



PRAKTIKUMS

Ķīmijas tehnoloģijas procesi un aparāti

Mehāniskie, siltuma un masas
apmaiņas procesi

2021

Jurijs Ozoliņš, Armands Bušs, Imants Kreicbergs

PRAKTIKUMS

Ķīmijas tehnoloģijas procesi un aparāti

**Mehāniskie, siltuma
un masas apmaiņas procesi**

RTU Izdevniecība
Rīga 2021

Jurijs Ozoliņš, Armands Bušs, Imants Kreicbergs. Praktikums. Ķīmijas tehnoloģijas procesi un aparāti. Mehāniskie, siltuma un masas apmaiņas procesi. Rīga: RTU Izdevniecība, 2021.
139 lpp.

Praktikums paredzēts kā palīgs studentiem ķīmijas tehnoloģijas procesu un aparātu izziņāšanā. Tajā ir ietverti metodiski norādījumi un deviņu laboratorijas darbu apraksti par mehāniskajiem, siltuma un masas apmaiņas procesiem, kas notiek jebkurā ķīmiskajā ražotnē.

Mācību līdzeklis izdots ar Rīgas Tehniskās universitātes Mācību metodisko līdzekļu attīstības fonda finansiālu atbalstu.

Redaktore	Dzintra Birnbauma
Tehniskā redaktore	Baiba Puriņa
Dizains	Baiba Puriņa
Vāka dizains	Paula Lore

ISBN 978-9934-22-531-4 (print)
978-9934-22-532-1 (pdf)

© Jurijs Ozoliņš, Armands Bušs,
Imants Kreicbergs, 2021
© Rīgas Tehniskā universitāte, 2021

Saturs

Priekšvārds.....	6
1. SILTUMA APMAIŅA KONVEKCIJĀ.....	7
1.1. Teorētiskais pamatojums	7
1.2. Darba uzdevumi	13
1.3. Iekārtas apraksts	14
1.4. Darba gaita.....	15
1.5. Kontroljautājumi.....	16
2. SILTUMMAINIS	17
2.1. Teorētiskais pamatojums	17
2.2. Siltummaiņos izmantojamie siltuma nesēji.....	21
2.3. Rekuperācijas siltummaiņi.....	23
2.4. Darba uzdevumi	30
2.5. Iekārtas apraksts	30
2.6. Darba gaita.....	32
2.7. Kontroljautājumi.....	33
3. DZESĒS TORNIS (GRADĒTAVA)	34
3.1. Ūdens dzesēs torņa uzbūve un darbības princips	34
3.2. Mitrā gaisa svarīgākie parametri un $H-x$ diagramma.....	35
3.3. Dzesēs torni raksturojošie lielumi.....	40
3.4. Darba uzdevumi	43
3.5. Iekārtas apraksts	43
3.6. Darba gaita.....	45
3.7. Kontroljautājumi.....	46
4. PERIODISKĀ REKTIFIKĀCIJA.....	47
4.1. Šķidru sistēmu fāžu līdzsvars	47
4.2. Periodiskas darbības rektifikācija.....	51
4.3. Darba uzdevumi	56
4.4. Iekārtas apraksts	58
4.5. Darba gaita.....	61
4.6. Kontroljautājumi.....	63
5. KONVEKTĪVĀ ŽĀVĒŠANA	64
5.1. Teorētiskais pamatojums	64
5.2. Materiāla mitrums, konvektīvās žāvētavas materiālā bilance	65
5.3. Žāvētavas siltuma bilance	66
5.4. Žāvēšanas procesa attēlojums $H-x$ diagrammā.....	68

5.5. Žāvēšanas kinētika	69
5.6. Darba uzdevumi	70
5.7. Iekārtas apraksts	71
5.8. Darba gaita.....	72
5.9. Kontroljautājumi.....	72
6. ŠĶĪDUMA EKSTRAKCIJA	73
6.1. Teorētiskais pamatojums	73
6.2. Fāžu līdzsvars	74
6.3. Šķīduma ekstrakcijas materiālā bilance.....	77
6.4. Ekstrakcijas metodes	78
6.5. Darba uzdevumi	81
6.6. Iekārtas apraksts	81
6.7. Darba gaita.....	88
6.8. Kontroljautājumi.....	90
7. GĀZU ABSORBCIJA.....	91
7.1. Teorētiskais pamatojums	91
7.2. Līdzsvars absorbcijas procesos.....	91
7.3. Absorbcijas procesa materiālā bilance	94
7.4. Darba uzdevumi	96
7.5. Iekārtas apraksts	97
7.6. Darba gaita.....	102
7.7. Kontroljautājumi.....	103
8. ADSORBTĪVA GAISA ŽĀVĒŠANA	104
8.1. Teorētiskais pamatojums	104
8.2. Līdzsvars adsorbcijas procesos.....	105
8.3. Periodiskas adsorbcijas dinamika	106
8.4. Adsorbtīvā gaisa žāvēšana	107
8.5. Darba uzdevumi	111
8.6. Iekārtas apraksts	112
8.7. Darba gaita.....	117
8.8. Kontroljautājumi.....	117
9. CIETU MATERIĀLU SMALCINĀŠANA UN KLASIFIKĀCIJA	118
9.1. Teorētiskais pamatojums	118
9.2. Smalcināšanas teorētiskie pamati.....	118
9.3. Cietu materiālu šķirošana (klasifikācija)	121
9.4. Eksperimentālo datu iegūšana un apstrāde	124
9.5. Darba uzdevumi	125
9.6. Iekārtas apraksts	126
9.7. Darba gaita.....	128
9.8. Kontroljautājumi.....	129

Vispārīgie drošības tehnikas un kārtības noteikumi ķīmijas tehnoloģijas laboratorijā	130
Pielikums.....	135
Ieteicamā papildu literatūra.....	139

Priekšvārds

Ķīmiskās tehnoloģijas procesu un aparātu praktikuma otrā daļa veltīta būtiskiem un ļoti svarīgiem ķīmijas tehnoloģijas procesiem, kas tiek lietoti praktiski jebkurā ķīmiskajā ražotnē, – siltuma apmaiņas, masas pārnese un mehāniskiem procesiem.

Praktikumā iekļauti darbi, kuros var pētīt siltuma atdeves procesus dabiskā un piespiedu konvekcijā, iepazīties un analizēt dažādas konstrukcijas siltummaiņu darbību, atstrādātā ūdens dzesēšanas procesu pirms atgriešanas tehnoloģiskajā procesā. Virknē darbu iespējams iepazīties un praktiski realizēt galvenos ķīmiskajās ražotnēs izmantojamās masas pārnese procesus, tādas kā rektifikācija, ekstrakcija, absorbcija, adsorbcija. Atsevišķs darbs veltīts cietu materiālu smalcināšanas un klasifikācijas procesiem.

Laboratorijas darbu laikā studenti padziļināti apgūst šo procesu teoriju, viņiem ir iespēja tos praktiski realizēt, iegūt papildu iemaņas tehnoloģisko procesu raksturojošo eksperimentālo datu iegūšanas un apstrādes metodikā.

Darbs procesu un aparātu laboratorijā parasti nav realizējams sinhroni ar lekciju kursā izskatītajām teorētiskajām tēmām. Taču laboratorijas darbu izstrādei tikai tad ir nozīme un tikai tad tā dod papildu zināšanas un iemaņas, ja students izprot procesa teorētiskos pamatus un saprot iekārtas darbību un eksperimenta uzdevumus. Tāpēc praktikumā katrs laboratorijas darba apraksts sākas ar procesa teorijas īsu izklāstu. Tam seko konkrētās iekārtas uzbūves un darba gaitas apraksts. Praktikumā visiem darbiem ir dotas nosakāmo lielumu aprēķinu formulas. Lai students varētu labāk sagatavoties nākamajiem laboratorijas darbiem, katra darba apraksta beigās ievietoti jautājumi paškontrolei.

Ķīmiskās tehnoloģijas procesu un aparātu laboratorija ir nokomplektēta ar firmas G.U.N.T. Gerätebau GmbH (VFR) laboratorijas tipa pilotiekārtām. Liela daļa laboratorijas iekārtu ir izgatavotas no caurspīdīga materiāla, kas ļauj vizuāli novērot notiekošos procesus un labāk saprast fāzu mijiedarbību kontaktzonā. Daļai iekārtu iespējama eksperimentālo datu digitāla reģistrācija, matemātiskā apstrāde un vizualizācija, izmantojot klāt pievienotās datorprogrammas.

Laboratorijas darbu praktikumā atsevišķa nodaļa veltīta darba drošībai, kas jāievēro, strādājot procesu un aparātu laboratorijā un darbinot atsevišķas iekārtas.

Prof. Jurijs Ozoliņš

1. SILTUMA APMAIŅA KONVEKCIJĀ

1.

1.1. Teorētiskais pamatojums

Enerģijas transporta procesu starp cietiem ķermeņiem, šķidrums un gāzēm līdzsvara sasniegšanas virzienā sauc par siltuma pārnesi. Siltuma pārneses procesi ir vieni no svarīgākajiem jebkurā ķīmiskajā ražotnē. Siltuma pārnese var notikt trīs dažādos veidos, kas pēc fizikālās norises būtiski atšķiras:

- ♦ siltuma vadīšana;
- ♦ siltuma atdeve vai konvekcija;
- ♦ siltuma starošana.

Konvekcija ir siltuma transporta mehānisms šķidrums un gāzēs, tiem pārvietojoties. Izšķir dabisko un piespiedu konvekciju. Dabiskās konvekcijas gadījumā vides kustību izraisa blīvuma starpība, ko savukārt nosaka temperatūras starpība dažādās vides vietās. Piespiedu konvekcijas gadījumā vides kustību izraisa spiediena starpība, ko rada ārējā iedarbība (sūkņi, ventilatori, līmeņu starpība).

Siltuma apmaiņa konvekcijā notiek starp šķidru (gāzveida) vidi un cietu ķermeņa virsmu, tiem saskaroties. Siltuma apmaiņu konvekcijā sauc par siltuma atdevi.

Konvekcijā atdoto vai uzņemto siltumu var noteikt pēc Ņūtona atdzišanas likuma:

$$dQ = \alpha(t_s - t_v) dS d\tau \quad (J), \quad (1.1)$$

kur α – siltuma atdeves koeficients, $W/(m^2 \cdot K)$;

t_v, t_s – vides un ķermeņa sienas temperatūra, $^{\circ}C$;

S – siltuma apmaiņas laukums, m^2 ;

τ – procesa laiks, s .

Siltuma daudzums Q (džoulos), ko virsma saņem no apkārtējās vides vai atdod tai, ir proporcionāls temperatūras starpībai, siltuma apmaiņas laukumam un procesa laikam.

Stacionāra siltuma atdeves režīma gadījumā, kad t_v un t_s nemainās laikā, kopējo siltuma plūsmu \dot{Q} nosaka šādi:

$$\dot{Q} = \alpha(t_s - t_v)S \quad (W). \quad (1.2)$$

Korektākam siltuma atdeves procesa aprēķinam temperatūras starpības $(t_s - t_v)$ vietā izmanto procesa vidējo logaritmisko temperatūras starpību.

$$\dot{Q} = \alpha \cdot \Delta t_{\text{vid}} \cdot S \quad (\text{W}). \quad (1.3.)$$

Ja sildvirsmas temperatūra t_s procesa laikā praktiski nemainās, vidējo logaritmisko temperatūras starpību iespējams noteikt šādi:

$$\Delta t_{\text{vid}} = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{t_s - t_1}{t_s - t_2}} \quad (^\circ\text{C}), \quad (1.4.)$$

kur t_1, t_2 – gaisa temperatūra procesa sākumā un beigās, $^\circ\text{C}$.

Lai salīdzinātu dažādus siltuma atdeves procesus, izmanto īpatnējo siltuma plūsmu jeb siltuma plūsmas blīvumu q :

$$q = \frac{\dot{Q}}{S} = \alpha (t_s - t_v) \quad \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right). \quad (1.5.)$$

Vienādojumos (1.1., 1.2., 1.3.) ietilpstošo lielumu α sauc par siltuma atdeves koeficientu, kas raksturo siltuma atdeves procesa intensitāti. Koeficienta α fizikālo būtību un mērvienības var noteikt pēc vienādojuma (1.6.):

$$\alpha = \frac{\dot{Q}}{(t_s - t_v)S} = \left[\frac{\text{W}}{\text{grad} \cdot \text{m}^2} \right] = \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]. \quad (1.6.)$$

Siltuma atdeves koeficients α raksturo to siltuma daudzumu \dot{Q} , ko 1 m^2 virsma vienā sekundē uzņem (atdod) no vides, ja temperatūras starpība starp vidi un virsmu ir viens grāds.

Siltuma atdeves procesos siltums vienlaikus tiek pārnestš gan siltuma vadīšanas, gan konvekcijas ceļā. Tāpēc šāds siltuma apmaiņas process ir ļoti sarežģīts un atkarīgs no daudziem faktoriem. Būtiskākie no tiem ir:

- ◆ vides kustības ātrums;
- ◆ vides fizikālās īpašības;
- ◆ ķermeņa sienas forma, izmēri un virsmas stāvoklis.

Pie neliela plūsmas ātruma ir novērojama lamināra plūsma, slāņi praktiski nesajaucas, siltuma apmaiņu galvenokārt limitē siltuma vadīšana. Tā kā gaiss šajā gadījumā ir salīdzinoši labs siltuma izolators (1.1. tabula), siltuma apmaiņas intensitāte ir maza.

Dažu vielu siltumvadītspēja λ pie 20 °C

Viela	λ , W/(m·K)	Viela	λ , W/(m·K)
Gāzes		Cietas vielas	
Xe	0,0051	Tērauds	36–54
CO ₂	0,016	Leģētie tēraudi	20
Ar	0,016	Čuguns	46
N ₂	0,025	Alumīnijs, 99,75 %	229
O ₂	0,026	Varš, elektrolītiski tīrs	395
CH ₄	0,035	Sudrabs, 99,98 %	418
Gaiss	0,026	Titāns	20
Šķīdumi		Stikls	0,7–1,2
Ūdens	0,598	Betons	0,8
Etanols	0,175	Stikla/akmens vate	0,030
Eļļas	0,1–0,35	Putu polistirols	0,035
Organiskie šķīdumi	0,1–0,35	Azbests	0,15
Etilēnglikols	0,25	Koks	0,1–0,3

Palielinoties plūsmas ātrumam, veidojas plūsmas turbulence, rodas virpuļi, plūsmas slāņi intensīvi sajaucas, siltuma atdeve būtiski pieaug. Vides plūsmas raksturu ietekmē ne tikai ātrums, bet arī vides fizikālās īpašības: viskozitāte, blīvums, kā arī plūsmas ģeometrija. Plūsmas raksturošanai izmanto Reinoldsa kritēriju, ko aprēķina šādi:

$$Re = \frac{wl\rho}{\mu}, \quad (1.7)$$

kur w – plūsmas vidējais ātrums, m/s;

ρ – vides blīvums, kg/m³;

μ – vides dinamiskā viskozitāte, Pa·s;

l – noteicošais ģeometriskais izmērs, m.

Mūsu gadījumā:

$l = l$, plakanā sildelementa garums, m;

$l = d$, cilindru kūļa cilindra diametrs, m;

$l = h$, ribotā elementa ribas garums, m.

Kā zināms, vides fizikālās īpašības mainās atkarībā no vides temperatūras. Siltumtehnikiem aprēķiniem ar pietiekamu precizitāti var pieņemt, ka procesa

noteicošā temperatūra ir gaisa plūsmas vidējā temperatūra t_{vid} starp ieplūdes t_1 un izplūdes t_2 temperatūru:

$$t_{\text{vid}} = \frac{t_1 + t_2}{2}. \quad (1.8.)$$

Tā kā siltuma atdeve ir ļoti sarežģīts siltuma pārnese process, to, pamatojoties uz siltuma līdzības teoriju, apraksta, izmantojot līdzības kritēriālos vienādojumus.

Konvekcijas siltuma atdeves intensitāti uz robežas starp vides plūsmu un virsmu raksturo Nuselta kritērijs, kas savā starpā saista šādus lielumus:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}, \quad (1.9.)$$

kur α – siltuma atdeves koeficients, $W/(m^2 \cdot K)$;

l – noteicošais ģeometriskais izmērs, m;

λ – vides siltuma vadītspējas koeficients, $W/(m \cdot K)$.

Nuselta kritērijs satur meklējamo lielumu α , tāpēc tas šajos vienādojumos ir nosakāmais kritērijs. Kritēriālie siltuma atdeves vienādojumi tiek sastādīti un lietoti katram konkrētam siltuma atdeves gadījumam atšķirīgi.

