedz otro kritisko ātrumu  $w''_{kr}$  (punkts C). Palielinot plūstošās vides fiktīvo ātrumu virs  $w''_{kr}$ , suspendētais slānis beidz eksistēt un graudi tiek transportēti laukā no aparāta. Sākas **pneimotransports** (vai gadījumā, kad vide ir ūdens — hidrotansports). Slāņa porainība  $\epsilon$  tuvojas vienam.

7.

**Graudainā slāņa hidrauliskā pretestība**  $\Delta p$  [Pa] ir atkarīga no graudainā slāņa masas  $m$  [kg] un iekārtas šķērsriezuma laukuma  $S$  [m<sup>2</sup>]:

$$\Delta p = \frac{mg}{S}.$$

**Graudainā slāņa masu**  $m$  [kg] var izteikt šādi:

$$m = S(\rho_m - \rho)(1 - \epsilon_0)H_0,$$

kur  $H_0$  – nekustīga slāņa augstums, m;  
 $\rho_m$  – materiāla blīvums, kg/m<sup>3</sup>;  
 $\rho$  – gāzes blīvums, kg/m<sup>3</sup>;  
 $\epsilon_0$  – stacionāra (nekustīga) slāņa porainība.

**Stacionāra slāņa porainība**  $\epsilon_0$  ir attiecība starp materiāla blīvumu  $\rho_m$  un slāņa blīvumu  $\rho_{sl}$ :

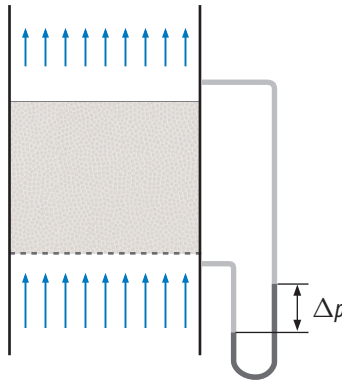
$$\epsilon_0 = 1 - \frac{\rho_m}{\rho_{sl}}.$$

Līdz ar to **hidrauliskā pretestība**  $\Delta p$  [Pa] ir:

$$\Delta p = g(\rho_m - \rho)(1 - \epsilon_0)H_0,$$

kur  $g$  – brīvās krišanas paātrinājums, 9,81 m/s<sup>2</sup>.

Pēdējais vienādojums izsaka hidrostatikas likumu — spiediens jebkurā šķidrums punktā ir vienāds ar īpatnējā svara un slāņa augstuma reizinājumu. Tas norāda uz suspendētā graudainā slāņa un šķidrums analogiju.



7.4. att. Graudainā slāņa pretestības noteikšana.

7.

**Polidispersa graudainā slāņa** gadījumā pāreja no nekustīga slāņa uz suspendētu slāni nenotiek tik krasi kā monodispersām daļiņām (7.3. att.). Vispirms suspendē sīkās daļiņas, pēc tam — rupjākās. Graudainā slāņa augstums līdz pirmajam kritiskajam ātrumam paliek nemainīgs, pēc tam palielinās.

### Kritisko ātrumu aprēķināšana

Pirmā kritiskā ātruma  $w'_{kr}$  noteikšanai eksistē virkne empīrisku un teorētisku sakarību. Monodispersa slāņa gadījumā, ja daļiņu forma tuvojās lodei ( $\epsilon_0 \approx 0,4$ ), var izmantot O. Todesa atrasto sakarību starp bezdimensionālajiem kritērijiem, kas raksturo procesu un materiālu fizikālos parametrus. **Pirmo kritisko ātrumu atrod izmantojot Reinoldsa kritēriju:**

$$Re'_{kr} = \frac{w'_{kr} d_d}{\nu} = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}},$$

kur  $Ar$  – Arhimēda kritērijs:

$$Ar = \frac{g d_d^3 \rho (\rho_m - \rho)}{\mu^2} = \frac{g d_d^3}{\nu^2} \cdot \frac{(\rho_m - \rho)}{\rho},$$

kur  $\rho_m$  – daļiņu blīvums,  $\text{kg/m}^3$ ;

$d_d$  – daļiņu diametrs, m;

$\rho$  – vides blīvums,  $\text{kg/m}^3$ ;

$\mu$  – vides dinamiskā viskozitāte, Pa·s;

$\nu$  – vides kinemātiskā viskozitāte,  $\text{m}^2/\text{s}$ .



Otro kritisko ātrumu atrod no sekojošām  $Re$  vērtībām:

$$Re_{kr}'' = \frac{w_{kr}'' d_d}{\nu} = \frac{Ar}{18 + 0,16\sqrt{Ar}}$$

## 7.2. Darba uzdevumi

1. Uzņemt kalibrēšanas likni tukšai iekārtai (bez graudainā slāņa pildījuma).
2. Salīdzināt viršanas procesu norisi atbilstoši darba variantam un raksturot viršanas dabu, kā arī raksturīgos viršanas parametrus: slāņa augstuma izmaiņu, hidraulisko pretestību, kritiskos ātrumus.

7.

Noteikt pirmo un otro kritisko ātrumu:

- a) vizuāli (vizuālos vērojumus pierakstīt tabulā pēc iespējas izsmeļoši, lai vieglāk salīdzināt ar grafiskajiem un teorētiskajiem datiem);
- b) grafiski no spiediena zudumu un augstuma izmaiņas (lai grafiks būtu precīzāks, ieteicams pārlietuma vietā mērījumus veikt biežāk, savukārt taisnes apgabalā — retāk, lai darbs raitāk virzītos);
- c) teorētiski aprēķinot (ja vielai daļiņu izmērs dots intervālā, tad noteikt vidējo, minimālo un maksimālo izmēru daļiņu viršanas ātrumu; polidispersām vielām viršana sākas pakāpeniski, tāpēc jāsalīdzina ir intervāli, nevis konkrēts punkts).

Salīdzināt iegūtās vērtības, atzīmējot grafikā arī vizuāli un teorētiski noteiktās kritisko ātrumu vērtības. Secinājumos spriest par katras metodes kļūdu avotiem un viršanas rakstura ietekmi uz rezultātiem.

### Darba varianti

1. Salīdzināt viršanas procesa norisi:
  - a) pie dažādiem slāņa augstumiem (piemēram, 3 cm, 6 cm, 12 cm un 24 cm);
  - b) dažādiem daļiņu izmēriem;
  - c) dažādiem materiāliem;
  - d) atšķirīgās vidēs — gaisā un ūdenī.
2. Raksturot daļiņu viršanas dabu un raksturīgos viršanas parametrus: slāņa augstuma izmaiņu, hidraulisko pretestību, kritiskos ātrumus.

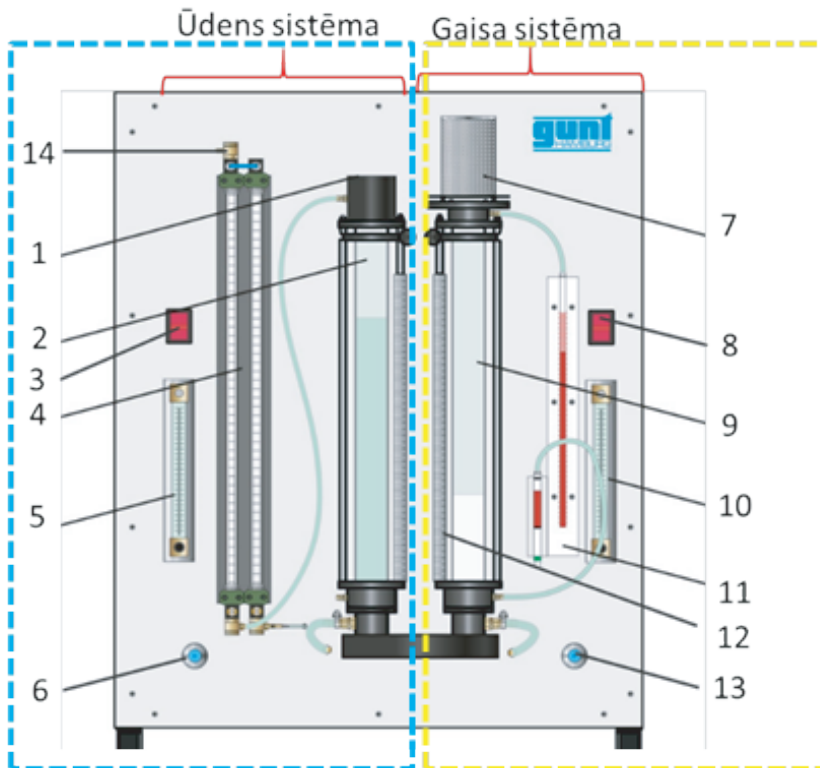
Vielu raksturojums:

- mazās stikla lodītes:  $d_d = 0,08 \dots 0,10$  mm,

- $\rho_m = 2400...2600 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{sl} = 1500 \text{ kg/m}^3$ ;
- vidējās stikla lodītes:  $d_d = 0,18...0,30 \text{ mm}$ ,  
 $\rho_m = 2400...2600 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{sl} = 1500 \text{ kg/m}^3$ ;
  - lielās stikla lodītes:  $d_d = 0,42...0,59 \text{ mm}$ ,  
 $\rho_m = 2400...2600 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{sl} = 1500 \text{ kg/m}^3$ ;
  - Jonapmaiņas sveķi (*Purolite® A500P Anjonīts (Cl)*): vidējais izmērs 0,60...0,85 mm, beramais blīvums 655...685 g/L, īpatnējais blīvums 1,04.

### 7.3. Iekārtas apraksts

Eksperimentālā iekārtā iespējams pētīt verdošo slāni gaisa un ūdens vidē (skat. 7.5. att.).



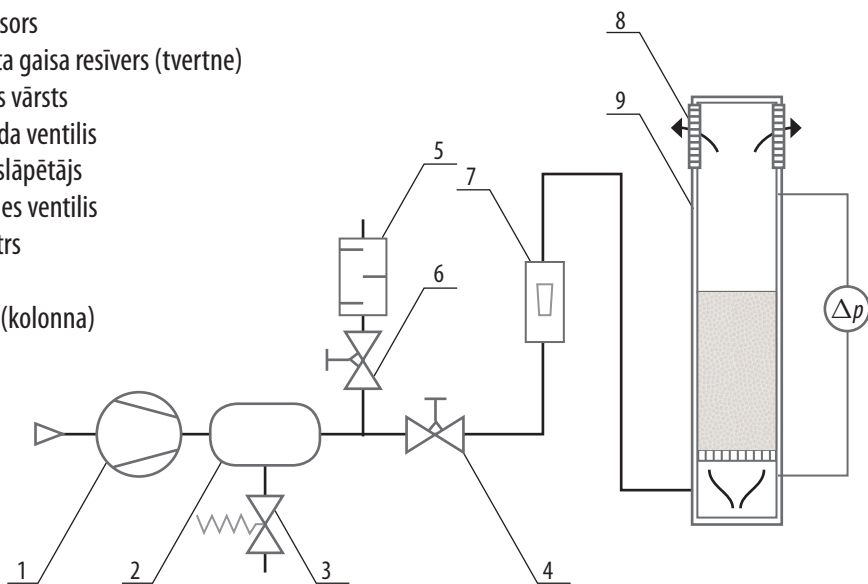
7.5. att. Verdošā slāņa iekārta: (1) ūdens pārplūdes caurule; (2) cilindrs; (3) membrānsūkņa slēdzis; (4) manometrs (spiediena mērišanai); (5) ūdens rotametrs; (6) ūdens pārplūdes ventils; (7) gaisa filtrs; (8) kompresora slēdzis; (9) cilindrs; (10) gaisa rotametrs; (11) manometrs (spiediena mērišanai); (12) lineāls; (13) gaisa pārplūdes ventils; (14) atgaisošanas ventils.

## Iekārtas shēma darbam gaisā vidē

Iekārta verdošā slāņa pētīšanai sastāv no caurspīdīga stikla cilindra (7.6. att. 9), kurā virs metāla sieta ieber sīkgraudainu materiālu. No apakšas caur graudaino slāni pūš saspiestu gaisu, ko iegūst ar membrānas kompresoru (1). Vienmērīgas gaisa plūsmas nodrošināšanai iekārta ir apgādāta ar resīveri jeb gaisa tvertni (2). Drošības vārsts (3) ierobežo spiedienu resīverī līdz 3 bar. Gaisa padevi regulē ar pārplūdes ventili (6) un adatas ventiļa (4) palīdzību. Gaisa padevi var palielināt pakāpeniski aizverot pārplūdes ventili; ar adatas ventiļa palīdzību veic precīzu ražības regulāciju. Caurplūdušā gaisa daudzumu mēra ar rotametri (7); spiediena starpību, respektīvi, graudainā slāņa pretestību nosaka ar manometri (7.5. att. 11). Lai nerastos materiāla zudumi un netiktu piesārņota apkārtējā telpa, atstrādātais gaiss no cilindra tiek izvadīts caur filtru (8).

7.

- 1 — kompresors
- 2 — saspiesta gaisa resīvers (tvertne)
- 3 — drošības vārsts
- 4 — adatveida ventīlis
- 5 — skaņas slāpētājs
- 6 — pārplūdes ventīlis
- 7 — rotametrs
- 8 — filtrs
- 9 — cilindrs (kolonna)

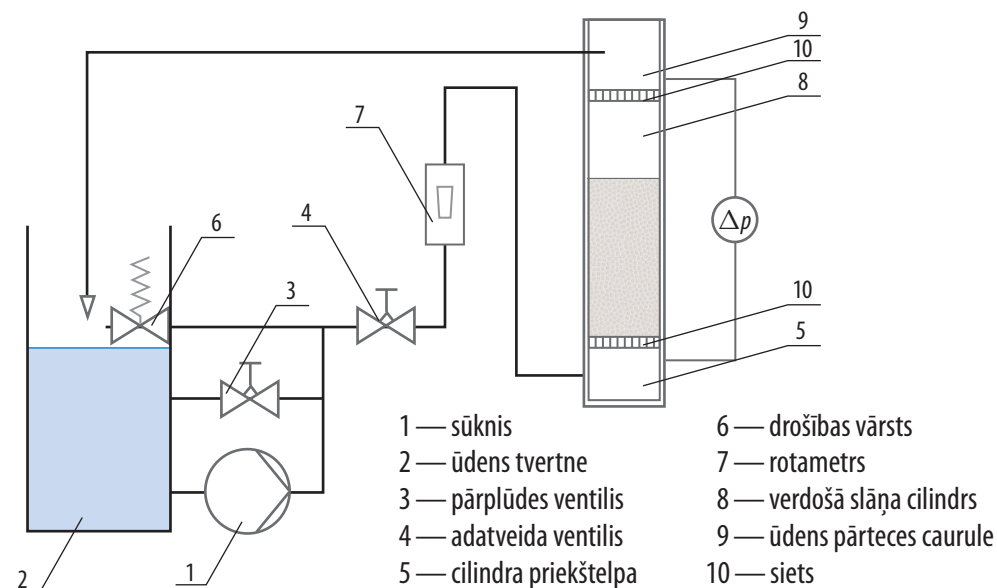


7.6. att. Iekārtas shēma eksperimentam ar gaisu.

Lai izmērītu slāņa hidraulisko pretestību, cilindra apakšā un augšā ir pievienoti diferenciālā spiediena  $\Delta p$  manometra pievadi. Tādējādi vienas caurules manometrā iegūst spiediena starpību.