Ja vide apskalo plakanu virsmu, Nuselta kritēriju aprēķina šādi:

1) laminārās plūsmas gadījumā, $Re < 2300$:

$$Nu = 0,66 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33}; \quad (1.10.)$$

2) turbulentas plūsmas gadījumā, $Re < 10000$:

$$Nu = 0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}. \quad (1.11.)$$

Šajos vienādojumos tiek lietots arī Prantla kritērijs, kas raksturo vides fizikālo parametru ietekmi uz konvektīvo siltuma apmaiņu:

$$Pr = \frac{c \cdot \mu}{\lambda}, \quad (1.12.)$$

kur c – vides īpatnējā siltumietilpība, $kJ/(kg \cdot K)$;

μ – vides dinamiskā viskozitāte, Pa·s;

λ – vides siltuma vadītspējas koeficients, $W/(m \cdot K)$.

Dabiskās konvekcijas gadījumā kritēriālos vienādojumos izmanto Grashofa kritēriju, kas raksturo plūsmas iekšējo berzes spēku un konvekcijas spēku savstarpējo ietekmi:

$$Gr = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta_t \cdot \Delta t}{\nu^3}, \quad (1.13.)$$

1.

kur l – noteicošais ģeometriskais izmērs, m;

ν – kinētiskās viskozitātes koeficients, m^2/s ;

β_t – vides termiskās izplešanās koeficients, $^\circ\text{C}^{-1}$;

Δt – temperatūras starpība starp sildelementa virsmas un vides temperatūru, $^\circ\text{C}$.

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

β_t – orientējošiem aprēķiniem siltuma atdeves gadījumā var noteikt:

$$\beta_t = \frac{1}{t + 273}, \quad (1.14.)$$

kur t – vides vidējā temperatūra, $^\circ\text{C}$.

Gadījumā, ja gaiss apskalo vertikālu virsmu un $10^3 < Gr \cdot Pr < 10^8$, Nuselta kritēriju aprēķina šādi:

$$Nu = 0,76 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25}, \quad (1.15.)$$

Ja $Gr \cdot Pr > 10^9$, Nu kritēriju aprēķina šādi:

$$Nu = 0,15 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,33}, \quad (1.16.)$$

Līdzīgi Nuselta kritēriju var aprēķināt gadījumā, ja vide apskalo plākšņveida virsmu.

Praksē bieži izmanto siltummaiņus, kuros vide šķērsām apskalo cauruļu kūli. Šajā gadījumā siltuma atdeves koeficienta noteikšanā jāievēro dažas īpatnības.

Aprēķinot Re un Nu kritērijus, noteicošais ģeometriskais izmērs ir tā sauktais “vides apskalotais garums” L' . Ja caurules garums ir l un tās diametrs ir d , tad lielumu L' nosaka šādi:

$$L' = \frac{\pi dl}{2l} = d \frac{\pi}{2}. \quad (1.17.)$$

Kā raksturīgais plūsmas ātrums Re kritērija noteikšanai tiek izmatots vidējais plūsmas ātrums telpā starp caurulēm w_ψ . Tā noteikšana ir atkarīga no cauruļu novietojuma (1.1. att.) un attāluma starp caurulēm S .

Vidējo plūsmas ātrumu w_ψ nosaka šādi:

$$w_\psi = \frac{w_0}{\psi}, \quad (1.18.)$$

kur w_0 – plūsmas ātrums pirms kūļa, m/s ;

ψ – tukšuma daļa kūlī.

Ja $b \geq 1$, tad $\psi = 1 - \pi/4a$, gadījumā ja $b < 1$, tad $\psi = 1 - \pi/4ab$.

Šajā gadījumā:

$$Re_{L'\psi} = \frac{w_\psi \cdot L' \rho}{\mu}; \quad (1.19.)$$

$$Nu = \alpha \cdot \frac{L'}{\lambda}. \quad (1.20.)$$

Nuselta kritērija skaitlisko vērtību var noteikt pēc tiem pašiem vienādojumiem (1.10.), (1.11.). Ar šīm formulām var noteikt α vērtību trešajai cauruļu rindai un visām turpmākajām. Pirmajai cauruļu rindai lieto korekcijas koeficientu $\varepsilon_{\alpha 1} = 0,6$, otrajai $\varepsilon_{\alpha 2} = 0,9$. Ja vides izplūdes leņķis ir 90° , vidējo siltuma atdeves koeficientu kūlim siltumapmaiņas procesā ar gaisu var noteikt:

$$\alpha_{kul} = \frac{\varepsilon_{\alpha 1} \cdot \alpha + \varepsilon_{\alpha 2} \cdot \alpha + (n - 2)}{n} \alpha, \quad (1.21.)$$

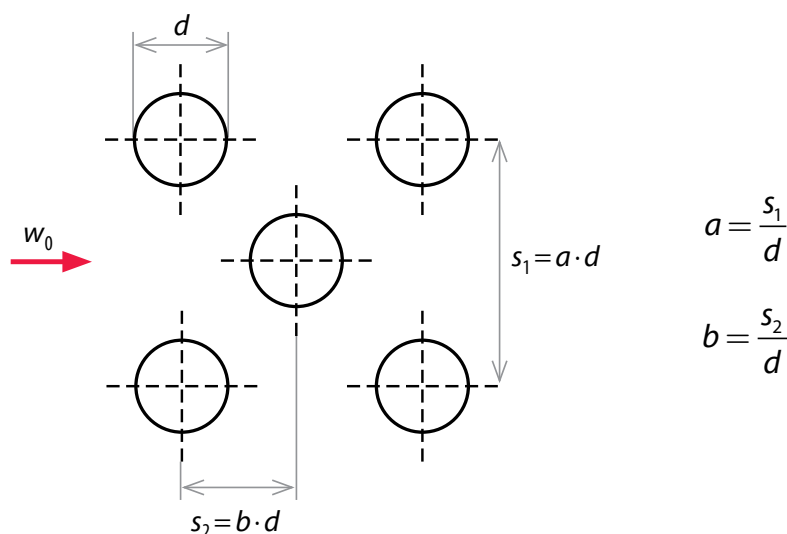
kur n – rindu skaits cauruļu kūlī.

Dažādos sildelementus var raksturot ar **lietderības koeficientu η** . Tas raksturo siltuma zudumus, kas rodas siltuma pārneses procesā, un parāda, kāda daļa no izmantotā sildītāja jaudas tiek pārnesta tieši uz vidi (šajā gadījumā gaisu):

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{P_{el}}, \quad (1.22.)$$

kur \dot{Q} – konvekcijas procesā pārnestais siltuma daudzums, W;

P_{el} – sildelementa jauda, W.



1.1. att. Cauruļu novietojums kūlī un tā raksturojošie lielumi.

Konvekcijas procesā pārnesto siltuma daudzumu var noteikt, aprēķinot siltuma daudzumu, ko no sildītāja saņem vide:

$$1. \quad \dot{Q} = G \cdot c_p (t_2 - t_1) \quad (\text{kW}), \quad (1.23.)$$

kur G – caurplūstošās gaisa masas patēriņš, kg/s;

c_p – gaisa īpatnējā siltumietilpība pie atmosfēras spiediena, kJ/(kg·K);

t_1, t_2 – gaisa sākuma un beigu temperatūra, °C.

Caurplūstošā gaisa masas patēriņu nosaka pēc formulas:

$$G = w_0 \cdot \rho_t \cdot S \quad (\text{kg/s}), \quad (1.24.)$$

kur w_0 – gaisa plūsmas ātrums gaisa kanālā, m/s;

S – gaisa kanāla šķērsriezums, m²;

ρ_t – gaisa blīvums pie vidējās temperatūras, kg/m³.

1.2. Darba uzdevumi

Sildelementu, sildītāja jaudu un gaisa plūsmas ātrumu norāda laboratorijas darbu pasniedzējs!

Sildītāja jaudu ieteicams izvēlēties robežās no 100 W līdz 170 W un gaisa plūsmas ātrumu – no 1 m/s līdz 3,3 m/s.

Darba gaitā jānosaka (jāaprēķina) šādi lielumi:

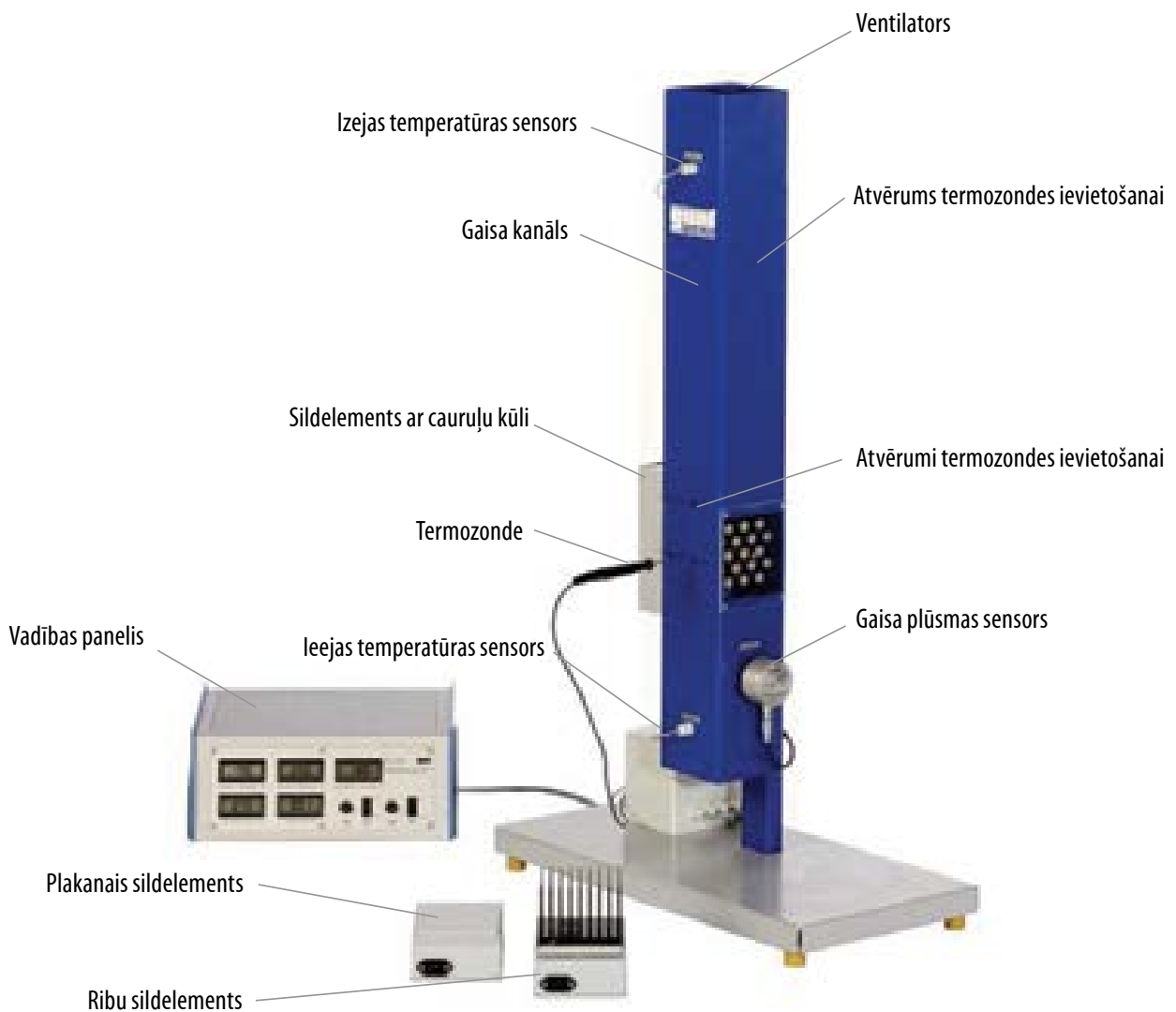
- a) plūsmas Reynoldsa skaitlis jeb kritērijs;
 - b) Nuselta skaitlis jeb kritērijs;
 - c) Prantla kritērijs;
 - d) Grashofa kritērijs.
- ♦ Pēc aprēķinātajiem kritērijiem apkopot secinājumus par plūsmas raksturu.
 - ♦ Izmantojot temperatūras zondi, eksperimentāli noteikt gaisa temperatūras sadalījumu sildelementā. Kurā sildelementa zonā ir visaugstākā temperatūra?
 - ♦ Balstoties uz aprēķiniem, salīdzināt dabiskās un piespiedu konvekcijas gadījumus. Izdarīt secinājumus par siltuma pārneses intensitāti abos gadījumos.

1.3. Iekārtas apraksts

1.

Konvekcijas iekārtas (1.2. att.) galvenie elementi ir: vadības bloks, sildelements, ventilators, gaisa kanāls un plūsmas sensori.

- ◆ Plūsmas sensors reģistrē gaisa plūsmas ātrumu ieplūdē.
- ◆ Uz displeja tiek rādīta gaisa ieplūdes un izplūdes temperatūra.
- ◆ Gaisa vada mērīšanas atveres ļauj reģistrēt temperatūru dažādos gaisa vada punktos, ievietojot tajos termozondi.
- ◆ Vadības un displeja bloks satur ventilatora un sildītāja jaudas regulatorus un barošanas bloku. Displejā tiek parādīts elektroenerģijas daudzums, kas piegādāts sildelementam, plūsmas ātrums, gaisa temperatūra ieplūdē un izplūdē un temperatūra, kas tiek mērīta ar termoelementu.
- ◆ Termozondes jutīgā daļa ir uz stienā sāna 0–5 mm attālumā no tā gala, zondei ar ‘ķepiņu’ – uz ķepiņas.



1.2. att. Siltuma apmaiņa konvekcijas iekārtā WL352.

1.4. Darba gaita

1.

1. Iekārtā ievieto nepieciešamā tipa sildītāju (vaicāt darba vadītājam).
2. Ieslēdz sildītāju un ieregulē uzdoto sildītāja jaudu. Ik minūti reģistrē sildelementa virsmas un gaisa temperatūru, līdz ir iestājies stacionārs režīms.
3. Ieslēdz ventilatoru un ieregulē uzdoto gaisa plūsmas ātrumu, sagaida stacionāru režīmu.
4. Termopāri secīgi ievieto visās atverēs, lai noteiktu gaisa sasilšanas gradientu dažādos attālumos un virzienos no sildelementa. Šo darbību atkārto vēl 2 reizes, lai iegūtu vidējo vērtību. Atveres attiecīgi marķē un atzīmē to izvietojumu saprotamā diagrammā.
5. Darbu beidzot, izslēdz sildītāju un ventilatoru (t.i., iekārtu).

Mērījumu un aprēķinu tabulu ieteicams izveidot šādi (1.2. tabula). Tabulā fiksē tos mērījumus, kas nepieciešami turpmāko darba uzdevumu izpildei (t.i., aprēķiniem):

1.2. tabula

Mērījumu un aprēķinu tabulas piemērs

Parametrs	Dabiskā konvekcija	Piespiedu konvekcija
Mērījumu sadaļa		
Sildītāja veids		
Sildītāja jauda (max 170 W), W		
Plūsmas ātrums (max 3,3 m/s), m/s		
Gaisa sākuma temperatūra, °C		
Gaisa beigu temperatūra, °C		
...		
Aprēķinu sadaļa		
Gaisa masas patēriņš, kg/s		
Konvekcijas procesā pārnestsais siltuma daudzums, W		
Re		
Nu		
Pr		
Gr		
...		

1.5. Kontroljautājumi

1.

- ◆ Kas ir dabiskā un kas ir piespiedu konvekcija?
- ◆ Nosauciet un raksturojiet trīs siltuma pārneses veidus, miniet piemērus.
- ◆ Kur dabā un māsaimniecībā novērojama konvekcija? Miniet trīs piemērus.
- ◆ Kas ir lamināra un turbulenta plūsma?
- ◆ Ko raksturo Reinoldsa, Nuselta, Prantla un Grashofa kritēriji?
- ◆ Kādā plūsmas režīmā labāk noris siltuma konvekcija? Kāpēc?
- ◆ Kad labāk noris siltuma pārnese – dabiskās vai piespiedu konvekcijas gadījumā? Kāpēc?

2. SILTUMMAINIS

2.1. Teorētiskais pamatojums

2.

Siltuma apmaiņas aparāti jeb siltummaiņi ir iekārtas, kurās notiek siltuma pārneses procesi no viena siltuma nesēja uz otru. Atkarībā no pielietojuma siltummaiņus sauc par sildītājiem, kondensatoriem, dzesētājiem un ietvaicētājiem. Atkarībā no siltuma pārneses veida izšķir rekuperācijas, reģenerācijas un saplūdes siltummaiņus.