## Iekārtas shēma darbam ūdens vidē

Verdošais slānis (skat. 7.7. att.) tiek radīts caurspīdīgā stikla cilindrā (8). Cilindra apakšējā daļā iemontēts siets (10), virs kura tiek novietots birstošs sīkgraudains materiāls. Pirms pārteces caurules (9) ievietots otrs siets (10). No atvērta ūdens tvertnes (2) ar sūkņa (1) palīdzību iekārtā slēgtā ciklā tiek transportēts ūdens. Ūdens padevi regulē, izmantojot divus vārstus. Pakāpeniski aizverot pārplūdes vārstu (3) maina ūdens padevi sistēmā; ar adatveida vārstu veic precīzu ūdens ražības iestatīšanu. Caurplūdušā ūdens daudzumu mēra ar rotametru (7). Lai nomērītu spiediena starpību, respektīvi, dispersā slāņa pretestību, cilindra apakšējā un augšējā daļa ir savienota ar manometru. Manometrs sastāv no divām stikla caurulītēm, kas augšā ir savienotas, un tām ir kopējs atgaisošanas ventilis. Mērāmā diferenciālā spiediena diapazonu var mainīt, izmainot gaisa spiedienu manometrā ar atgaisošanas vārstu palīdzību. Vispirms abas manometra caurulītes piepilda ar ūdeni līdz augšai. Pie izslēgta sūkņa caur atgaisošanas vārstu pūš manometrā gaisu līdz ūdens līmenis abās caurulītēs nostājas vidū.



7.7. att. Iekārtas shēma eksperimentam ar ūdeni.

## 7.4. Darba gaita

### Drošības norādījumi



- Nepieļaut verdošā slāņa daļiņu nokļūšanu ūdens rezervuārā, jo tas var sabojāt sūkņa membrānu gadījumā, ja sūknis iesūc cietas daļiņas.
- Nepārsniegt manometra mērdiapazonu, jo tādā gadījumā mērāmais šķidrums nonāks traukā, kurā tiek veikti izmēģinājumi.
- Nedarbināt sūkni vai kompresoru pārāk ilgi, vārstiem esot gandrīz noslēgtiem, jo tādā gadījumā motors var tikt pārslogots.
- Daļiņām gaisa sistēmā jābūt lielākām par 0,05 mm un sausām, citādi tās aglomerējas un saķep.

## 7.

### Spiediena zudumu noteikšana

Lai noteiktu spiediena zudumus, tukšā iekārtā nepieciešams uzņemt kalibrēšanas likni katram cilindram bez sūkņgraudainā materiāla. Lai iegūtu slāņa pretestību  $\Delta p_{sl}$  [mm H<sub>2</sub>O], nosaka slāņa un iekārtas kopējo pretestību  $\Delta p$  pie dažādiem gaisa (ūdens) plūsmas ātrumiem. No iegūtajiem rezultātiem atņem tukšas iekārtas pretestību  $\Delta p_{kal}$  tajos pašos plūsmas ātrumos:

$$\Delta p_{sl} = \Delta p - \Delta p_{kal}.$$

No rotametra nolasa cauri plūstošā gaisa (vai ūdens) ražību  $Q$  (L/min), tad gaisa (vai ūdens) ātrumu  $w$  (m/s) aprēķina pēc vienādojuma:

$$w = \frac{Q}{S},$$

kur  $S$  – verdošā slāņa cilindra šķērsriezuma laukums, m<sup>2</sup>.

### Darba gaita eksperimentiem gaisa vidē

Lai uzpildītu cilindru ar graudainā slāņa daļiņām, atskrūvējiet gaisa filtra (7.5. att. 7) pamatnē esošās 4 skrūves un to noceliet (nepazaudēt blīvi!). Pa atveri cilindra augšā to var uzpildīt. Kad cilindrs ir uzpildīts, to saliek atpakaļ, uzmanīgi novietojot gumijas blīvi starp cilindru un gaisa filtru.

1. Pilnībā atgrieziet pārplūdes (zilo) ventili.
2. Pilnībā aizgrieziet adatveida (melno) ventili rotametrā.
3. Ieslēdziet kompresoru.

4. Pamazām palieliniet plūsmas ražību cilindrā, atgriežot adatveida ventili, un novērojiet graudaino slāni. Kad rotametra adatveida ventilis ir pilnībā atgriezts, griežiet ciet pārplūdes vārstu, lai palielinātu plūsmas ražību. Regulāri pierakstiet ražību un slāņa hidraulisko pretestību (spiediena starpību).
5. Uzreiz, kad parādās pirmās daļiņu kustības pazīmes, pirmais kritiskais ātrums ir sasniegts. Pierakstiet attiecīgo plūsmas ražību.

Lai iztukšotu cilindru, lūdziet laboranta palīdzību. Ja pie cilindra sienām ir pielipušas daļiņas, tad pirms filtra atskrūvēšanas viegli uzsitot pa to, tās nokrata.



- ▣ Berot laukā daļiņas, tās nedrīkst sabirt spiediena caurulītes pievādā — tad tiks sabojāts ātrais slēgs. Neskalot gaisa cilindru ar ūdeni, lai mazākās daļiņas neieskalotos metāla sieta caurumos!

7.

## Darba gaita eksperimentiem ūdens vidē

Manometra spraudsavienojumus pievieno iekārtai.

1. Uzpildiet iekārtas rezervuāru ar 4 L ūdens.
2. Pilnībā atgriežiet pārplūdes ventili.
3. Pilnībā aizgriežiet adatveida ventili virs rotametra.
4. Ieslēdziet sūkni.
5. Kalibrācijas laikā uz metāla sieta cilindra pamatnē nedrīkst būt gaisa burbuļi, citādi mērījumi būs neprecīzi.
6. Pamazām palieliniet plūsmas ražību cilindrā, atgriežot adatveida vārstu, un novērojiet graudaino slāni. Kad rotametra adatveida vārsts ir pilnībā atgriezts, lai palielinātu plūsmas ražību, griež ciet pārplūdes vārstu. Regulāri pierakstiet ražību un slāņa hidraulisko pretestību (spiediena starpību).
7. Uzreiz kā parādās pirmās daļiņu kustības pazīmes, pirmais kritiskais ātrums ir sasniegts. Atzīmējiet attiecīgo plūsmas ražību.

Lai uzpildītu eksperimenta cilindru ar graudainā slāņa daļiņām, samazina ūdens līmeni, noņem cilindra augšējo sietu un ieber izvēlēto daudzumu daļiņu. Uzmanību! Daļiņas grimst samērā lēni, tāpēc cilindrs jāpapildina lēnām vai iepriekš jādozē ieberamais apjoms. Ieteicams aprēķināt verdošā slāņa augstumu  $H_{\text{verd}}$  lai uzzinātu, vai tas nepārsniedz cilindra augstumu.

Darba gaita, lai uzpildītu manometru eksperimenta sākumā ar ūdeni.

1. Manometra spraudsavienojumus pievienojiet iekārtai.
2. Pilnībā atgrieziet pārplūdes ventili.
3. Pilnībā aizgrieziet adatveida ventili rotametērā.
4. Ieslēdziet sūkni.
5. Pamazām palieliniet plūsmas ražību, atgriežot adatveida ventili, un piepildiet cilindru pilnu ar ūdeni.
6. Atgrieziet manometra augšējo ventili. Atgriežot apakšējos manometra ventiļus iestāda ūdens līmeni manometrā abās pusēs aptuveni līdz skalas viduspunktam, tad aizgriež apakšējos ventiļus. Pārbaudiet vai caurulēs nav palikuši gaisa burbuļi.
7. Aizgrieziet manometra augšējo ventili.
8. Atgrieziet apakšējos ventiļus — un var uzsākt mērījumus!

7.

Lai iztukšotu eksperimenta cilindru no daļiņām, ūdens pievada cauruli nomauc no cilindra un nolej ūdeni. No korpusa atvieno pārtieces cauruli un manometra savienojumus. Atskrūvē skrūves, kas piestiprina cilindra augšdaļu pie cilindra statīva, atskrūvē cilindra statīvu un noceļ cilindru. Izņem augšējo sietu un pa atveri cilindra augšā iztukšo cilindru.

Pretējā secībā iekārta tiek salikta atpakaļ. Stiprinot pārtieces korpusu, uzmanīgi jānovieto gumijas blīve tai paredzētajā vietā.

Mērījumus un aprēķinus ieraksta mērījumu un aprēķinu tabulā (7.1. tabula).

7.1. tabula

Mērījumu un aprēķinu tabula

Kalibrācijas dati	
Q, L/min	$\Delta p_{kal}$ , mm H <sub>2</sub> O
1.	
2.	
...	