Rekuperācijas siltummaiņos vienlaikus atrodas abi siltumnesēji: aukstais un karstais. Siltums tiek pārnestis no karstās vides uz auksto caur dažādas konfigurācijas siltuma apmaiņas virsmu. Reģenerācijas siltummaiņos vienu un to pašu virsmu noteiktā secībā apskalo ar karsto un auksto vidi. Siltuma pārnese notiek, izmantojot siltumu akumulējošo virsmu vai masu, ko sauc par pildījumu. Saplūdes siltummaiņos siltuma pārnese notiek vidēm tieši kontaktējoties, piemēram, tvaiks tiek ievadīts ūdenī, lai strauji palielinātu ūdens temperatūru tvertnē.

Siltuma pārneses process siltummaiņos

Minētos siltuma pārneses procesus siltummaiņos no vienas vides uz otru nosacīti var iedalīt trīs stadijās un to sauc par siltuma pāreju:

- 1) siltuma atdeve no karstās vides uz auksto;
- 2) siltuma vadīšana cauri siltummaiņa sienīnai;
- 3) siltuma atdeve no sienīņas aukstajai videi.

Procesa kopējais kvantitatīvais raksturojums ir siltuma pārejas koeficients k ($W/(m^2 \cdot K)$). 2.1. att. parādīta siltuma pārnese caur plakanu virsmu, kas ir izgatavota no viendabīga materiāla, kuras siltuma vadītspējas koeficients ir λ ($W/(m \cdot K)$), un biezums δ (m).

Vides temperatūras ir attiecīgi t_1 un t_2 , turklāt $t_1 > t_2$ un tās ir nemainīgas $t_1, t_2 = \text{const}$. Virsmas sienīņas temperatūras apzīmēsim ar t_{s1} un t_{s2} , karstās vides siltuma atdeves koeficients α_1 , aukstās vides – α_2 . Šajā gadījumā siltuma daudzums, ko karstā vide atdod sienīnai, ir vienāds ar siltuma daudzumu, kas iziet cauri sienīnai un siltuma daudzumu, kas tiek pārnestis no sienīņas uz auksto vidi.

Karstās vides spēju pārnest siltumu no plūstošās vides uz virsmu (vai otrādi) raksturo siltuma atdeves koeficients α , pārnesto siltuma daudzumu nosaka:

$$\dot{Q} = \alpha_1(t_1 - t_{s1}) \cdot S \quad (W). \quad (2.1.)$$

Siltuma daudzumu, ko siltuma vadīšanas ceļā pārnes caur starpsieni var noteikt:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{\delta} (t_{s1} - t_{s2}) \cdot S \quad (\text{W}). \quad (2.2.)$$

Siltuma plūsmu no starpsienas virsmas uz auksto vidi nosaka līdzīgi:

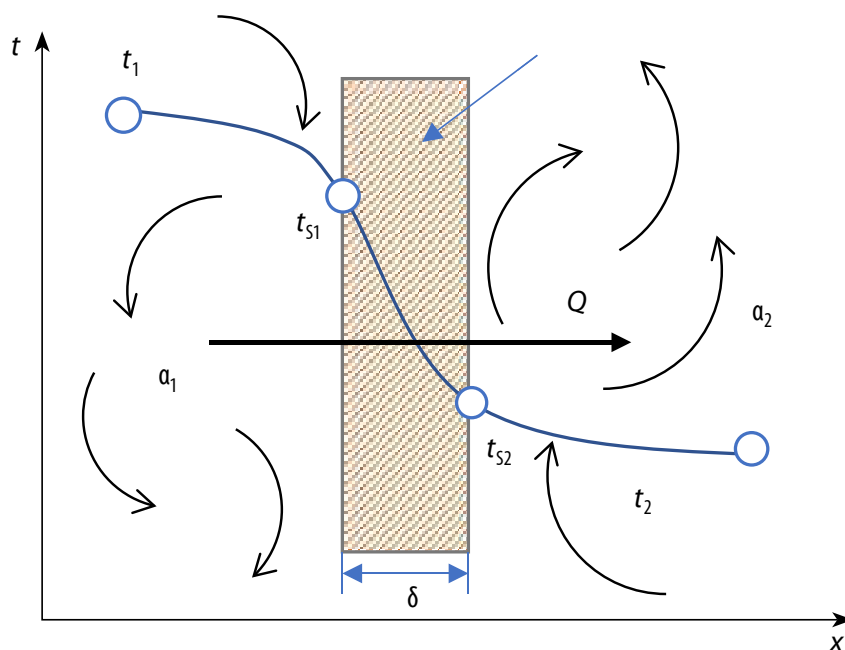
$$\dot{Q} = \alpha_2 (t_{s2} - t_2) \cdot S \quad (\text{W}). \quad (2.3.)$$

Stacionāra procesa gadījumā šīs trīs siltuma plūsmas ir vienādas un ir spēkā sakarība:

$$\dot{Q} = \alpha_1 (t_1 - t_{s1}) \cdot S = \frac{\lambda}{\delta} (t_{s1} - t_{s2}) \cdot S = \alpha_2 (t_{s2} - t_2) \cdot S. \quad (2.4.)$$

No pēdējās sakarības var izteikt siltuma pārejas procesu raksturojošo siltuma pārejas koeficientu K :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \quad (2.5.)$$



2.1. att. Siltuma pāreja caur plakanu sienu.

līdz ar to kopējā siltuma plūsma ir:

$$\dot{Q} = K \cdot \Delta t \cdot S \quad (\text{W}), \quad (2.6.)$$

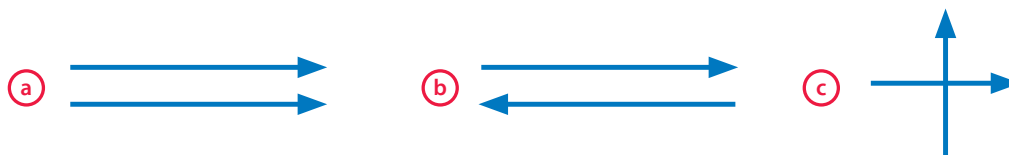
kur $\Delta t = t_1 - t_2$, °C,

S – sildvirsmas laukums, m².

2.

Vienādojums (2.6.) ir izmantojams gadījumos, kad virsmas atsevišķos punktos temperatūra ir vienāda un siltuma pārejas process ir stacionārs. Praksē šādi gadījumi ir ļoti reti, parasti siltumnesēja temperatūra dažādās virsmas vietās mainās: karstais atdziest; aukstais uzsilst. Aprēķinos izmanto vidējo logaritmisko temperatūras starpību Δt_{vid} .

Darba šķidruma temperatūra dažādās sildvirsmas vietās mainās atkarībā no to kustības organizācijas siltummainī. 2.2. att. redzamas populārākās darba šķidrumu kustības shēmas.

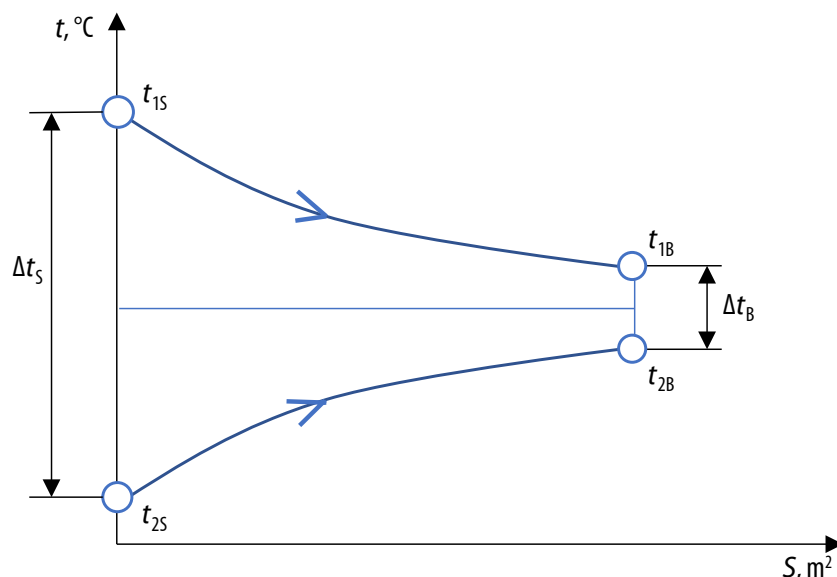


2.2. att. Darba šķidruma plūsmas organizācijas shēmas: a) līdzplūsma; b) pretplūsma; c) šķērsplūsma

Līdzplūsmas gadījumā (2.3. att.) vidējo temperatūru starpību siltuma apmaiņas procesā siltummainī nosaka šādi:

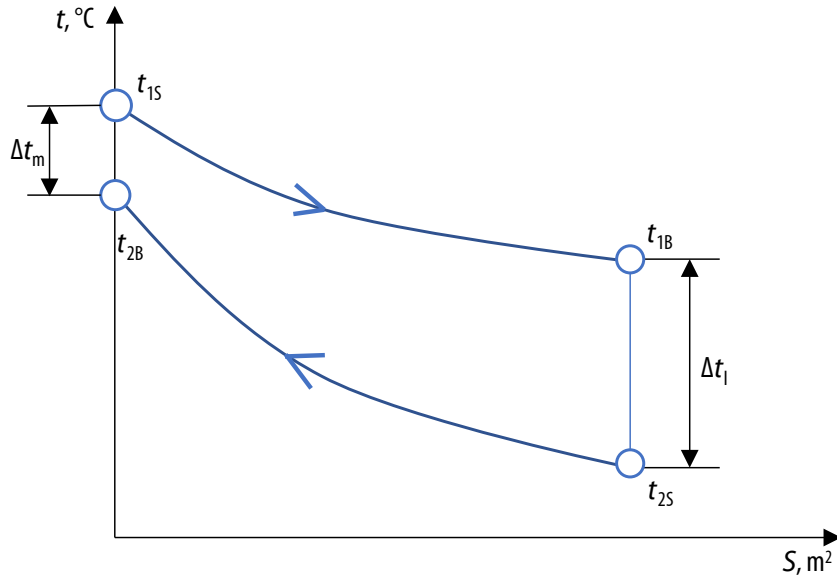
$$\Delta t_{\text{vid}} = \frac{\Delta t_S - \Delta t_B}{\ln \frac{\Delta t_S}{\Delta t_B}}, \quad (2.7.)$$

kur $\Delta t_S = t_{1S} - t_{2S}$; $\Delta t_B = t_{1B} - t_{2B}$.



2.3. att. Darba šķidrumu temperatūras izmaiņas siltummainī līdzplūsmas gadījumā.

Pretplūsmas gadījumā (2.4. att.) procesa vidējo temperatūras starpību nosaka, ņemot vērā darba šķidruma lielāko Δt_1 un mazāko Δt_m temperatūras starpību.



2.4. att. Darba šķidrumu temperatūras izmaiņas siltummainī pretplūsmas gadījumā.

$$\Delta t_{\text{vid}} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_m}}, \quad (2.8.)$$

kur $\Delta t_1 = t_{1B} - t_{2S}$; $\Delta t_m = t_{1S} - t_{2B}$, (2.4. att.).

Pārnesto siltuma daudzumu, kas pāriet no karstā siltumnesēja uz auksto, parasti nosaka no siltuma bilances vienādojuma:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 + \dot{Q}_{\text{zud}}, \quad (2.9.)$$

kur \dot{Q}_1 – karstā siltumnesēja atdotais siltuma daudzums, W;

\dot{Q}_2 – aukstā siltumnesēja uzņemtais siltuma daudzums, W;

\dot{Q}_{zud} – siltuma zudumi apkārtējā vidē, W.

Ja siltuma apmaiņa notiek bez agregātstāvokļa maiņas, \dot{Q}_1 un \dot{Q}_2 var noteikt pēc formulām:

$$\dot{Q}_1 = G_1 c_1 (t_{1S} - t_{1B}) \quad (\text{W}) \quad (2.10.)$$

$$\dot{Q}_2 = G_2 c_2 (t_{2B} - t_{2S}) \quad (\text{W}) \quad (2.11.)$$

kur G_1, G_2 – šķidrumu masas patēriņš, kg/s;

c_1, c_2 – šķidrumu īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K);

t_S, t_B – attiecīgā šķidrumu sākuma un beigu temperatūra, °C.

Tā kā siltuma plūsmas \dot{Q}_1 un \dot{Q}_2 parasti ir atšķirīgas, izmanto vidējās siltuma plūsmas lielumu \dot{Q}_{vid} :

$$\dot{Q}_{\text{vid}} = \frac{\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2}{2} \quad (\text{W}) \quad (2.12.)$$

2. Tagad var aprēķināt vidējo siltuma pārejas koeficientu gan pretplūsmas, gan līdzplūsmas gadījumā:

$$K_{\text{vid}} = \frac{\dot{Q}_{\text{vid}}}{S \cdot \Delta t_{\text{vid}}} \quad \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right) \quad (2.13.)$$

2.2. Siltummaiņos izmantojamie siltuma nesēji

Visus siltumnesējus var klasificēt pēc pielietojuma, agregātstāvokļa un darba temperatūras diapazona. Svarīgākais rādītājs ir darba temperatūras diapazons. Šajā gadījumā var izdalīt šādas siltumnesēju grupas:

- ♦ augstas temperatūras siltumnesēji;
- ♦ vidējas temperatūras siltumnesēji;
- ♦ zemas temperatūras siltumnesēji;
- ♦ siltumnesēji, kurus lieto kriogēnās temperatūrās.

Pie augstas temperatūras siltumnesējiem pieskaita dūmgāzes, atgāzes no ceļiem, krāsnīm. Parasti to temperatūra ir robežās no 1000 °C līdz 1500 °C. Par šķidriem augstas temperatūras siltumnesējiem uzskata vielas, kuru viršanas temperatūra pie atmosfēras spiediena ir lielāka par 200 °C. Pie šīs grupas pieder minerāleļļas, silīcijorganiskie savienojumi un difenilsavienojumi, sāļu kausējumi un šķidri metāli (2.1. tabula).

2.1. tabula

Dažu augstas temperatūras siltumnesēju raksturojums

Siltumnesējs	Viršanas temperatūra, °C atmosfēras spiedienā
Minerāleļļa	300–500
Difenils	255
Silīcijorganiskie savienojumi	440
Nātrijs	880
Nātrija un kālija sakausējums	780

Pie vidējas temperatūras siltumnesējiem pieskaita ūdeni, ūdens tvaiku un gaisu. Ūdens tvaiku var izmantot līdz 650 °C, ūdeni līdz 375 °C temperatūrai, bet gaisu līdz 100 °C.

Zemas temperatūras siltumnesēju viršanas temperatūra pie spiediena 0,1 MPa, nepārsniedz 0 °C. Pie šīs grupas pieskaita aukstuma aģentus CO₂, NH₃, freonus. Par kriogēniem siltumnesējiem parasti sauc sašķidrīnātas gāzes: N₂, He, O₂ u. c., to lietošanas diapazons parasti ir temperatūrā zemākā par 150 °C. Tabulā (2.2. tabula.) ir apkopoti populārāko siltumnesēju darba temperatūras un spiediena diapazoni, ko lieto dažāda tipa siltummaiņos.

2.2. tabula

Orientējoša siltumnesēju temperatūra un darba spiediens

Siltumnesējs	$t, ^\circ\text{C}$ (maksimums vai diapazons)	P, MPa (maksimums vai diapazons)
Sašķidrīnāts hēlijs	-272	0,1
Sašķidrīnāts N ₂ , O ₂ , gaiss	-210	20,0
Sašķidrīnāts ūdeņradis	-257	1,0
Freons – 12, 22, NH ₃ , CO ₂	-70–0	1,5
Antifrīzi	-65±40	0,1–0,2
Minerāleļļas	0–215	0,1
Ūdens	0–374	0,1 – 22,5
Ūdens tvaiks	0–650	0,1–30,0
Silīcijorganika	320	0,1
Sāļu kausējums: 40 % NaNO ₂ , 7 % NaNO ₃ , 50 % KNO ₃	150–530	0,1
Dūmgāzes	450–1000	0,1
Elektriskā strāva	~3200	~0,1
Zemas temperatūras plazma	~3500	0,1

Siltuma apmaiņas procesu intensitāte lielā mērā ir atkarīga no siltumnesēju piespiedu kustības ātruma siltummaiņu kanālos un caurulēs. Tabulā (2.3. tabula) dots rekomendējošs siltumnesēja plūsmu ātrums kanālos un caurulēs.

2.3. tabula

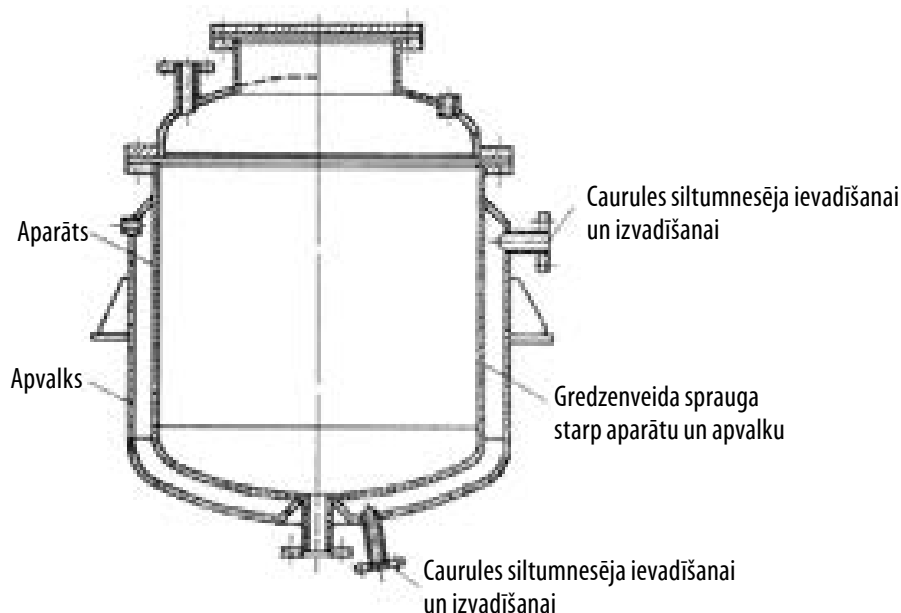
Rekomendējamais siltumnesēju plūsmas ātrums

Vide	Ātrums, m/s
Mazviskozi šķidrums (ūdens, petroleja)	0,5–3
Viskozi šķidrums (eļļas)	0,2–1
Gāzes atmosfēras spiedienā	10–14
Gāzes paaugstinātā spiedienā (līdz 10 MPa)	15–30
Piesātināts ūdens tvaiks	30–50

Izplatītākie siltumnesēji ir ūdens tvaiks, ūdens, gaiss un dūmgāzes. Tas izskaidrojams ar to izplatību dabā, izmaksām un to, ka tie nav toksiski (izņemot atsevišķu degšanas produktu dūmgāzes).

2.3. Rekuperācijas siltummaiņi

Vienkāršākie rekuperācijas siltummaiņi ir sildošie vai dzesējošie apvalki (2.5. att.), kas apņem aparāta korpusu. Spraugā starp apvalku un aparātu cirkulē nepieciešamais siltuma nesējs (ūdens tvaiks, ūdens u. c.).

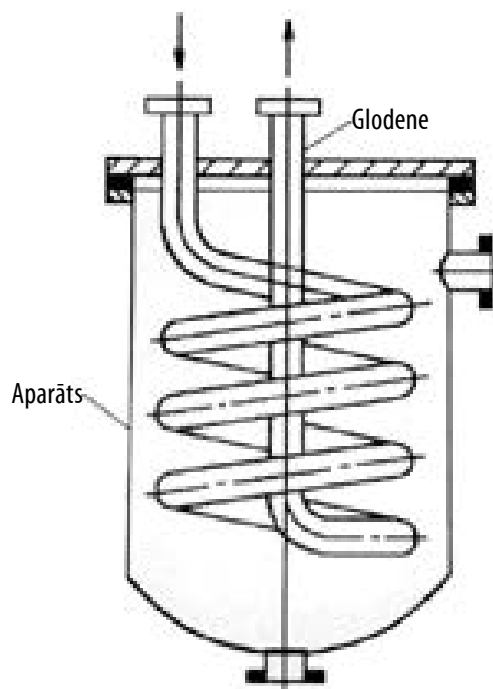


2.5. att. Aparāts ar siltummaiņas apvalku.

Apsildot aparātu (ar tvaiku), to ievada starp aparātu un apvalku no augšas, tas kondensējas un virzās uz leju, uz kondensāta izplūdes vietu. Nekondensējamās gāzes uzkrājas tvaika apvalka augšdaļā, no kurienes tās izvada. Lai nodrošinātu lielāku īpatnējo sildvirsmu, aparāta iekšienē ievieto glodenes tipa siltummaini (2.6. att.).

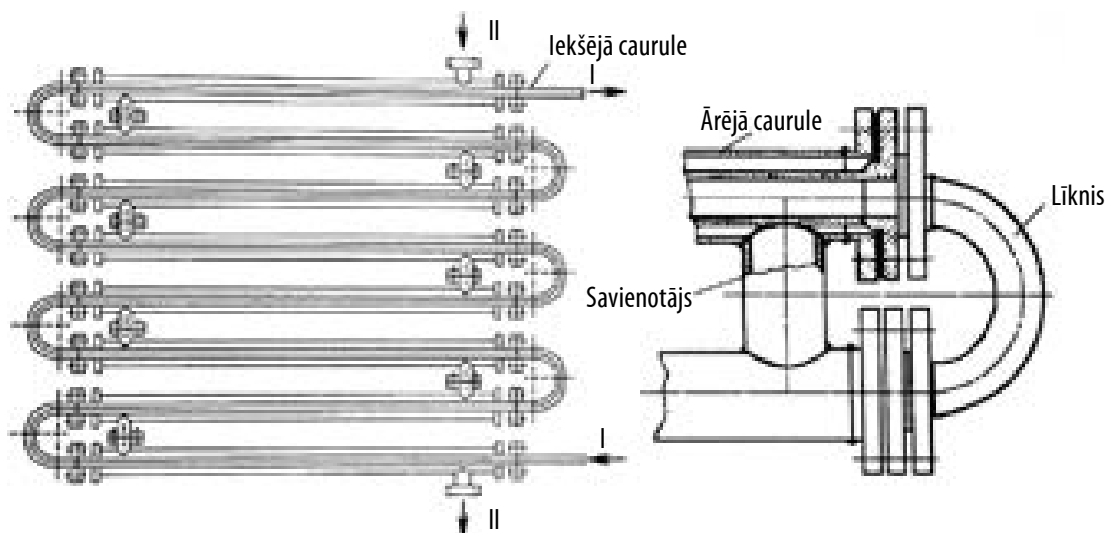
Glodene lietojama arī kā atsevišķs siltuma apmainītājs, ja sildvirsmā jāizgatavo no speciāla materiāla (ķīmiski inerta), ja sildāmā šķidrā fāze satur mehāniskus piemaisījumus.

Glodenes un tvaika apvalki parasti tiek izmantoti periodiskas darbības iekārtās. Šiem siltummaiņiem ir samērā zema ražība. Siltuma apmaiņas procesi tajos ir grūti regulējami, kas samazina to lietošanas sfēru.



2.6. att. Glodenes tipa siltummainis.

Neliela siltumnesēja patēriņa gadījumā izmanto siltummaiņus caurule caurulē. Tie izveidoti no atsevišķiem elementiem, kas sastāv no virknes ārējo lielāka diametra cauruļu, kurās ievietotas mazāka diametra caurules (2.7. att.).

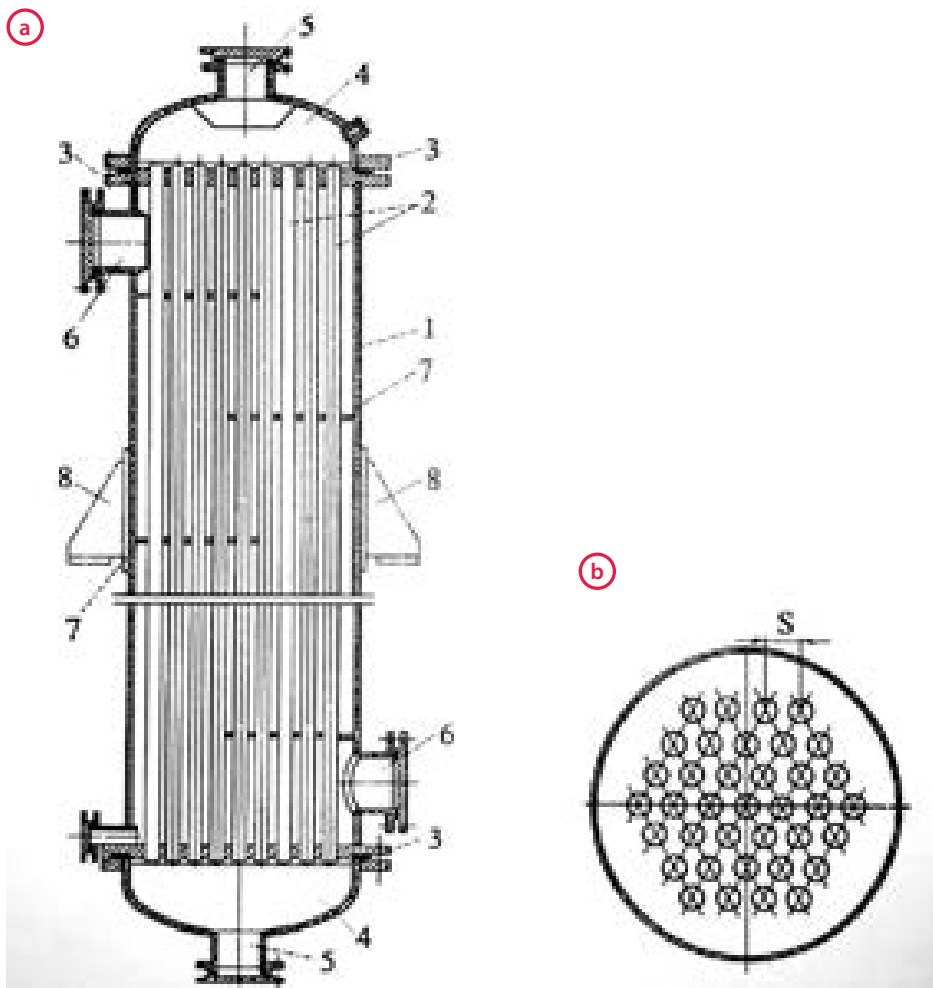


2.7. att. Siltummainis caurule caurulē.

Atsevišķi elementi savienoti virknē, izmantojot līkņus un savienotājus. Viens no siltumnesējiem – I, pārvietojas pa iekšējo cauruli, bet otrs siltumnesējs II – starpcauruļu telpā. Siltuma apmaiņa notiek caur iekšējās caurules sienīņu. Šajos siltummaiņos var panākt lielu abu siltumnesēju ātrumu, kas nodrošina augstu siltuma pārejas koeficienta vērtību.

Vieni no plašāk izmantotajiem nepārtrauktas darbības siltummaiņiem ir cauruļveida siltummaiņi (2.8. att.), kurus izmanto, lai realizētu siltuma apmaiņas procesu starp dažādā agregātstāvoklī esošām plūsmām (tvaiks–šķidrums, šķidrums–šķidrums, gāze–šķidrums).

2.



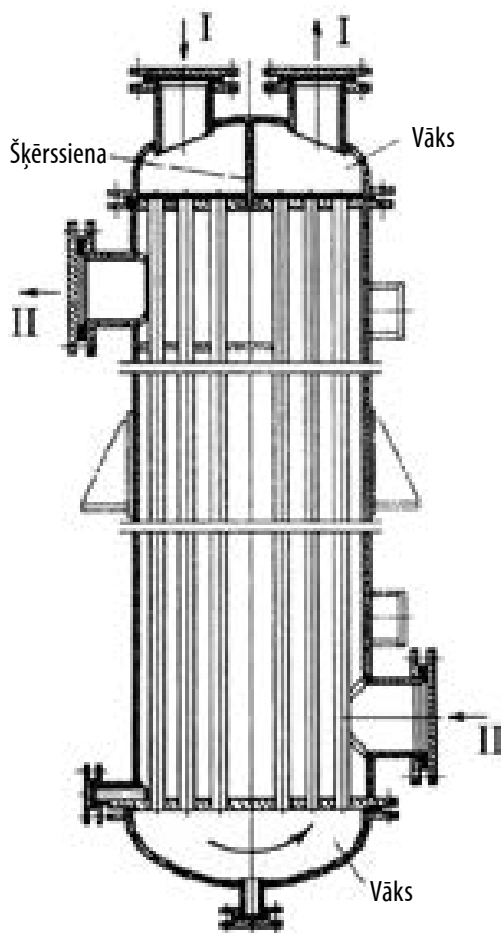
2.8. att. Cauruļveida siltummainis: a) 1 – korpusis; 2 – caurules; 3 – cauruļu plate; 4 – vāks; 5 – caurules siltumnesēja pievadīšanai un izvadīšanai no cauruļu telpas; 6 – caurules siltumnesēja pievadīšanai un izvadīšanai no starpcauruļu telpas; 7 – starpcauruļu telpas šķērssienu; 8 – montāžas atbalsta ķepas; b) cauruļu izvietojums platēs.

Cauruļveida siltummainis sastāv no caurulēm 2, kas ar galiem iestiprinātas platēs – 3. Caurules platēs var nostiprināt vienādmalu trīsstūra virsotnēs ar soli $s = (1,2 - 1,3)d_c$, (sk. 2.8. b att.), kur d_c – caurulītes ārējais diametrs. Caurules ievietotas korpusā 1, kas no augšas un apakšas ir noslēgts ar vāku 4.

Cauruļu un starpcauruļu telpas ir nodalītas. Viens no siltumnesējiem pārvietojas pa caurulēm, otrs – starpcauruļu telpā. Parasti izmanto caurules ar

diametru no 12 līdz 38 milimetriem, cauruļu garums var sasniegt 6 metrus. Praksē pie vienāda siltumnesēju patēriņa siltuma atdeves koeficients ir mazāks starpcauruļu telpas pusē. Lai novērstu šo parādību, palielina siltumnesēja kustības ātrumu, izvietojot starpcauruļu telpā šķērssienu.

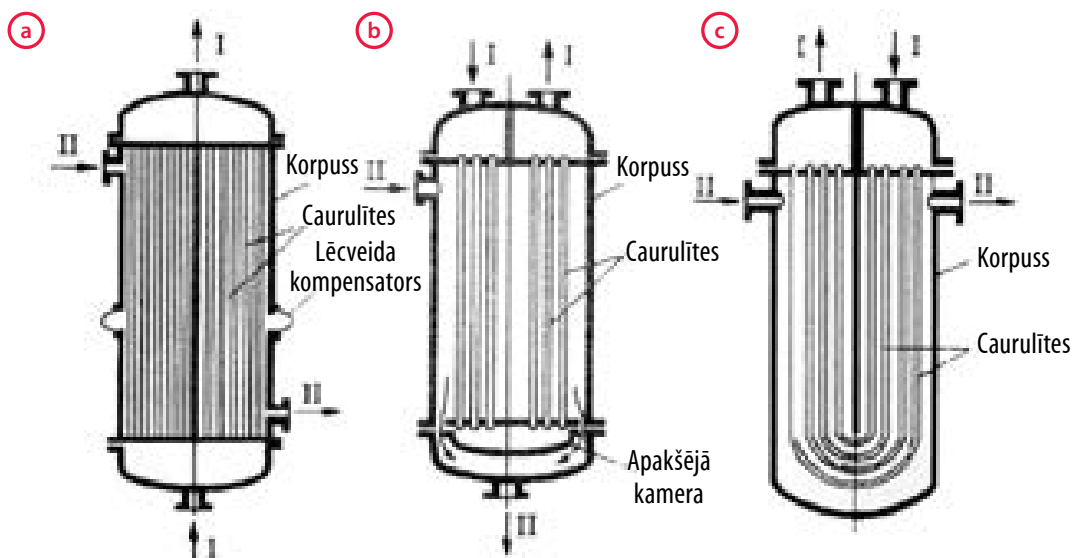
2. Cauruļveida siltummaiņus, atkarībā no apstākļiem, var novietot vertikāli vai horizontāli. Lai palielinātu siltumnesēja ātrumu un intensitāti, siltuma apmaiņas procesā izmanto vairākpakāpju cauruļveida siltummaiņus (2.9. att.). Izmantojot šķērssienu, caurules sadala vairākās grupās. Tā divu pakāpju aparātā, pateicoties šķērssienai augšējā vākā, siltumnesējs I plūst cauri pusei cauruļu, apakšā pagriežas un plūst cauri otrai pusei cauruļu. Otrs siltumnesējs II pārvietojas starpcauruļu telpā, kurā arī ir izvietotas horizontālās šķērssienu.



2.9. att. Divpakāpju cauruļveida siltummainis.