Materiāla apraksts: ..... Materiāla blīvums: ..... Beramais blīvums (slāņa blīvums): ..... Daļiņu izmērs: ..... $H_0$ :							
Nr. p. k.	$\Delta p$ , mm H <sub>2</sub> O	$H$ , m	$Q$ , L/min	Vizuālais vērojums	$w$ , m/s	$\Delta p_{sl}$ , mm H <sub>2</sub> O	Ar
1.							
2.							
...							

## 7.5. Iekārtas tehniskā specifikācija

Verdošā slāņa cilindri(gaisam, ūdenim):

- garums 550 mm,
- diametrs 44 mm,
- tilpums ~1,2 L,
- skala 0...500 mm,
- iedaļas vērtība 1 mm,
- cilindra materiāls polimetilmetakrilāts.

Membrānas kompresors:

- maksimālā ražība 39 L/min,
- maksimālais spiediens 2,0 bar.

Rotometrs gaisam:

- mērīšanas diapazons 4-32 L/min.

Manometrs gaisam:

- mērīšanas diapazons 0...200 mm H<sub>2</sub>O.

Membrānas sūknis:

- ražība 1,8 L/min,
- pie spiediena 1,0 bar.

Rotometrs ūdenim:

- mērīšanas diapazons 0,2...2,2 L/min.

Manometrs ūdenim:

- mērīšanas diapazons 0...500 mm H<sub>2</sub>O.



## 7.6. Kontroljautājumi

1. Vai visi materiāli var veidot verdošo slāni?
2. Kas ir pirmais un otrais kritiskais ātrums?
3. Kādas materiāla īpašības ietekmē verdošā slāņa veidošanos?
4. Kādas materiāla īpašības ietekmē slāņa pretestību?
5. Kā noteikt slāņa porainību?
6. Ja aplūko šādus materiālus — mazas papīra lapiņas ( $d = 1$  cm), polietilēna lodītes, griķus, kviešu vai rudzu graudus, miltus, skrotis — kurš no šiem materiāliem virstu pie vismazākā gaisa ātruma? Kurš radītu vislielāko pretestību? Kurš noteikti neveidotu vienmērīgu verdošo slāni? Kuram būtu vismazākais pirmais un otrais kritiskais ātrums? Kāpēc?
7. Atrast dažus konkrētus piemērus, kur ražošanā izmanto verdošo slāni. Kādas ir verdošā slāņa priekšrocības? Nosaukt vairākus ļoti atšķirīgus variantus gan fizikālai, gan ķīmiskai mijiedarbībai!
8. Vai statiskā elektrība var ietekmēt verdošā slāņa procesus?
9. Vai dabas parādībai — plūstošajām smiltīm — ir kāds sakars ar šo darbu?

## 8. Rāmju filtrspiede

### 8.1. Teorētiskais pamatojums

Par filtrēšanu sauc neviendabīgu gāzveida vai šķidru sistēmu atdalīšanas procesu. Neviendabīgās sistēmas laiž caur porainu slāni, kas aiztur vienu šīs sistēmas fāzi un laiž cauri otru. Iekārtas, kurās atdala neviendabīgas sistēmas filtrējot, sauc par filtriem.

No hidraulikas viedokļa filtrēšanu var apskatīt kā heterogēnas šķidrās vides kustību caur filtrējošas starpsienas porām, kas ir spējīgas aizturēt noteikta izmēra dispersās daļiņas. Disperso fāzi, kas izveidojas virs filtrējošās starpsienas vai tajā, sauc par **nogulsnēm**, bet šķidro fāzi, kas izgājusi cauri filtram, sauc par **filtrātu**.

Izšķir divus raksturīgus filtrēšanas veidus. Pirmais filtrēšanas veids ir saistīts ar nogulšņu slāņa veidošanos virs filtrējošās starpsienas, kas savukārt papildus aiztur cieto fāzi. Procesa laikā nogulšņu slāņa augstums nepārtraukti aug, vienlaicīgi palielinās tā pretestība un samazinās filtrēšanas ātrums.

Otrs filtrēšanas veids ir saistīts ar sīkdispersu cieto daļiņu iekļūšanu filtrējošā materiāla porās. Porām aizsērējot, strauji pieaug filtrējošā slāņa pretestība un samazinās filtrēšanas ātrums.

Filtrēšanas procesus klasificē arī pēc filtrā aizturēto cieto daļiņu lieluma (skat. 8.1. tabulu). Šajā darbā tiks apskatīta šķidru suspensiju filtrēšana ar nogulšņu veidošanos virs filtrējošās starpsienas.

8.

8.1. tabula

Filtrēšanas veidi

Filtrēšanas veids	Daļiņu lielums, $\mu\text{m}$
Filtrēšana	$> 5$
Mikrofiltrēšana	0,1–5
Ultrafiltrēšana	0,05–0,1
Nanofiltrēšana	0,001–0,01
Atgriezeniskā osmoze	0,0005–0,005

Filtrēšanas režīms ir atkarīgs arī no nogulšņu veida. Filtrēšanā iegūtās nogulsnes iedala nesaspiežamās, kuru forma un izmērs praktiski nemainās, palielinot spiedienu, un saspiežamās, kas, mainot spiedienu, deformējas. Var

uzskatīt, ka **nesaspiežamās nogulsnēs** slāņa biezums un spiediens poru tilpumu un formu neietekmē. **Saspiežamās nogulsnēs**, paaugstinot spiedienu, kapilāri deformējas; tas izsauc slāņa pretestības strauju pieaugumu un samazinās filtrēšanas ātrums.

Filtrēšanas procesa intensitāte ir atkarīga no izejas suspensijas un filtrējošās starpsienas fizikālās mijiedarbības rakstura. Filtrējošās starpsienas struktūra un mehāniskās īpašības jāaskaņo ar iegūstamo nogulšņu un filtrāta īpašībām. Tas izskaidro plašo materiālu klāstu, ko izmanto filtru izgatavošanai, piemēram, kokvilnas un vilnas audumi, sintētisko un minerālšķiedru audumi, neaustie materiāli, metāliskie sieti, keramiskie, stikla, metāliskie porainie materiāli u. c.

**Filtrēšanas procesa virzītājspēks ir spiedienu starpība** pirms filtrējošās starpsienas un aiz tās.

Galvenais parametrs, kas raksturo filtrēšanas procesu ir **filtrēšanas ātrums**, kas ir atkarīgs no procesa virzītājspēka, filtrāta viskozitātes, nogulšņu un filtrējošās starpsienas pretestības. Par filtrēšanas ātrumu  $w_F$  [ $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] sauc filtrāta daudzumu, kas iziet caur filtra laukuma vienību laika vienībā:

$$w_F = \frac{dV}{S d\tau},$$

kur  $V$  – filtrāta tilpums,  $\text{m}^3$ ;

$S$  – filtrējošās virsmas laukums,  $\text{m}^2$ ;

$\tau$  – filtrēšanas laiks, s.