Siltuma apmaiņas intensitātes palielināšana vairākpakāpju cauruļveida siltummaiņos vienlaikus izraisa hidrauliskās pretestības pieaugumu, kļūst sarežģītāka arī siltummaiņa konstrukcija. No ekonomiskiem apsvērumiem, pakāpju skaits cauruļveida siltummaiņos parasti nepārsniedz 6. Cauruļveida siltummaiņos darba laikā var rasties ievērojama temperatūras starpība starp caurulītēm un aparāta korpusu. Dažādas korpusa un caurulīšu lineārās ter-

miskās izplešanās rezultātā rodas termiskie spriegumi. Termiskā deformācija ir sevišķi bīstama, ja korpuss un caurulītes ir izgatavotas no dažāda materiāla. Ja temperatūras starpība caurulēs un korpusā pārsniedz $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, izmanto cauruļveida siltummaiņus ar termiskās deformācijas kompensatoriem (2.10. att.).



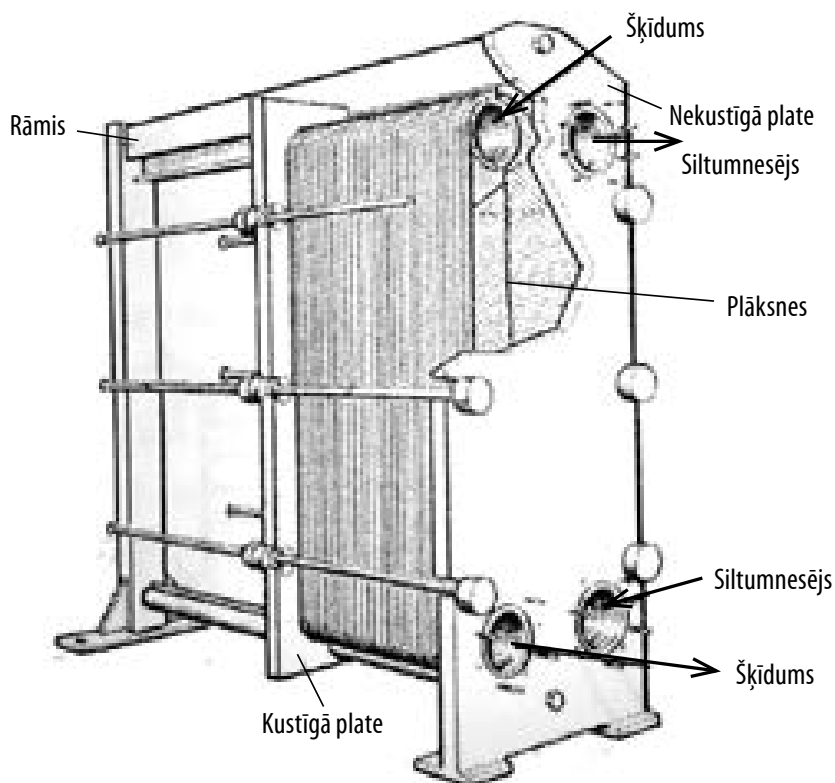
2.10. att. Cauruļveida siltummainis ar termiskās deformācijas kompensatoriem: a) aparāts ar lēcveida kompensatoru; b) aparāts ar kustīgu apakšējo kameru; c) aparāts ar U veida caurulītēm.

2.10. a att. redzama siltummaiņa shēma ar lēcveida kompensatoru uz korpusa. Šajā aparātā termiskās deformācijas kompensējas, tam saspiežoties vai izplešoties. Siltummaini ar lēcveida kompensatoru izmanto pie nelielām (10–15 mm) termiskām deformācijām un neliela (līdz 0,5 MPa) spiediena starpcauruļu telpā.

Siltummaiņus ar peldošo galviņu jeb kustīgu apakšējo kameru (2.10. b att.) izmanto pie ievērojamām savstarpējām korpusa un caurulišu pārbīdēm, jo viena no caurulišu platēm nav savienota ar korpusu un var brīvi pārvietoties.

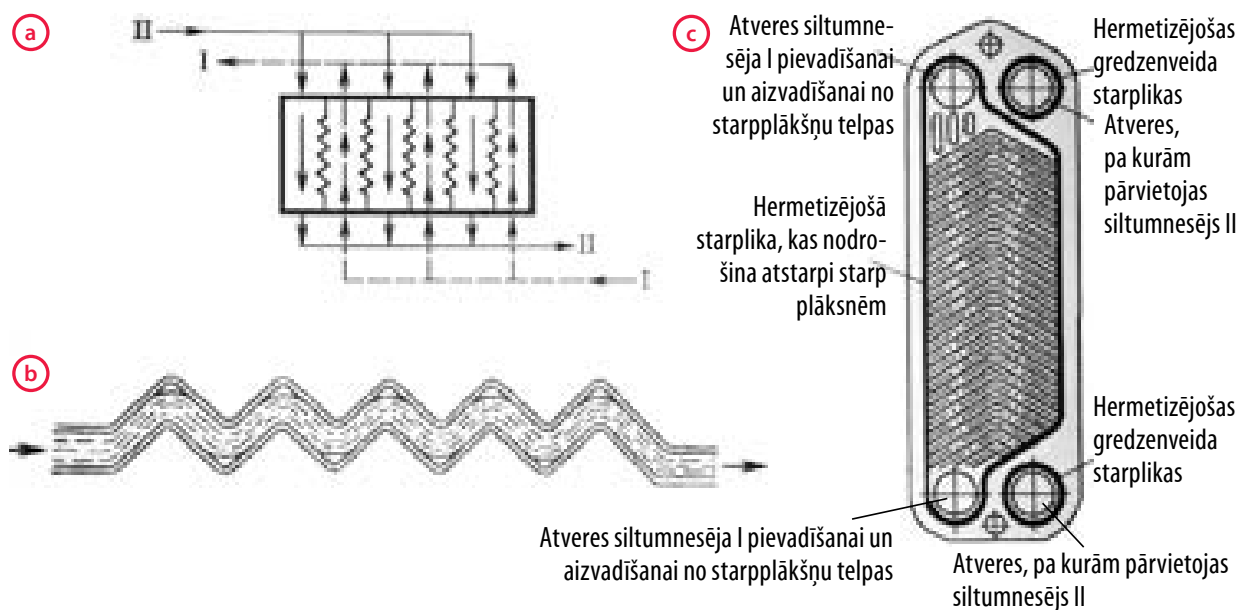
Siltummainī ar U veida caurulītēm (2.10. c att.) abi caurules gali iestiprināti vienā cauruļu platē, kas pieļauj caurulēm brīvi pagarināties. Jāatzīmē, ka šajos aparātos ir apgrūtināta cauruļu iekšējo sienīņu tīrīšana.

Dažādos tehnoloģiskajos procesos ļoti plaši izmanto plākšņuveida siltummaiņus. Šīs iekārtas ir ļoti kompaktas, īpatnējā sildvirsmā var sasniegt pat $1500\text{ m}^2/\text{m}^3$ (2.11. att.).



2.11. att. Plākšņuveida siltummainis.

Plākšņu siltummaiņi sastāv no gofrētām plāksnēm, kuras savstarpēji atdala elastīgas starplikas. Saspiežot šādas plāksnes, izveidojas šauri (3–6 milimetri) izolēti kanāli, pa kuriem pretplūsmā pārvietojas siltumnesējs un sildāmais vai dzesējamais šķidrums (2.12. att.).



2.12. att. Plākšņu siltummaiņa darbības princips un tā plākšņu elementu uzbūve: a – siltumnesēja I un II kustības shēma siltummaiņī; b – šķidruma plūsmas raksturs kanālos starp divām plāksnēm; c – atsevišķas viena tipa plāksnes uzbūve.

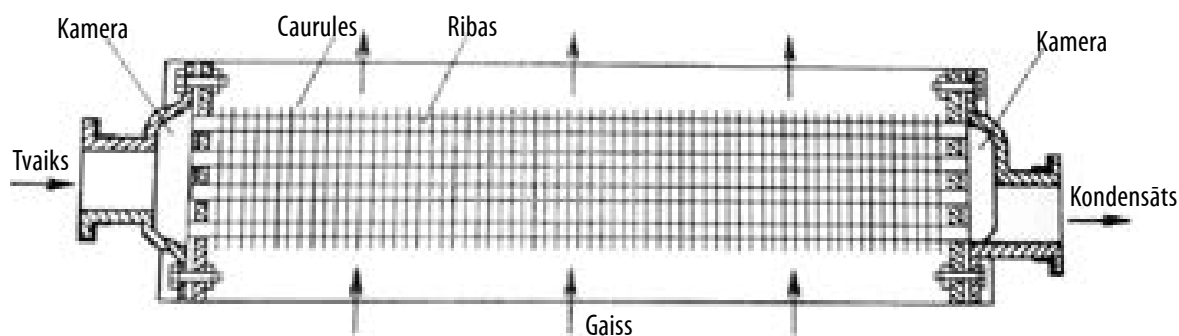
Šķidrums plūsmas ātrums kanālos sasniedz 2 līdz 3 metri sekundē, tas nodrošina intensīvu turbulenci, līdz ar to siltuma atdeves koeficienta vērtība var sasniegt no 3000 līdz 4000 W/(m²·K).

2.

Plāksnes presē no lokšņu tērauda, alumīnija, melhiora, titāna, citiem metāliem un to sakausējumiem. Plāksnes biezums var būt 0,5 līdz 2 milimetri, vienas plāksnes sildvirsmas – no 0,15 līdz 1,4 kvadrātmetriem. Plāksņu siltummaiņus izgatavo gan izjaucamus, gan neizjaucamus ar viļņotu virsmu, kas plūsmai starpplāksņu telpā nodrošina turbulentu raksturu (2.12. att.). Izjaucamie siltummaiņi darbojas temperatūras intervālā no 20 līdz 150 °C, spiediens parasti nepārsniedz 2 MPa, neizjaucamie siltummaiņi var darboties līdz 400 °C temperatūrai un 3 MPa spiedienam. Plāksņveida aparātus izmanto šķidrumsildīšanai un dzesēšanai, tīra tvaika kondensācijai, piemēram, sildkameras ietvaices aparātos.

Tehnikā pietiekami bieži ir sastopami siltuma apmaiņas procesi, kuros ir ļoti atšķirīgi siltuma atdeves koeficienti abās siltuma pārejas virsmas pusēs. Šādos gadījumos siltuma apmaiņas virsmu izgatavo ribotas caurules veidā. Kā ribota siltummaiņa piemērs minami kaloriferi, kurus izmanto gaisa sildīšanai ar piesātinātu ūdens tvaiku. Attēlā (2.13. att.) redzama šāda kalorifera sekcijas shēma.

Tvaiku ievada caurulē, kur tas kondensējas, atdodot siltumu gaisam, kas apskalo riboto virsmu. Siltuma atdeves koeficients piesātināta tvaika pusē uz caurules sienas sasniedz vērtību $\alpha_1 = 12000$ W/(m²·K). Savukārt no caurules sienas uz gaisu tikai $\alpha_2 = 12-50$ W/(m²·K). Caurules ribojums gaisa pusē ļauj ievērojami palielināt siltummaiņa siltumslodzi, palielinot siltuma apmaiņas laukumu siltumnesēja pusē ar mazu siltuma atdeves koeficientu. Šis princips tiek izmantots, sildot vai dzesējot ļoti viskozus šķidrumus un gāzes. Ribotās caurules jāizgatavo no materiāliem, kuriem ir pietiekami liels siltumvadītspējas koeficients. Lai samazinātu aparātu hidraulisko pretestību, ribu virsmai jābūt novietotai paralēli siltumnesēja (gaisa) plūsmai. Ribojuma forma mēdz būt ļoti dažāda.



2.13. att. Kalorifera sekcijas shēma.

2.4. Darba uzdevumi

- ♦ Eksperimentāli nosakiet vidējo siltuma pārejas koeficientu k_{vid} līdzplūsmas un pretplūsmas gadījumā.
- ♦ Salīdzināt aprēķinātās k_{vid} vērtības un spriest par dzesēšanas režīmu (līdzplūsmas vai pretplūsmas) efektivitāti. Kuru režīmu jūs izvēlētos? Izvēli pamatot.
- ♦ Izvērtēt aprēķinātā siltuma pārejas koeficienta k_{vid} vērtības ticamību. Norādīt informācijas avotu!

Siltummaiņa izvēli, plūsmas ātrumu un temperatūru norāda pasniedzējs!

Ieteicams izvēlēties vienu temperatūru un divus plūsmas ātrumus (piem., 50 °C, 0,5 L/min un 1,5 L/min), vai otrādi – vienu plūsmas ātrumu un divas atšķirīgas temperatūras (2.4. tabula).

2.4. tabula

Darba varianti

Nr.	Siltummainis	Plūsmas ātrums, L/min				Temperatūra, °C			
1	Plākšņu	0,5	1,0	1,5	2,0	40	50	60	70
2	Cauruļveida	0,5	1,0	1,5	2,0	40	50	60	70

2.5. Iekārtas apraksts

Siltumapmaiņas iekārta (2.14. att.) sastāv no vadības bloka, siltummaiņiem (2.15. att.), karstā ūdens rezervuāra un caurulēm ar spraudkontaktiem. Iekārtas darbības pamatā cirkulējošas aukstā un karstā ūdens plūsmas, kas pieslēgtas pie analizējoša bloka siltummaiņa. Siltummainī notiek siltuma pārnese no karstā ūdens uz auksto ūdeni. Izvēlētais siltummainis tiek pievienots vadības blokam ar spraudkontaktiem. Karstajam un aukstajam ūdenim šie spraudkontakti ir dažādi, lai tos būtu vieglāk pareizi pievienot siltummainim. Vadības panelī uzstādīto karstā ūdens temperatūru nodrošina elektriskais sildelements. Uz iekārtas korpusa atrodas arī iekārtas shēma (2.16. att.).

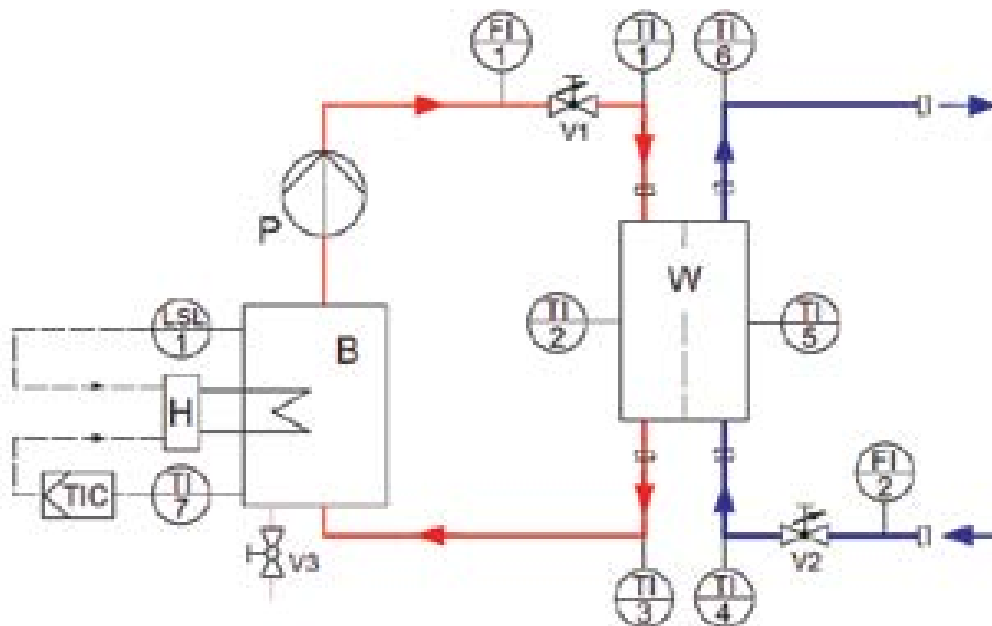
2.



2.14. att. Siltummaiņa iekārta **WL110**: 1 – pamatne; 2 – savienojuma bloks; 3 – korpuss ar iekārtas shēmu; 4 – siltā ūdens rezervuārs ar elektrisko sildelementu; 5 – korpusa turpinājums; 6 – vadības panelis; 7 – spraudkontakti, 8 – skrūves siltummaiņa piestiprināšanai; 9 – karstā ūdens ventiļi; 10 – aukstā ūdens ventiļi.



2.15. att. Cauruļveida (a) un plāksņu (b) siltummainis.



2.16. att. Siltummaiņa shēma ar siltā (sarkana) un aukstā (zila) ūdens plūsmas attēlojumu: B – karstā ūdens rezervuārs; FI1 – karstā ūdens plūsma; FI2 – aukstā ūdens plūsma; H – karstā ūdens sildītājs; LSL1 – līmeņu pārslēgs; P – karstā ūdens sūknis; TI1 – karstā ūdens temperatūra ieplūdē; TI2 – karstā ūdens temperatūra centrā; TI3 – karstā ūdens temperatūra izplūdē; TI4 – aukstā ūdens temperatūra ieplūdē; TI5 – aukstā ūdens temperatūra centrā; TI6 – aukstā ūdens temperatūra izplūdē; TI7 – karstā ūdens temperatūra; TIC – temperatūras regulators; V1 – karstā ūdens vārsts; V2 – aukstā ūdens vārsts; V3 – lodveida krāns; W – siltummainis.

2.6. Darba gaita

1. Novieto izvelēto siltummaini uz pamatnes un saslēdz to līdzplūsmā vai pretplūsmā.
2. Pārbauda ūdens līmeni karstā ūdens rezervuārā.
3. Galveno slēdzi ieslēdz stāvoklī „ON”.
4. Atver aukstā ūdens padeves krānu.
5. Atver aukstā ūdens padevi regulējošo ventili.
6. Atver karstā ūdens padevi regulējošo ventili.
7. Ieslēdz sūkni.
8. Ar bultiņām uzstāda vajadzīgo ūdens temperatūru uz kontroliera.
9. Noregulē vajadzīgo aukstā ūdens plūsmas ātrumu ar ventili.
10. Noregulē vajadzīgo karstā ūdens plūsmas ātrumu ar ventili.
11. Ieslēdz sildītāju un gaida, līdz iestājas stacionārs režīms.
12. Kad iestāties stacionārs režīms, nolasa un fiksē rādījumus.
13. Iestata nākamā uzdevuma parametrus (plūsmas ātrums, temperatūra).
14. Beidzot eksperimentu, izslēdz sildītāju un sūkni un aizver ūdens plūsmas ventiļus.

15. Noslēdz aukstā ūdens padevi.
16. Galveno slēdzi novieto stāvoklī „0”.

Mērījumu un aprēķinu tabulu ieteicams sastādīt šādu (2.5. tabula):

2.5. tabula

Mērījumu un aprēķinu tabulas piemērs

Nr.	Siltummainis	Plūsmas režīms	Plūsmas ātrums, L/min	Sildītāja temperatūra, °C	$T_{1'}$ °C	$T_{3'}$ °C	$T_{4'}$ °C	$T_{6'}$ °C	Q_{vidr} W	k_{vidr} W/m ² ·K
1	plākšņu	līdzplūsma	1,0	50	48,2	40,3	16,7	24,6	?	?
2	plākšņu	pretplūsma	...	...	...	...	...	...	...	...

2.7. Kontroljautājumi

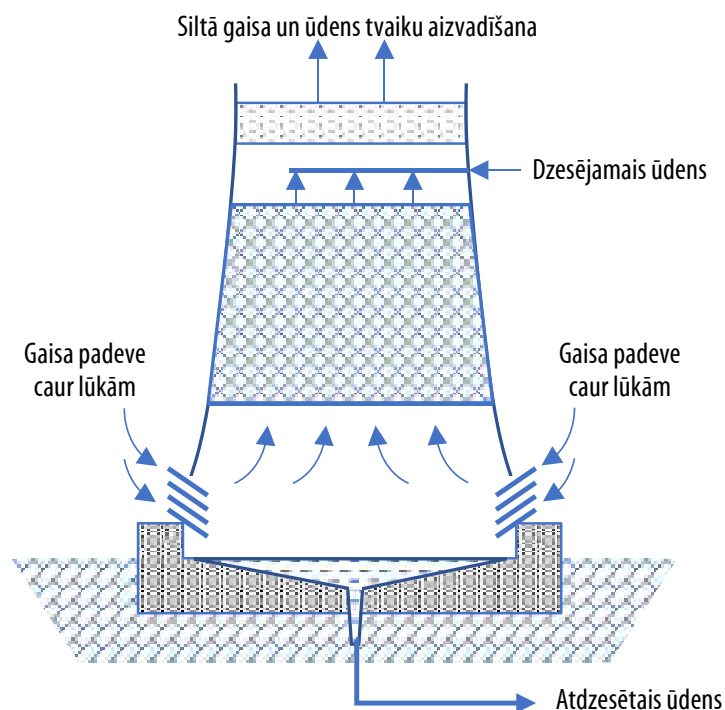
- ◆ Ar ko atšķiras tieša un netieša siltuma apmaiņa?
- ◆ Nosaukt un raksturot trīs dažādus siltuma izplatīšanās veidus, minēt piemērus!
- ◆ Kādos trīs posmos var iedalīt siltuma pāreju?
- ◆ Pēc kādiem parametriem var salīdzināt siltummaiņus?
- ◆ Nosaukt siltummaiņu tipus, raksturot tos, nosaukt priekšrocības un trūkumus!
- ◆ Kāpēc eksperimentu laikā rekomendē lietot ūdeni ar zemu cietību?
- ◆ Kāds plūsmas režīms nodrošina ”labāku” siltuma atdevi?

3. DZESĒS TORNIS (GRADĒTAVA)

3.1. Ūdens dzesēšanas torņa uzbūve un darbības princips

Daudzos ražošanas procesos dzesēšanai līdz parastai temperatūrai (15–30 °C) visbiežāk kā dzesējošo aģentu izmanto ūdeni no dabīgām ūdenstilpnēm (upes, ezeri, dīķi) un artēziskiem urbumiem. Dabīgā ūdens tilpnes temperatūra mainās atkarībā no sezonas, artēzisko urbumu ūdens temperatūra ir pastāvīga un parasti ir robežās no 8 °C līdz 12 °C.

Lai ekonomētu ūdens resursus, visās modernās ražotnēs izmanto ūdens cirkulācijas sistēmas, kas nodrošina atkārtotu dzesējošā ūdens izmantošanu. Ūdens patēriņa samazināšanai ir liela ekonomiska un ekoloģiska nozīme. Lai atdzesētu nelielu daudzumu cirkulācijas ūdens, izmanto izsmidzināšanas baseinus. Ūdeni caur sprauslām izsmidzina, daļēji iztvaikojot, tas atdziest un tiek savākts baseinā. Lai atdzesētu lielu ūdens daudzumu, izmanto gradētavas jeb dzesēšanas torņus (3.1. att.).



3.1. att. Ūdens dzesēšanas tornis.

Dzesēšanas torņi ir iekārtas cirkulācijas ūdens atdzesēšanai, tam tieši kontaktējoties ar gaisu. Konstruktīvi gradētavas ir izveidotas kā augsti torņi, kuros izvietots pildījums. Pildījums parasti ir izgatavots no koka vai plastmasas režģiem, kas izvietoti viens virs otra. Gradētavās no augšas izsmidzina ūdeni, kas, tekot uz leju, aprasina pildījumu. Pretplūsmā ūdenim pārvietojas gais.

Augšupejošo gaisa plūsmu rada dabiskā velkme, kas rodas, samazinoties gaisa blīvumam tornī. Dabiskā velkme dzeses tornī pieaug, palielinot tā augstumu, kas var sasniegt 100 metru. Ūdens atdzesēšanas process dzeses torņos notiek, pateicoties daļējai ūdens iztvaikošanai un siltuma apmaiņai ar gaisu. Iztvaikojot 1 % ūdens palikušā ūdens temperatūra samazinās vidēji par 6 °C.

3. Iztvaikošana notiks, ja ūdens tvaiku parciālais spiediens gaisā būs mazāks nekā piesātināta ūdens tvaika spiediens. Gaisa spēja uzņemt ūdens tvaikus raksturo tā dzesēšanas efektu, sasniedzot gaisa relatīvo mitrumu 100 %. Turpmāka ūdens atdzišana iztvaikošanas rezultātā nav iespējama, bet notiek vienīgi siltuma apmaiņas rezultātā starp ūdeni un gaisu, ko limitē temperatūras starpība.

Gradētavu priekšrocības salīdzinājumā ar izsmidzināšanas baseiniem ir neliels aizņemtais laukums un mazāks ūdens patēriņš. Savukārt gradētavās ar dabisku ventilāciju lielu ietekmi atstāj dabiskie faktori, kā vēja virziens un ātrums, gaisa mitrums un temperatūra, kurus nav iespējams kontrolēt.

Bez dabiskās velkmes torņiem pastāv arī piespiedu velkmes torņi, kuros gaisa kustību nodrošina ventilatori, kā arī abu šo veidu kombinācija.

3.2. Mitrā gaisa svarīgākie parametri un H - x diagramma

Kā jau minēts, gaiss gradētavās ir vienlaikus siltuma pārnēsējs un mitruma uzņēmējs. Absolūti sausa gaisa un ūdens tvaiku maisījumu sauc par mitru gaisu. Svarīgākie parametri, kas raksturo mitru gaisu, ir relatīvais mitrums φ , mitruma saturs x un siltuma saturs, jeb entalpija H .

Gaisa relatīvais mitrums ir ūdens tvaiku parciālā spiediena P_t attiecība pret piesātinātu tvaiku parciālo spiedienu dotajā temperatūrā P_p :

$$\varphi = \frac{P_t}{P_p} \cdot 100 \% \quad (3.1.)$$

Relatīvais mitrums raksturo gaisa piesātinātību ar ūdens tvaiku. Absolūti sausam gaisam $P_t = 0$ un līdz ar to arī $\varphi = 0$. Ar ūdens tvaiku piesātinātam gaisam $P_t = P_p$ un $\varphi = 100 \%$ jeb $\varphi = 1$.

Gaisa mitruma saturs parāda to mitruma daudzumu kilogramos vai gramos, ko satur mitrais gaiss, rēķinot uz vienu kilogramu sausa gaisa.

Gaisa mitruma saturu parasti apzīmē ar x un tas ir proporcionāls tvaika ρ_t un sausa gaisa ρ_g blīvuma attiecībai:

$$x = \frac{\rho_t}{\rho_g} \left(\frac{\text{kg mitruma}}{\text{kg sausa gaisa}} \right) \quad (3.2.)$$

jeb

$$x = \frac{\rho_t}{\rho_g} \cdot 1000 \left(\frac{\text{g mitruma}}{\text{kg sausa gaisa}} \right). \quad (3.3.)$$

Siltuma daudzumu, kas nepieciešams viena kilograma vielas sasildīšanai no 0°C līdz $t^\circ\text{C}$ nemainīgā spiedienā, sauc par **siltumu saturu** jeb **entalpiju**.

Mitram gaisam siltuma saturu attiecina uz vienu kilogramu sausa gaisa. Mitrā gaisa siltuma saturs summējas no 1 kg sausā gaisa H_g un x kg ūdens tvaika siltuma satura H_t :

$$H = H_g + H_t \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg sausa gaisa}} \right). \quad (3.4.)$$

Tehnisku aprēķinu veikšanai mitra gaisa parametrus un to izmaiņas var noteikt, izmantojot H - x diagrammu, kas pazīstama kā Moljēra¹ vai Ramzina² diagramma (3.2. att.):

H - x diagramma konstruēta slīpenča koordinātās. Zemo temperatūru diapazonā leņķis starp koordinātu asīm ir 135° . Uz ordinātu ass atlikts mitrā gaisa siltuma saturs jeb entalpija H (kJ/kg sausa gaisa), bet uz abscisu ass – mitruma saturs x (g/kg sausa gaisa).

H - x diagrammā var noteikt šādus mitrā gaisa stāvokļa parametrus:

- ♦ t gaisa temperatūru, $^\circ\text{C}$;
- ♦ H gaisa entalpiju, kJ/kg;
- ♦ x gaisa mitruma saturu, g/kg;
- ♦ φ gaisa relatīvo mitrumu, %;
- ♦ p ūdens tvaiku parciālo spiedienu, kPa (ne visās Moljēra diagrammās);
- ♦ ρ gaisa blīvumu, kg/m^3 (sastopams atsevišķās Moljēra diagrammās).

Labākai H - x uzbūves izpratnei aplūkosim dažus piemērus (sk. 3.2. att. un 3.2. att.).

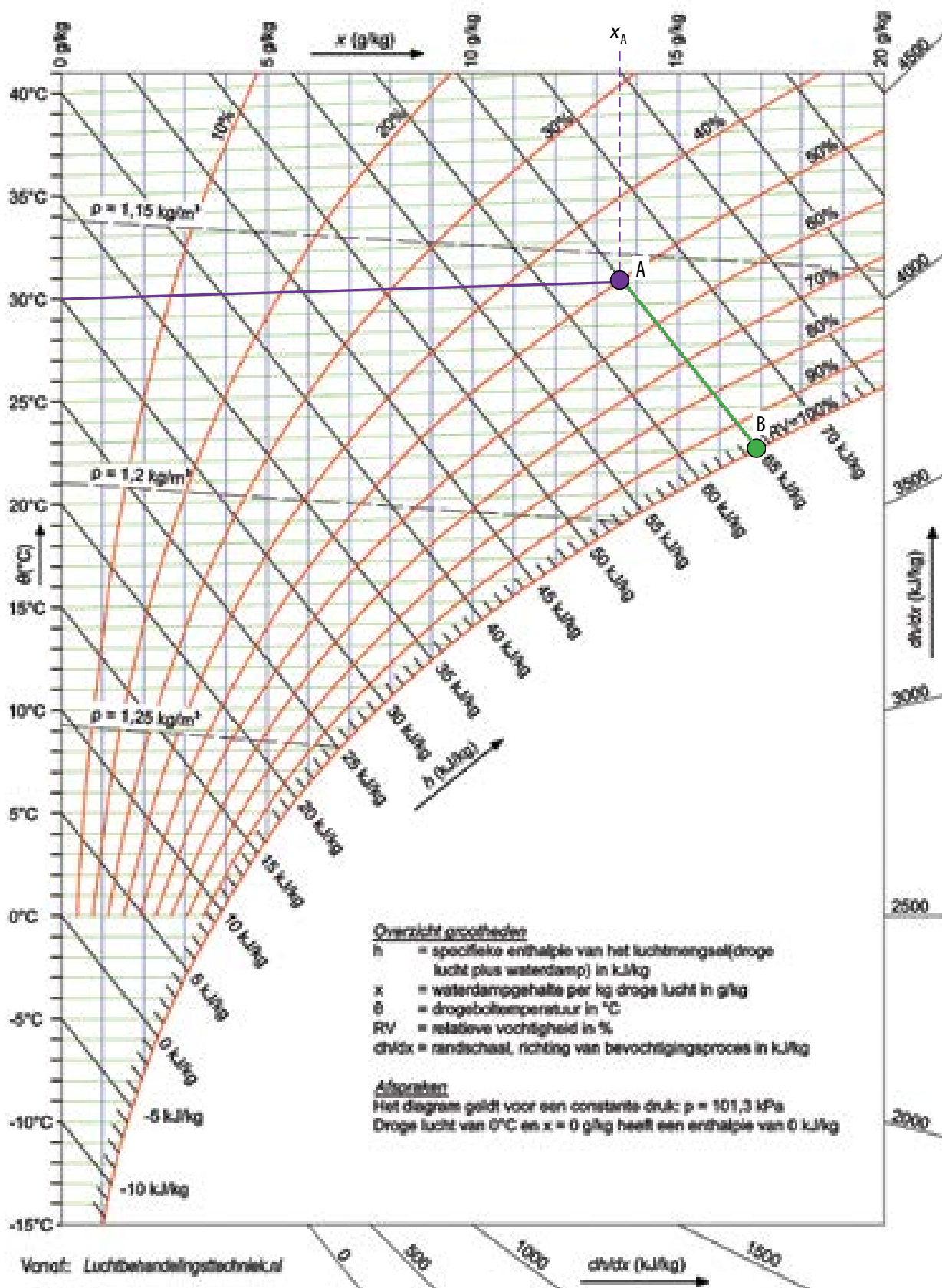
1. piemērs. Gaisa temperatūra 30°C , relatīvais mitrums 50% jeb $0,5$. Pēc H - x diagrammas noteikt pārejos gaisa parametrus.

H - x diagrammā atrod punktu, kur izoterma $t = 30^\circ\text{C}$ krustojas ar relatīvā mitruma līniju $\varphi = 50\%$, iegūst punktu **A** (sk. 3.2. att.). Mitruma satura noteikšanai no punkta **A** velk perpendikulu pret abscisu asi (uz augšu), kur nolasa mitruma saturu $x_A = 13,5$ g/kg (sausā gaisa). No punkta **A** velk līniju slīpi uz leju un paralēli tuvākajai izotermas līnijai (65 kJ/kg), kā parādīts 3.2. att. Ekstrapolējot entalpijas vērtību iegūst gaisa siltuma saturu $H_A = 64,8$ kJ/kg (sausā gaisa). No punkta **A** velkot paralēlu līniju $\rho = 1,15$ kg/m^3 , iegūst aptuvenu mitrā

1 Rihards Moljērs, konstruēja H - x diagrammu 1923. g.

2 Leonīds Ramzins, H - x diagrammu pirmo reizi publicēja 1918. g.

3.



3.2. att. Moljēra H - x diagramma mitram gaisam.

gaisa blīvumu $\rho_A = 1,16 \text{ kg/m}^3$. Atsevišķas Moljēra diagrammas dod iespēju noteikt arī mitrā termometra temperatūru punktā **A** un ūdens tvaika parciālo spiedienu punktā **A**.