Filtrēšanas process caur filtra materiālu un nogulsnēm nelielo poru izmēru dēļ parasti notiek laminārā režīmā. Līdz ar to var teikt, ka filtrēšanas ātrums ir tieši proporcionāls spiedienu starpībai  $\Delta p$  (Pa), apgriezti proporcionāls filtrātā viskozitātei  $\mu$  [Pa·s], nogulšņu  $R_n$  un filtrējošā materiāla  $R_F$  summārai hidrauliskajai pretestībai [1/m]:

$$w_F = \frac{\Delta p}{[\mu(R_n + R_F)]}.$$

Var pieņemt, ka filtra hidrauliskā pretestība  $R_F$  laboratorijas darba ietvaros praktiski nemainās. Savukārt  $R_n$  ir mainīgs lielums, filtrējot nepārtraukti pieaug nogulšņu slāņa biezums un līdz ar to nogulšņu hidrauliskā pretestība. **Nogulšņu pretestību**  $R_n$  [(Pa·s)/m] var izteikt ar nogulšņu īpatnējās pretestības  $r_0$  [(Pa·s)/ $\text{m}^2$ ] un nogulšņu slāņa augstuma  $h_n$  [m] reizinājumu:

$$R_n = r_0 h_n.$$

Īpatnējā pretestība  $r_0$  ir pretestība, ko rada 1 m biezs nogulšņu slānis uz 1 m<sup>2</sup> filtrējošā laukuma. Līdz ar to filtrēšanas procesa ātrumu varizteikt šādi:

$$\frac{dV}{Sd\tau} = \frac{\Delta p}{(R_F + r_0 h_n)\mu}$$

Nogulšņu slāņa augstums ir saistīts ar nogulšņu tilpumu  $V_n$  [m<sup>3</sup>] un filtrējošās virsmas laukumu  $S$ :

$$V_n = h_n S.$$

Ja attiecina iegūto nogulšņu tilpumu  $V_n$  pret filtrāta tilpumu  $V$ , iegūst proporcionalitātes koeficientu  $x_0$ , kas ir galvenokārt atkarīgs no iegūto nogulšņu struktūras:

$$x_0 = \frac{V_n}{V}.$$

Šajā gadījumā jebkuram filtrēšanas momentam iegūst, ka nogulšņu tilpums ir:

$$V_n = x_0 V.$$

Izsakot nogulšņu slāņa augstumu caur filtrāta tilpumu un ievietojot filtrēšanas ātruma izteiksmē, iegūstam **filtrēšanas procesa pamatvienādojumu**:

$$\frac{dV}{Sd\tau} = \frac{\Delta p}{\left(R_F + \frac{r_0 V x_0}{S}\right)\mu}$$

Lielumus  $R_F$ ,  $r_0$  un  $x_0$  sauc par **filtrēšanas konstantēm** un tās parasti nosaka eksperimentāli.

Rāmju filtrspiede ir periodiskas darbības filtrs, kas darbojas patstāvīga suspensijas padeves ātruma režīmā, ko nodrošina noteiktas ražības sūknis. Varam pieņemt, ka filtrēšana notiek pie patstāvīga procesa ātruma. Lai iegūtu filtrēšanas procesa vienādojumu šim gadījumam, iepriekšējā vienādojumā atvasinājumu  $dV/d\tau$  aizstājam ar galīgu lielumu attiecību  $V/\tau$ , ņemot vērā, ka filtrēšanas ātrums  $w_F = V/(S\tau)$  ir patstāvīgs. Sareizinot un izdalot vienu no labās puses saskaitāmiem ar  $\tau$ , iegūst filtrēšanas vienādojumu patstāvīgā filtrēšanas procesa gadījumā. Risinot šo vienādojumu attiecībā uz  $\Delta p$  iegūstam:

$$p = \mu R_F w + \mu r_0 x_0 w^2 \tau.$$

Iegūtais vienādojums rāda, ka pie  $w_F = \text{const}$ , spiedienu starpība  $\Delta p$  pieaug līdz ar filtrēšanas laiku. Šādu filtrēšanas procesu sauc par **stacionāru**.

## 8.2. Darba uzdevumi

1. Iepazīt rāmju filtrpreses uzbūvi un darbības principus, apgūt filtrpreses rāmju un filtru uzstādīšanas pamatprincipus.
2. Sagatavot suspensiju nepieciešamajā koncentrācijā, novērot tās stabilitāti uzreiz pēc sagatavošanas un pēc dotā laika perioda.
3. No filtrēšanas eksperimentā iegūtajiem datiem aprēķināt filtrēšanas ātrumu un pretestību, teorētisko nogulšņu tilpumu un augstumu.
4. Attēlot grafiski sakarību  $R = f(\tau_F)$ .

## 8.

### Darba varianti

1. Filtrējošā slāņa materiāls/porainība.
2. Disperģējamais materiāls (piemēram, diatomīts, māls, sīkdispersa kūdra u. c.).
3. Suspensijas koncentrācija.

### 8.3. Iekārtas apraksts



8.1. att. Rāmju filtrspiedes iekārta: (1) iekārtas statīvs; (2) suspensijas tvertne ar izlaišanas krāns; (3) filtrāta tvertnes krāns; (4) filtrāta tvertnes pārplūdes caurule; (5) filtrāta tvertne; (6) cirkulācijas līnijas krāns; (7) membrānas ventilis; (8) vārpstas rats; (9) rāmju filtrspiede; (10) manometrs pie ieplūdes filtrā; (11) filtrāta izplūdes caurule; (12) filtrāta uztveršanas vanna; (13) uztveršanas vannas pārplūdes krāns; (14) manometrs; (15) termometrs; (16) iegremdējamais sūknis; (17) vadības panelis.

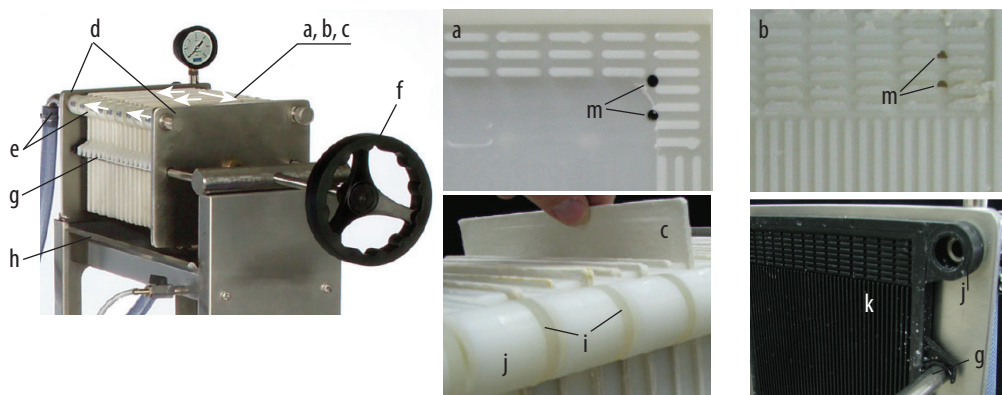
Suspensiju iepilda tvertnē (2). Ieslēgts iegremdējamais sūknis (16), atvērts cirkulācijas līnijas krāns (6) un aizvērts membrānas ventilis (7) nodrošina suspensijas nepārtrauktu cirkulāciju, lai neļautu dispersajām daļiņām sedimentēties. Caur sānu kanālu suspensija sadalās pa visiem filtrspiedes rāmjiem. Suspensijas padeves ražību un spiedienu filtrā var regulēt izmantojot cirkulācijas caurules krānu (6) un membrānas ventili (7). Vietā, kur suspensija ieplūst

filtrā, ir pievienots manometrs (10). Suspensijai pārvietojoties caur filtrējošo slāni (filtrpapīru) dispersās daļiņas veido nogulšņu slāni uz filtrpapīra, kā rezultātā spiediens pie ieplūdes filtrspiedē pieaug. Dzidrais filtrāts nonāk savākšanas kanālā filtrspiedes rāmju otrā pusē un tiek novadīts uz filtrāta savākšanas tvertni (5).

Iekārtai darbojoties, ir iespējams mērīt suspensijas temperatūru, sūkņa radīto spiedienu sistēmā, spiedienu pie ieplūdes rāmju filtrspiedē un iegūtā filtrāta tilpumu noteiktā laikā. Savākto nogulšņu masu var noteikt, nosverot filtrējošo materiālu pirms filtrēšanas un pēc filtrēšanas, kad filtrpapīrs ar nogulšņu slāni ir izžāvēts.

### Filtrspiedes rāmju un plašu komplektācija

Rāmju filtrspiedes daļas detalizēti redzamas 8.2. attēlā. Rāmju filtrspiede sastāv no pamīšus saliktiem rāmjiem (*a*), platēm (*b*) un filtrējošā slāņa (*c*). Galos šai virknei ir: metāla plāksne (*d*), ieejas/izejas plate (*k*) un rāmis. Ar vārpstas ratu (*f*) minētās detaļas cieši piespiež vienu pie otras, lai novērstu suspensijas noplūdi caur nenoslēgtajām vietām. Neliela noplūde ir pieļaujama un tiek savākta uztveršanas vannā (*h*). Rāmji (*a*) šajā iekārtā ir gludās plāksnes, pa kurām pievada suspensiju filtra slānim. Plates (*b*) ir rievotās plāksnes, pa kurām no filtra slāņa aizvada filtrātu. Platēs un rāmjos ir kanāli (*m*), pa kuriem šķidrums tajos nokļūst no pievada un ieplūst aizvadā (*j*). Suspensija plūst caur visiem filtra rāmjiem un platēm vienlaicīgi un paralēli. Plates un rāmji ar izvirzījumiem balstās uz diviem horizontāliem stieņiem (*g*). Filtrējošajam slānim puse, uz kuras krājas nogulsnes, ir gludāka, otra puse ir raupjāka un uz tās parasti ir ražotāja zīmogs, kas norāda filtra poru izmēru. Jāievēro, lai filtrējošais slānis (*c*) rāmjos būtu ielikts precīzi (taisni) un netiktu pazaudētas blīves (*i*).



8.2. att. Rāmju filtrspiedes elementi: (a) rāmis, (b) plate, (c) filtrējošais slānis, (d) metāla plāksnes, (e) izplūdes caurule, (f) vārpstas rats, (g) rāmjus un plates balstošs stienis, (h) noplūdes vanniņa, (i) blīves, (j) pievada vai aizvada caurule, kas veidojas no rāmjiem vai platēm, (k) malējā plate, (m) kanāli.

## Drošības norādījumi



- Nepieskarti atvērtam vadības panelim.
- Aizsargāt vadības paneli no ūdens šļakatām.
- Atslēgt iekārtu no strāvas padeves pirms atvēršanas.
- Jebkādus labošanas darbus veic tikai kvalificēts tehniskās apkopes personāls.



- Nepieļaut svešķermeņu nokļūšanu suspensijas tvertnē, jo pastāv risks, ka tie var iekļūt sūkņī un sabojāt to.
- Nelietot sūkni, ja pilnībā aizvērts cirkulācijas līnijas krāns, lai novērstu sūkņa pārslodzi.
- Ieplūdes filtra spiediens nedrīkst pārsniegt 2 bar. Pārsniedzot šo spiedienu, filtrējošais materiāls var ieplīst (filtru ražotāja rekomendācija).

## 8.4. Darba gaita

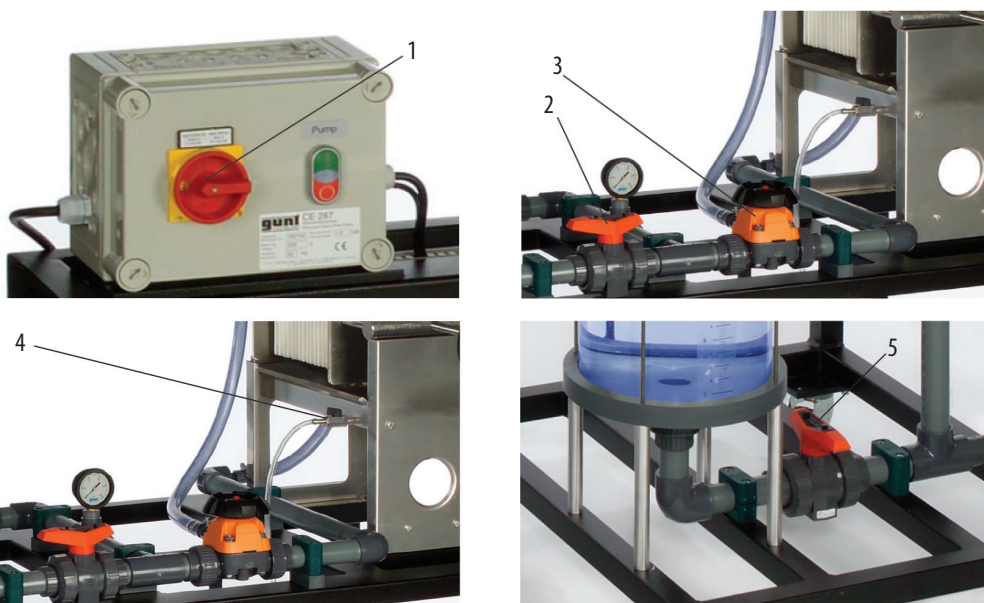
### Darba uzsākšana

1. Sagatavot rāmju filtrspiedi darbam. Komplektācijas secība (skat 8.2. att.):
  - 1) metāla plāksne (*d*),
  - 2) malējā (melnā) plate (*k*),
  - 3) filtrējošais slānis ar gludo pusi pret malējo plati (*c*),
  - 4) rāmis (*a*),



- 5) filtrējošais slānis ar raupjo pusi pret rāmi (c),
- 6) plate (b),
- 7) filtrējošais slānis ar gludo pusi pret plati (c),
- 8) atkārtoti 4.–7. punktu atbilstoši darba variantā paredzētajam skaitam,
- 9) malējais (melns) rāmis,
- 10) metāla plāksne.

2. Pārliecinās, ka filtrējošie slāņi ievietoti taisni un pievelk vārpstas ratu.



8.3. att. Filtrēšanas iekārtas elementi: (1) galvenais slēdzis; (2) cirkulācijas līnijas krāns; (3) membrānas ventīlis; (4) uztveršanas vannas pārplūdes krāns; (5) filtrāta tvertnes krāns.

3. Piepilda suspensijas tvertni ar aptuveni 150 L ūdens, t. i, lai sūknis ir pilnībā ir iegremdēts ūdenī.
4. Pilnībā atgriez cirkulācijas līnijas krānu (8.3. att. 2).
5. Aizver membrānas ventīli caurulē, kas pievada suspensiju filtram (8.3. att. 2).
6. Ieslēdz iekārtu ar galveno slēdzi (8.3. att. 1).
7. Ieslēdz sūkni.
8. Atbilstoši darba variantam nosver noteiktu daudzumu dispersās vielas un pievieno suspensijas tvertnei.

9. Pārliecinās, ka uztveršanas vannas pārplūdes krāns ir atvērts (8.3. att. 4).
10. Aizver filtrāta savākšanas tvertnes krānu (8.3. att. 5).



- Eksperimentu laikā nepārtraukti nodrošiniet suspensijas cirkulāciju (maisīšanu) ar daļēji atvērtu cirkulācijas līnijas krāna palīdzību, kamēr tā pilnībā tiek izlietota!
- Pārliecinieties, ka plates, filtra slāņi un rāmji ir ievietoti pareizā secībā!

## Darba gaita

Cirkulācijas līnijas krānam ir jābūt daļēji atvērtam, lai nodošinātu suspensijas maisīšanu tvertnē. Atver membrānas ventili, lai ievadītu suspensiju rāmju filtrspiedē. Filtrēšanas laikā nosaka spiediena izmaiņas laikā (piem., ik pēc minūtes) un ražību. Lai noteiktu filtrēšanas ātrumu, nosaka iegūtā filtrāta tilpuma izmaiņu laikā  $\Delta V_F / \Delta \tau_F$ . Filtrāta tilpumu nosaka, izmantojot mērskalu uz filtrāta tvertnes. Rekomendējamais nosakāmais filtrāta tilpums ir 3–5 L. Filtrēšanas procesa kopējo laiku nosaka pasniedzējs vai tā var notikt līdz brīdim, kas tiek sasniegts 2 bar spiediens.

Iegūtos rezultātus apkopo tabulās — piemēri doti 8.2. un 8.3. tabulās.

8.2. tabula

Spiediena mērījumu rezultāti

Nr. p. k.	Filtrēšanas laiks no procesa sākuma $\tau_F$ , s	Spiediens $p$ , Pa	Filtrēšanas pretestība $R$ , (Pa·s)/m
1.			
2.			
3.			
...			

8.3. tabula

Filtrāta tilpuma mērījumu rezultāti.

Nr. p. k.	Filtrāta tilpums $\Delta V_F$ , L	Filtrēšanas laiks $\Delta \tau_F$ , s	Filtrēšanas ātrums $w_F$ , m/s
1.			
2.			
3.			
...			