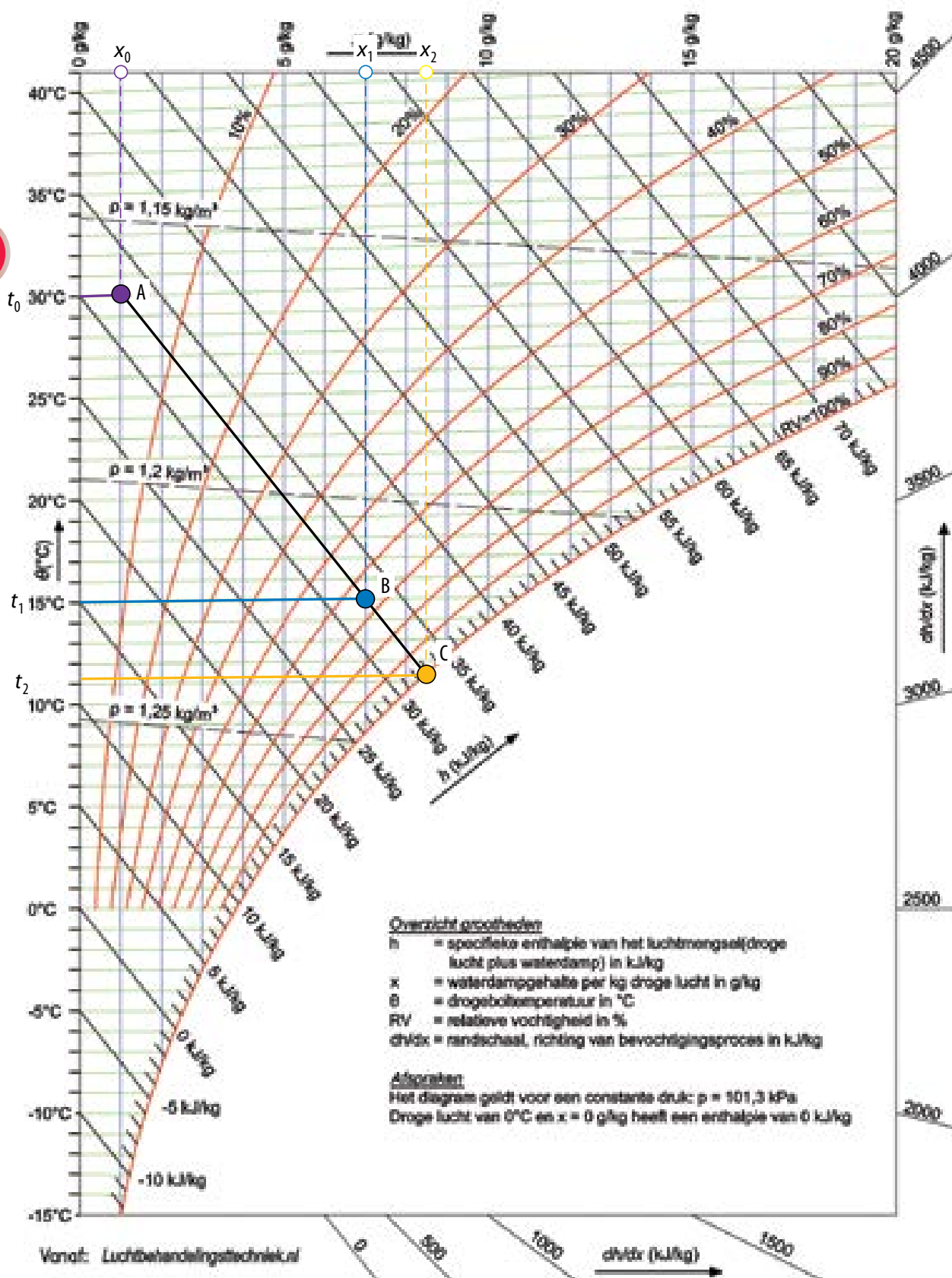
Rasas punkts gaisam ar punkta **A** parametriem nosakāms, pieņemot, ka gaisu atdzesē ar konstantu mitruma saturu $x_A = \text{const}$ līdz relatīvam mitrumam $\varphi = 100 \%$ (punkts **B**). Rasas punktam atbilstošā temperatūra ir rasas punkta temperatūra ($\sim 19 \text{ }^\circ\text{C}$).

3.

2. piemērs. Gaisa temperatūra ir $30 \text{ }^\circ\text{C}$ un mitruma saturs $x_0 = 1,0 \text{ g/kg}$. Kā mainīsies gaisa temperatūra, ja ūdens iztvaikošanas rezultātā gaisa mitruma saturs izmainīsies līdz $7,0 \text{ g/kg}$.

H - x diagrammā (sk. 3.3. att.) atzīmē punktu **A** (t_0 un x_0 krustpunkts), kas raksturo gaisa sākotnējo stāvokli. Pieņem, ka iztvaikošana notiek bez siltuma zudumiem, t. i., process ir adiabātisks. Gaisa daļu siltuma atdod ūdenim, tā rezultātā daļa ūdens iztvaiko un tvaiku veidā nonāk gaisā. Siltuma daudzums, kas patērēts ūdens iztvaikošanai, kopā ar tvaiku arī nonāk atpakaļ gaisā (kondensējot tvaiku, šo siltumu var atgūt), līdz ar to gaisa temperatūra pazeminās, bet siltuma saturs paliek nemainīgs. Arī adiabātisku gaisa mitrināšanu var attēlot, ja no punkta **A** velk līniju – adiabāti – paralēlu $H = \text{const}$ līnijām. Kur adiabāte krusto mitruma satura līniju $x_1 = 7,0 \text{ g/kg}$, iegūst punktu **B**. No punkta **B** vilktā izoterma $t_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ uzrāda gaisa temperatūru pēc mitrināšanas. Šajā gadījumā gaisa mitrināšana var turpināties tik ilgi, līdz sasniedz relatīvo mitrumu $\varphi = 100 \%$, t. i., līdz punktam **C**. Punktā **C** gaisa mitruma saturs ir $x_2 = 8,5 \text{ g/kg}$ un ūdens iztvaikošana ir beigusies. Gaisa temperatūra $t_2 = 12 \text{ }^\circ\text{C}$ un ūdens temperatūra kļuvusi vienāda.

3.

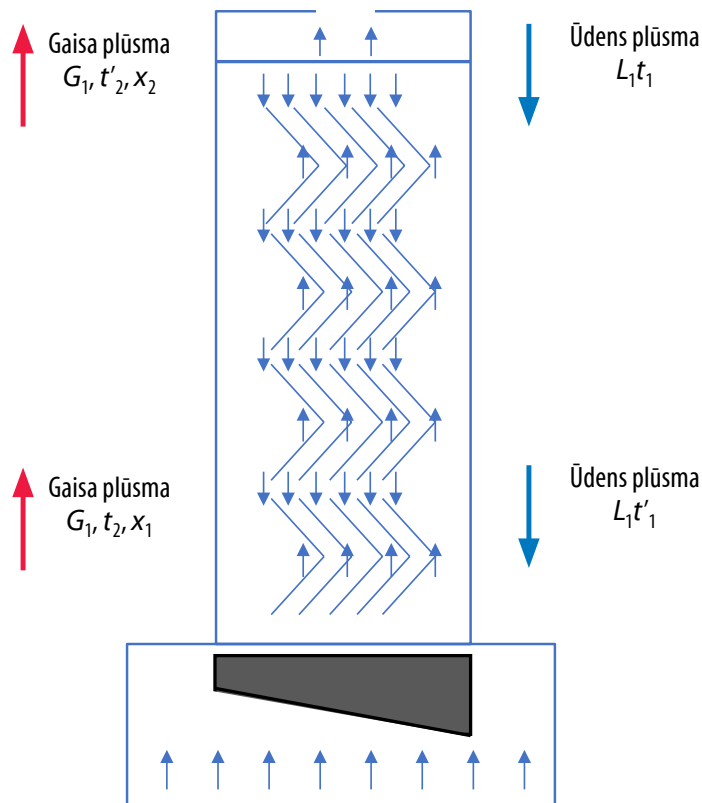


3.3. att. Gaisa adiabātiskas mitrināšanas attēlojums Moljēra $H-x$ diagrammā.

3.3. Dzeses torni raksturojošie lielumi

Nominālais plūsmas patēriņš. Nominālais plūsmas patēriņš ir ūdens patēriņš, kādam dzesēšanas tornis ir projektēts. Konkrētā laboratorijas iekārta ir paredzēta ūdens plūsmas patēriņam līdz $1 \text{ m}^3/\text{h}$. Turpmākajos aprēķinos ūdens blīvumu pieņem $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$.

3.



3.4. att. Ūdens un gaisa plūsmas dzesēšana tornī.

Dzesēšanas diapazons. Dzesēšanas diapazons ir temperatūras starpība starp siltā ūdens temperatūru t_1 ieplūdē un atdzesētā ūdens temperatūru t'_1 izplūdē no torņa:

$$Z = t_1 + t'_1. \quad (3.5.)$$

Atdzesēšanas robeža. Atdzesēšanas robeža ir zemākā sasniedzamā atdzesētā ūdens temperatūra dotajos apstākļos. Šī temperatūra atbilst apkārtējā gaisa mitrā termometra temperatūrai t_m . Gaisa mitrinās, ūdenim iztvaikojot, līdz sasniedz piesātinājumu. Dzesēšanas torņa dzesēšanas spēju a raksturo temperatūru starpība starp atdzesētā ūdens temperatūru torņa izplūdē t'_1 un mitrā termometra rādījumu t_m :

$$a = t'_1 - t_m. \quad (3.6.)$$

Jo mazāka ir šī starpība, jo augstāka ir torņa dzesēšanas efektivitāte.

Dzesēšanas koeficients. Dzesēšanas koeficientu ietekmē gaisa un ūdens plūsmas attiecība dzesēšanas tornī (sk. 3.4. att.). To ietekmē siltā ūdens temperatūra t_1 , atdzesētā ūdens temperatūru t'_1 un mitrā termometra temperatūra gaisam:

$$\eta = \frac{t_1 - t'_1}{t_1 - t_m}. \quad (3.7)$$

Ūdens zudumi. Atvērta tipa dzesēšanas torņos iztvaikošanas rezultātā rodas ūdens zudumi.

Ar gaisu aizvadītā ūdens daudzumu, kas ir uzskatāms kā ūdens zudumi L_z , var noteikt, ja starpību starp gaisa mitruma saturu pie ieplūdes x_1 un izplūdes x_2 reizina ar gaisa plūsmas masas ražību G :

$$L_z = (x_2 - x_1) \cdot G \quad (\text{g/s}). \quad (3.8)$$

Aprasināšanas blīvums. Aprasināšanas blīvums ir patērētais ūdens daudzums laika vienībā, rēķinot uz aprasināto laukuma vienību (mūsu gadījumā uz iekārtas šķērsriezuma laukumu S_k):

$$R = \frac{L}{S_k} \quad \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right). \quad (3.9)$$

Gaisa masas un tilpuma ražība. Gaisa ražības noteikšanai var izmantot spiedienu starpības metodi. Šajā gadījumā tiek mērīta spiedienu starpība dzesēšanas kolonnas augšdaļā, gaisam izplūstot caur apaļu atveri (diafragmu). Darbības princips pamatojas uz Bernulli vienādojumu, kas nosaka sakarību starp plūsmas ātrumu un spiedienu tajā. Atvere kolonnas augšdaļā rada gaisa plūsmas sašaurināšanos, plūsmas ātrums sašaurinājuma šķērsgriezumā pieaug. Daļa plūsmas potenciālās enerģijas pāriet kinētiskajā enerģijā, un statiskais spiediens kļūst mazāks par statisko spiedienu pirms atveres. Jo lielāks ir plūstošās vides patēriņš, jo lielāka ir šo spiedienu starpība. Spiedienu starpību mēra ar diferenciālo manometru. Pamatojoties uz Bernulli vienādojumu un plūsmas nepārtrauktības vienādojumu diviem plūsmas punktiem (pirms un pēc atveres), var uzrakstīt sakarību gaisa plūsmas masas ražības noteikšanai:

$$G = c \cdot \mu \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{2\rho_g \cdot p} \quad \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right), \quad (3.10)$$

kur c – iztecēšanas koeficients, kas ir atkarīgs no plūsmas šķērsriezuma laukumu attiecībām (dotajai eksperimentālajai iekārtai $c = 7,3 \cdot 10^{-3}$);

μ – patēriņa koeficients, šajā gadījumā $\mu = 0,605$;

ε – plūsmas izplešanās koeficients, šajā gadījumā $\varepsilon = 0,98$;

ρ_g – gaisa plūsmas blīvums, kg/m^3 ;

Δp – spiedienu starpība, Pa.

Gaisa plūsmas tilpuma ražību nosaka, masas ražību dalot ar gaisa blīvumu

ρ_g :

$$V = \frac{G}{\rho_g} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right). \quad (3.11.)$$

Noteikto gaisa plūsmas tilpuma ražību izmanto, lai noteiktu gaisa plūsmas ātrumu kolonnā w_g :

$$w_g = \frac{V}{S} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right), \quad (3.12.)$$

kur S – kolonnas šķērsriezuma laukums, m^2 .

Gaisa dzesēšanas spēju Q_1 nosaka kā gaisa entalpijas starpību torņa izplūdē un ieplūdē, reizinātu ar gaisa masas ražību:

$$Q_1 = G \cdot (H_2 - H_1) \quad (\text{kW}), \quad (3.13.)$$

kur H_1, H_2 – gaisa entalpija (kJ/kg) pirms un pēc dzeses torņa.

Tuvināti gradētavu var uzskatīt par siltummaini, kurā siltumnesējs – ūdens – nodod siltumu dzesējošam aģentam – gaisam, tiem tieši kontaktējoties. Līdz ar to dzesēšanas spēja summējas no siltuma, kas tiek atņemts ūdenim, to dzesējot, un siltuma daudzuma, ūdeni daļēji iztvaicējot:

$$Q_2 = c_u [L(t_1 - t'_1) + L_z t'_1] \quad (\text{kW}), \quad (3.14.)$$

kur c_u – ūdens īpatnējais siltums, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

Procesa siltuma bilanci var uzrakstīt šādi:

$$Q_1 = Q_2. \quad (3.15.)$$

Praktiski dzeses tornī lielumi Q_1 un Q_2 atšķiras. Tam var būt vairāki iemesli. Daļa no ūdens notek gar torņa sienām, tās sildot. Dzeses torņa sienas dzesējas ne tikai ar gaisu, kas plūst caur torņa iekšpusi, bet arī ar apkārtējo gaisu. Aprēķinot gaisa dzesēšanas spēju, tiek ņemts vērā tikai tas gaiss, kas izplūst caur dzeses torni.

3.4. Darba uzdevumi

- ♦ Pēc dotajiem norādījumiem eksperimentāli noteikt dzeses torņa raksturojošos lielums, t. i., dzesēšanas koeficientu, ūdens zudumus, aprasināšanas blīvumu, gaisa masas un tilpuma ražību, gaisa dzesēšanas spēju. Rezultātus sakārtot pārskatāmā tabulā.
- ♦ Pēc eksperimentālajiem rezultātiem secināt, kurš no režīmiem ir lētākais un kurš efektīvākais. Izvēli pamatot ar aprēķiniem.
- ♦ Pēc pasniedzēja norādēm atrisināt $H-x$ diagrammas uzdevumu.

Dzeses torņa darba režīmu, t. i., sildītāja pozīciju (I,II vai III), plūsmas ātrumu un ventilatora vārsta atvērumu norāda pasniedzējs!

Ieteicams izvēlēties konstantu temperatūru, t. i., sildītāja pozīciju (I, II vai III), konstantu ventilatora vārsta atvērumu un mainīgu plūsmas režīmu (piem., II, pilnu atvērumu, un 30, 50, 70 L/h ūdens plūsmas padevi) vai konstantu plūsmas ātrumu un mainīgas sildītāja pozīcijas. Ventilatora vārsta pozīciju (t. i., atvērumu) ieteicams atstāt konstantu (3.1. tabula).

3.1. tabula

Darba variantu piemēri

Nr.	Sildītāja pozīcija	Plūsmas ātrums, L/h	Gaisa vārsta pozīcija
1	I	30, 50, 70	Pilnībā atvērts
2	I, II, III	50	Atvērts uz pusi
3	...	...	....