## Darba beigšana

- Izslēdz sūkni.
- Atgriez vārpstas ratu, lai izņemtu filtra slāņus.
- Ja tiks turpināts filtrēšanas darbs, tad noskalo nogulsnes no filtra slāņiem suspensijas tvertnē. Ja tiks noteikta nogulšņu masa — tās savāc vai kopā ar filtra slāni liek žāvēties.



- Filtrējošais materiāls ir vairākkārtīgi lietojams.
- Pēc katra filtrēšanas etapa pārbauda vai nav bojāts filtra materiāls.
- Ar filtrējošo slāni jāstrādāsaudzīgi.

## 8.5. Rezultātu apstrāde

8.

Pieņemot, ka filtrējamā materiāla pretestība ir ievērojami mazāka nekā nogulšņu slāņa pretestība, to orientējošos aprēķinos varam neņemt vērā. Turklāt var uzskatīt, ka filtrēšana notiek patstāvīgā temperatūrā, t. i., viskozitāte nemainās. Šajā gadījumā  $\Delta p$  var izteikt šādi:

$$\Delta p = \frac{r_0 x_0}{\tau_F} \left( \frac{V_F}{S} \right)^2,$$

kur  $V_F$  – iegūtais filtrāta tilpums,  $m^3$ ;  
 $\tau_F$  – filtrēšanas laiks, s.

Filtrēšanas laukumu  $S$  [ $m^2$ ] nosaka:

$$S = 2a^2r,$$

kur  $S$  – filtrēšanas laukums,  $m^2$ ;  
 $a$  – filtra malas garums, m,  
 $r$  – rāmju skaits filtrā.

Filtrēšanas ātrums  $w_F$  [ $m^3/(m^2 \cdot S)$ ] katram filtrēšanas laika intervālam:

$$w_F = \frac{V_F}{\tau_F S}.$$

Nosaka vidējo filtrēšanas ātrumu  $w_F^{\text{vid}}$  [m/s]:

$$w_F^{\text{vid}} = \frac{w_F^1 + w_F^2 + \dots + w_F^n}{n}.$$

Aprēķina kopējo filtrēšanas pretestību  $R$  [(Pa·s)/m] katram mērījumam atbilstoši tabulas datiem:

$$R = \frac{P}{w_F^{\text{vid}}}$$

## 8.6. Iekārtas tehniskā specifikācija

Maksimālais filtrējošo slāņu skaits:	18.
Filtrējošo slāņu izmērs:	200 mm × 200 mm.
Maksimālais spiediens rāmju filtrspiedē:	2 bar.
Centrbēdzes sūkņi:	
– patērētā jauda	0,5 kW,
– nominālais ātrums	2850 apgr./min,
– maksimālais spiediens	4,7 bar,
– ražība pie 1,6 bar	4,5 m <sup>3</sup> /h.
Filtrāta tvertne:	
– iekšējais diametrs (aptuvens)	250 mm,
– maksimālais tilpums	22 L,
– materiāls (plastmasa)	polimetilmetakrilāts.
Suspensijas tvertne:	
– maksimālais tilpums	200 L,
– materiāls (plastmasa)	augsta blīvuma polietilēns.
Manometrs:	
– mērījuma diapazons	0...2,5 bar.

8.

## 8.7. Kontroljautājumi

1. Kāda ir filtrēšanas procesa būtība?
2. Kāda izmēra daļiņas ir iespējams atdalīt filtrējot? Kā sauc metodes sīkaku daļiņu mehāniskai atdalīšanai?
3. Kas ir filtrēšanas procesa virzītājspēks?
4. Kādi nogulšņu veidi mēdz būt?
5. Ko saprot ar jēdzienu filtrēšanas ātrums?
6. Kādus lielumus sauc par filtrēšanas vienādojuma konstantēm?

## Literatūra un informācijas avoti

Šis ir tikai neliels ieskats RTU bibliotēkas MLKĻ filiālē pieejamās literatūras klāstā. Tas regulāri tiek papildināts. Jautājiet par sevi interesējošo tēmu bibliotekārēm!

### Latviešu valodā

1. Jansons E. Kļūdas kvantitatīvājās noteikšanās. Rīga: Rasa, 2002. – 155 lpp.
2. Balodis J. Praktiskie darbi fizikālajā ķīmijā. 1. d. Rīga: Zvaigzne, 1972. – 212 lpp.
3. Osipovs L. Ķīmijas tehnoloģijas pamatprocesi un aparāti. Rīga: Zvaigzne, 1991. – 680 lpp.
4. Osipovs L. Ķīmijas tehnoloģijas pamatprocesi un aparāti, 1.d. Rīga: Latvijas Valsts izdevniecība, 1962. – 555 lpp.
5. Ķirsis T., Lielpēters P. Fluidu mehānika, Rīga: Jāņa sēta, 1999. – 84 lpp.

### Angļu valodā

6. J. R. Backhurst, J. H. Harker, J. F. Richardson, J. M. Coulson. Coulson & Richardson's Chemical Engineering; 6-th edition; Butterworth-Heinemann: Oxford, 2011, 895 pp.
7. I. Karassik, J. Messina, P. Cooper, C. Heald. Pump Handbook; 4-th edition; McGraw-Hill: New York, 2008, 1632 pp.
8. C. E. Brennen. Hydrodynamics of Pumps; Cambridge University Press: Cambridge, 2011, 304 pp.
9. D. W. Green, R. H. Perry (editors). Perry's Chemical Engineers' Handbook; 8-th edition; McGraw-Hill: New York, 2008, 2400 pp.
10. C. Soares. Process Engineering Equipment Handbook; McGraw-Hill: New York, 2002, 1492 pp.

### Vācu valodā

11. W. Wagner. Strömung und Druckverlust; 6. Auflage; Vogel: Würzburg, 2008, 318 S.

### Krievu valodā

12. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии. Часть 1. – Москва: Химия, 1995. – 400 стр.
13. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – Москва: Химия, 1973. – 784 стр.
14. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Часть 1. Под ред. В. Г. Айнштейна, – Москва: Логос, 2006. – 912 стр.
15. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. Часть 2. Под ред. В. Г. Айнштейна, – Москва: Логос, 2006. – 872 стр.

# 1. pielikums. Ūdens un gaisa fizikālie parametri

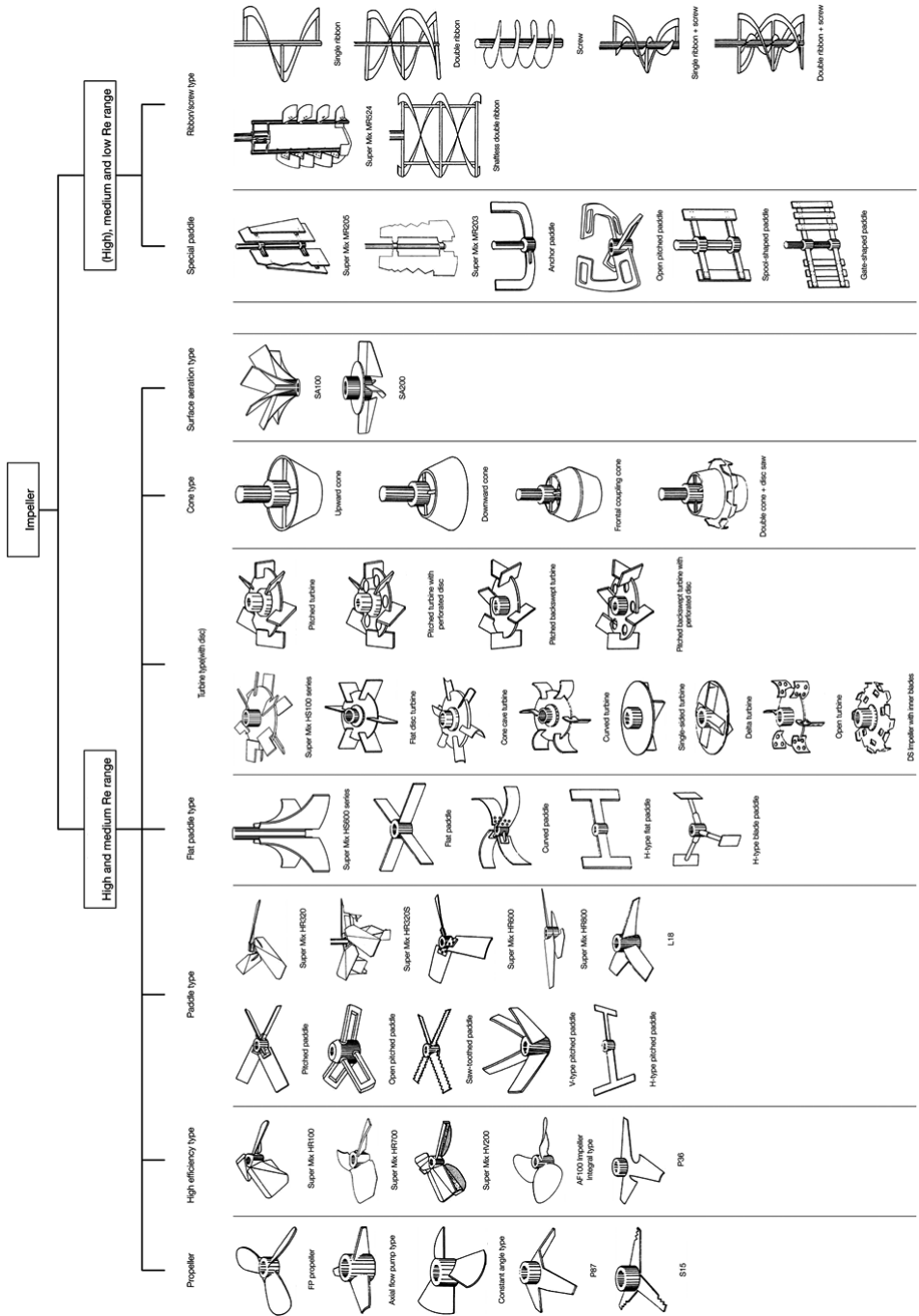
Avots: <http://theengineeringmindset.com>

Ūdens			
Temp.	Dinamiskā viskozitāte $\mu$	Kinemātiskā viskozitāte $\nu$	Blīvums $\rho$
[°C]	[mPa·s]	[mm <sup>2</sup> /s]	[g/cm <sup>3</sup> ]
0	1,723	1,332	1,293
5	1,748	1,376	1,270
10	1,772	1,421	1,247
15	1,797	1,466	1,226
20	1,821	1,511	1,205
25	1,844	1,557	1,185
30	1,868	1,604	1,165
35	1,892	1,651	1,146
40	1,915	1,698	1,128
45	1,938	1,746	1,110
50	1,961	1,795	1,093
55	1,984	1,844	1,076
60	2,006	1,893	1,060
65	2,029	1,943	1,044
70	2,051	1,994	1,029
75	2,073	2,044	1,014
80	2,095	2,096	0,999
85	2,116	2,148	0,985
90	2,138	2,200	0,972
95	2,160	2,253	0,959
100	2,181	2,306	0,946

Gaiss			
Temp.	Dinamiskā viskozitāte $\mu$	Kinemātiskā viskozitāte $\nu$	Blīvums $\rho$
[°C]	[10 <sup>-5</sup> Pa·s]	[10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s]	[kg/m <sup>3</sup> ]
2	1,725	1,343	1,284
27	1,846	1,568	1,177
52	1,962	1,807	1,086
77	2,075	2,056	1,009
102	2,181	2,317	0,941
127	2,286	2,591	0,882
177	2,485	3,168	0,784
227	2,670	3,782	0,706

## 2. pielikums. Maisītāju tipi

Avots: <https://www.satake.co.jp/English/product/kakuhan10.html>



### 3. pielikums. Spiediena mērvienības

Spiediena pamatmērvienības:

**SI sistēmā** ir paskāls Pa ( $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ ),

**CGS sistēmā** –  $\text{din/cm}^2$  ( $1 \text{ din/cm}^2 = 10^{-1} \text{ N/m}^2$ ),

**MKS sistēmā** –  $\text{kg/m}^2$  ( $1 \text{ kg/m}^2 = 9,81 \text{ N/m}^2$ ).

Plašāk izmantotās spiediena mērvienības un to atvasinātās vērtības

Mērvienības nosaukums	Apzīmējums	Sakarība ar SI sistēmas mērvienību
Bārs	bar	$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2$
Milimetrs dzīvsudraba staba	mm Hg	$1 \text{ mm Hg} = 133,322 \text{ N/m}^2$
Milimetrs ūdens staba	mm H <sub>2</sub> O	$1 \text{ mm H}_2\text{O} = 9,80665 \text{ N/m}^2$
Tehniskā atmosfēra	at vai kgf/cm <sup>2</sup>	$1 \text{ at} = 9,80665 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$
Fizikālā atmosfēra	atm	$1 \text{ atm} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ (760 mm Hg)



## 4. pielikums. Vārdnīca

Daži būtiskākie termini angļu valodā, kas var noderēt meklējot papildliteratūru vai turpinot studijas apmaiņas augstskolās. Vārdi sagrupēti atbilstoši pa tēmām, t. i., atbilstoši laboratorijas darbu aprakstos izmantotajai terminoloģijai. Iesakām arī tehnisko terminu vārdnīcu apkopojumu tiešsaistē *termini.lza.lv* un *www.eurotermbank.com*.

### Šķidruma kustības režīms caurulē

Caurule – pipe, tube  
Hidromehānika – hydromechanics, fluid mechanics  
Laminara plūsma – laminar flow  
Ņūtona šķidrums – Newtonian fluid  
Reinoldsa skaitlis – Reynolds number  
Turbulenta plūsma – turbulent flow

### Iztece

Caurums, atvere – orifice  
Iztece – discharge, flow out  
Izteses koeficients – discharge coefficient (coefficient of discharge)  
Uzgalis, sprausla – nozzle

### Sūknis – Pump

Augstuma zudumi – head loss  
Centrbēdzes sūknis – centrifugal pump  
Darba rats (sūkņa lāpstiņas) – impeller  
Jaudas likne – power curve  
Kavitācija – cavitation  
Kopējais celšanas augstums – total head  
Manometrs – pressure gauge  
Ražība – yield  
Robežslānis – boundary layer  
Sūcvads – suction pipe  
Sūkņu raksturliknes – pump performance curves  
Sūkšanas augstums – net positive suction head (NPSH)  
Vakuummets – vacuum gauge

### Hidrauliskās pretestības

Armatūra – pipe-fittings  
Iekārta – equipment  
Ierīce – device

Leņķis – square elbow, angle  
Līkums – elbow, knee, bend  
Paplašinājums – enlargement, expansion  
Sašaurinājums – constriction  
Sazarojums – pipe branch  
Spiediena kritums – pressure drop  
Šķidrumu berze – fluid friction  
Šķērsriezums – cross-section

### Maisīšana

Atvars, piltuve, virpulis – vortex  
Atsietena vairogs – baffle  
Ātrums – speed  
Berzes zudumi – frictional losses  
Frūda kritērijs – Froude number  
Griezes momenti – torque  
Jauda – power  
Jaudas skaitlis, jaudas kitērijs – power number  
Maisīšanas efektivitāte – mixing efficiency  
Maisīt – stir, mix, agitate  
Maisītāja lāpstiņa – blade, paddle  
Maisītāja lāpstiņas, darbarats – agitator head, impeller  
Maisītājs – mixer  
Paātrinājums – acceleration  
Tvertne ar maisītāju – stirred tank/vessel

### Maisītāju nosaukumi

Ruštona turbīna – Rushton turbine  
6-lāpstiņu turbīna – 6 blade turbine  
Propellerveida – propeller, marine propeller  
Enkurveida – anchor impeller

### Verdošais slānis – fluidized bed

Arhimēda kritērijs – Archimedes number  
Pirmais kritiskais ātrums – critical velocity  
Otrais kritiskais ātrums – terminal velocity