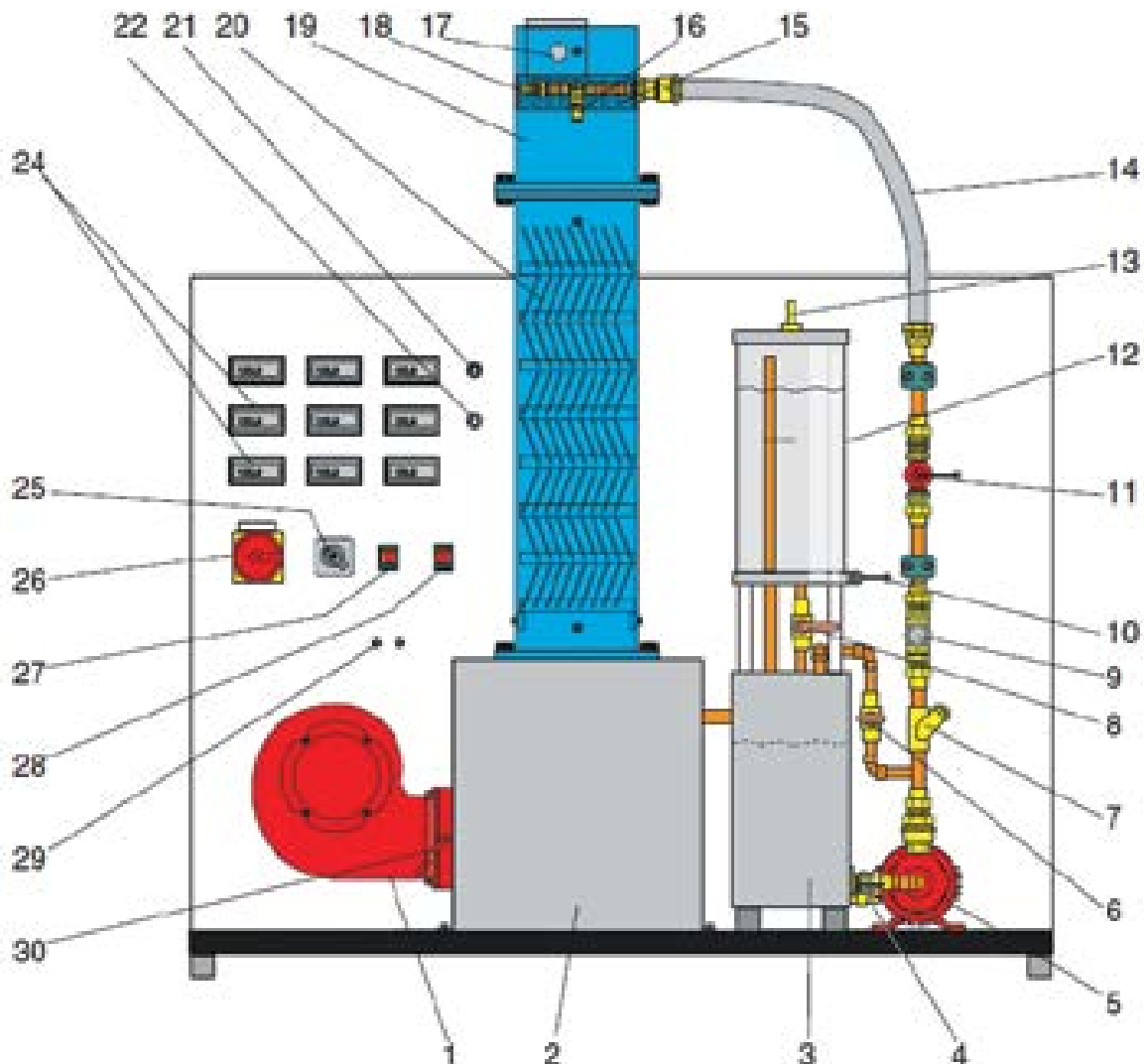
3.5. Iekārtas apraksts

Ūdens plūsmas kontūrs. Lai atdzesētu ūdeni, tas no karstā ūdens tvertnes ar centrālās sūkni tiek iesūkņēts sistēmā. Plūsmu regulē ar ventili. Karstajam ūdenim tiek noteikta temperatūra, un tas tiek izsmidzināts kolonnas augšpusē caur sprauslu, kur tas plūst lejā pa kolonnas pildījuma virsmu (3.5. att., 3.6. att.). Dzesēšanas laikā no kolonnas apakšas pretplūsmā ar ventilatoru tiek padots gaiss. Kolonnas pildījums pagarina ūdens un gaisa saskares laiku, nodrošinot pilnīgāku siltuma un masas apmaiņu starp tiem. Kolonnas augšdaļā atrodas pilienu separators, kas novērš kondensāta pilienu izplūdi no iekārtas, tādējādi samazina ūdens zudumu sistēmā. Kolonnas apakšdaļā ir tvertne, kurā ūdens tiek savākts un atkārtoti nonāk uzsildīšanas tvertnē.

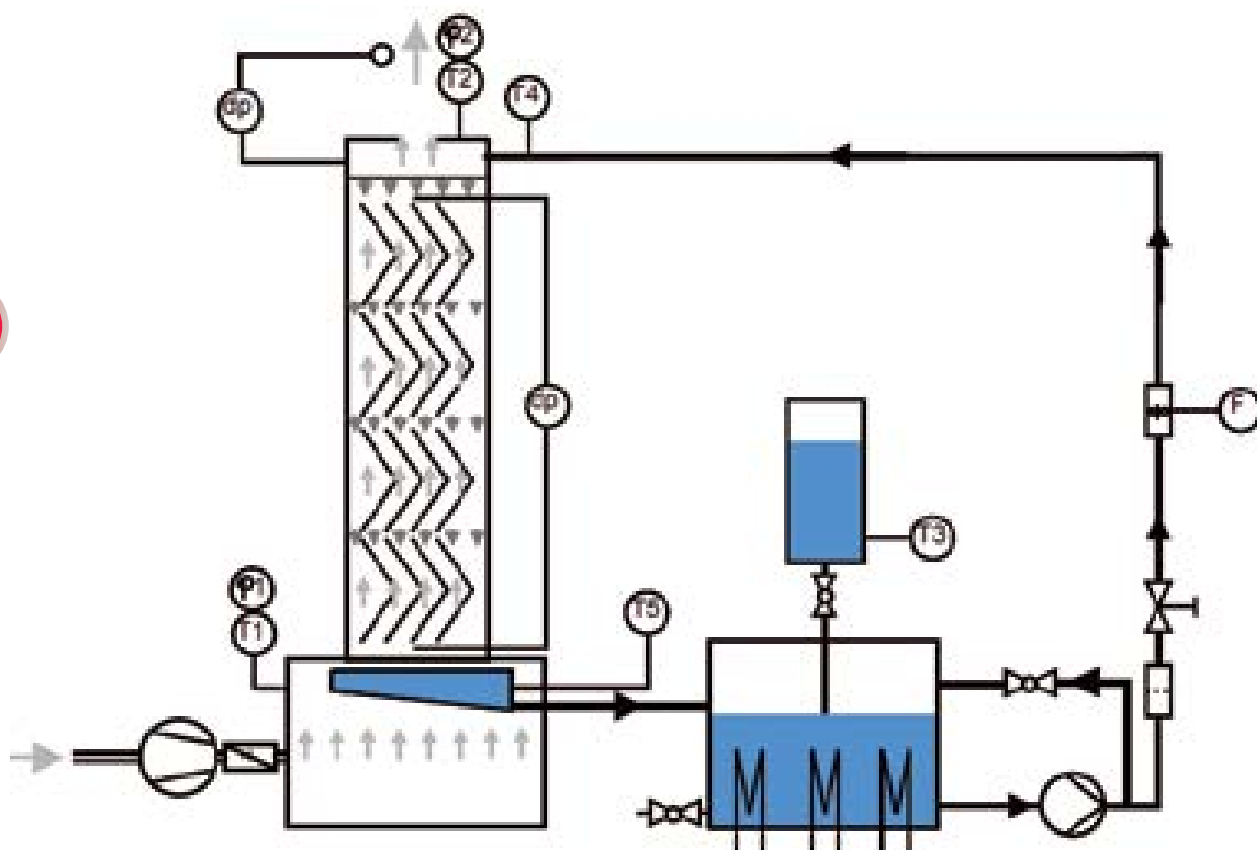
Gaisa plūsmas kontūrs. Apkārtējais gaiss ar ventilatora palīdzību caur gaisa kameru tiek ievadīts dzesēšanas kolonnā pretplūsmā ūdenim. Gaisam ie-

plūstot kolonnā, tiek noteikta gaisa temperatūra un relatīvais mitrums. Gaisa turbulence kamerā nodrošina tā vienmērīgu izplatīšanos pa visu dzesēšanas kolonnas šķērsgrīzumu. Kolonnā ievadītā gaisa daudzumu var mainīt ar tauriņveida vārstu. Ūdens pilieni, kas tiek nesti no kolonnas ārā ar gaisa plūsmu, tiek atdalīti pilienu separatorā un novadīti atpakaļ kolonnā. Sensori, kas atrodas pie kolonnas izplūdes atveres, mēra gaisa mitrumu un temperatūru (3.5. att., 3.6. att.).

3.



3.5. att. Dzeses torņa diagramma: 1 – centrālās ventilators; 2 – gaisa kamera; 3 – ūdens tvertne ar sildītāju; 4 – ūdens tvertnes iztukšošanas krāns; 5 – sūkņi; 6 – apvads (nav uz reālās iekārtas); 7 – apvads (nav uz reālās iekārtas); 8 – rezerves tvertnes iztukšošanas krāns; 9 – regulēšanas ventilis; 10 – temperatūras sensors; 11 – plūsmas mērītājs; 12 – rezerves tvertne; 13 – ūdens uzpildīšanas atvere; 14 – ūdens pievadcaurule; 15 – pilienu separatora sprausla; 16 – izsmidzinātāja sprausla; 17 – temperatūras/mitruma sensors; 18 – ūdens temperatūras sensors; 19 – ūdens dzesēšanas kolonnas augšdaļa; 20 – dzesēšanas kolonna; 21 – mitruma/temperatūras sensora pieslēgvietā; 22 – temperatūras sensora pieslēgvietā; 24 – digitālais displejs; 25 – sildītāja slēdzis; 26 – galvenais slēdzis; 27 – ventilatora slēdzis; 28 – sūkņa slēdzis; 29 – manometra pieslēgvietā; 30 – tauriņveida vārsts.



3.6. att. Sensoru izvietojums dzese tornī (shematiska diagramma): T1/φ1 – kombinētais temperatūras/mitruma sensors; T2/φ2 – kombinētais temperatūras/mitruma sensors; dp – diferenciālā spiediena sensors; T4 – ūdens temperatūras sensors ieplūdē; T5 – ūdens temperatūras sensors izplūdē; T3 – rezerves ūdens tvertnes temperatūras sensors; F – plūsmas mērītāja darba rats.

3.6. Darba gaita

1. Pārlicinās, vai tvertnē un rezerves tvertnē ir pietiekams ūdens līmenis.
2. Pieslēguma vietās iekārtai pieslēdz manometru.
3. Ar galveno slēdzi ieslēdz iekārtu.
4. Ieslēdz ūdens sūkni un ieregulē nepieciešamo ūdens padevi.
5. Ar sviras palīdzību nostāda gaisa vārstu norādītajā pozīcijā.
6. Ieslēdz ūdens sildītāju un gaida, kamēr ūdens ir uzsilis un vairāk neuzsilst.
7. Ieslēdz ventilatoru un ūdens sūkni.
8. Pēc 2 min nolasa (fiksē) mērījumus no displejiem.
9. Atkārti 8. soli, līdz iestājas stacionārs režīms.
10. Ieregulē nākamo darba uzdevuma režīmu un atkārti 8. un 9. soli.
11. Beidzot eksperimentu, izslēdz iekārtu (t. i., ventilatoru, ūdens sūkni, sildītāju).

3.7. Kontroljautājumi

- ◆ Kādam nolūkam izmanto dzeses torņus? Piemēri.
- ◆ Kādi principi izmantoti ūdens dzesēšanai ūdens dzeses tornī?
- ◆ Kas ir mitrā termometra temperatūra?
- ◆ Kas ir relatīvais gaisa mitrums, absolūtais gaisa mitrums un entalpija?
- ◆ Kādas ir dzeses torņa priekšrocības?
- ◆ Kāpēc sistēmā rodas ūdens zudumi? Vai un kā tos var novērst?

4. PERIODISKĀ REKTIFIKĀCIJA

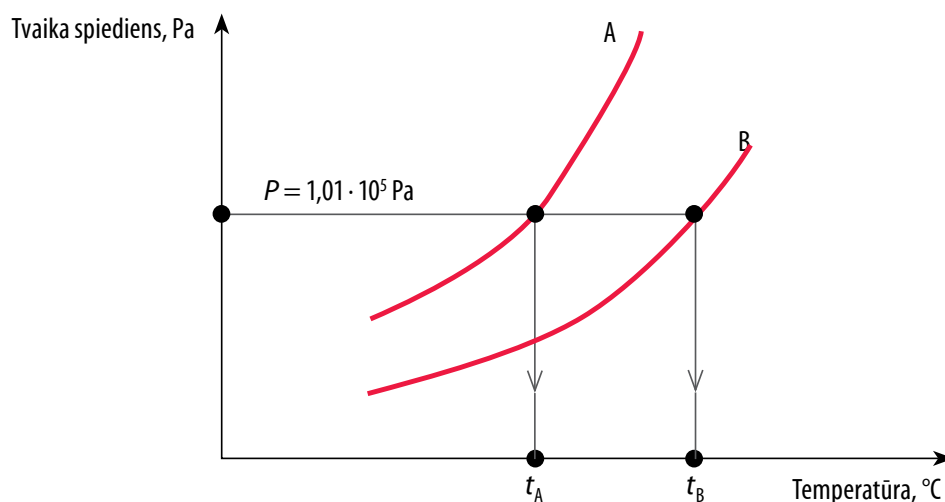
4.1. Šķidru sistēmu fāžu līdzsvars

Par pārtvaici sauc šķīdumu, kas sastāv no vairākiem šķidrumiem, sadalīšanas procesu, kurā notiek daļēja maisījuma iztvaicēšana un radušos tvaiku kondensācija. Sadalīšanas pamatā ir šķīduma komponentu dažāda gaistamība pie noteiktas temperatūras. Ja šo gaistošo šķidruma maisījumu uzkaršē līdz viršanas temperatūrai, tvaikā pāriet nevienāds komponentu daudzums. Tvaiks bagātinās ar zemākā temperatūrā gaistošu komponentu (t.i., vieglāk gaistošo komponentu). Kondensējot šādu tvaiku, iegūst kondensātu, kurā salīdzinājumā ar sākuma šķīdumu ir augstāka vieglāk gaistošā komponenta koncentrācija. Tvaika fāzes bagātināšanās pakāpe ar vieglāk gaistošo komponentu ir atkarīga no pārtvaices veida. Eksistē vienkāršā pārtvaice jeb destilācija un rektifikācija.

Vienreizēju šķīduma uzsildīšanu līdz viršanas temperatūrai, radušos tvaiku aizvadišanu un kondensāciju sauc par **destilāciju**. Augstāku izejas maisījuma sadalīšanas pakāpi iegūst rektifikācijā. Rektifikācija ir gaistošu šķidrumu maisījuma sadalīšanas process, to vairākkārt iztvaicējot un kondensējot.

Pārtvaices procesu teorija balstās uz mācību par šķidru sistēmu fāžu līdzsvaru, ko vislabāk aplūkot uz ideālu bināru šķīdumu piemēra. Tie ir divu šķidrumu (A un B) šķīdumi, kas šķīst viens otrā jebkurās attiecībās un kuros starpmolekulārie spēki starp nevienādīgām molekulām ir tādi paši kā starp viendabīgām molekulām. Sakarība starp koncentrācijām abās līdzsvarā esošajās fāzēs, tvaika (Y) un šķidrajā (X) fāzē var aprēķināt izmantojot Raula¹ un Daltona² likumu, ja ir zināmas abu komponentu (A un B) tvaiku spiediena sakarības pie dažādām temperatūrām (4.1. att.).

Šajā gadījumā, pie atmosfēras spiediena, komponenta A tvaika spiediena sakarība atrodas virs komponenta B. Komponenta A ir vieglāk gaistošs, tā viršanas temperatūra ir t_A , komponentam B ir augstāka viršanas temperatūra t_B un to sauc par grūtāk gaistošo komponentu. Tīru komponentu A un B tvaiku spiedienu apzīmēsim attiecīgi ar P_A un P_B .



4.1. att. Šķīduma komponentu A un B tvaika spiediena temperatūras sakarības.

Ideāli maisījumi pakļaujas Raula likumam:

$$p_A = x_A P_A, \quad (4.1.)$$

$$p_B = x_B P_B = (1 - x_A) \cdot P_B, \quad (4.2.)$$

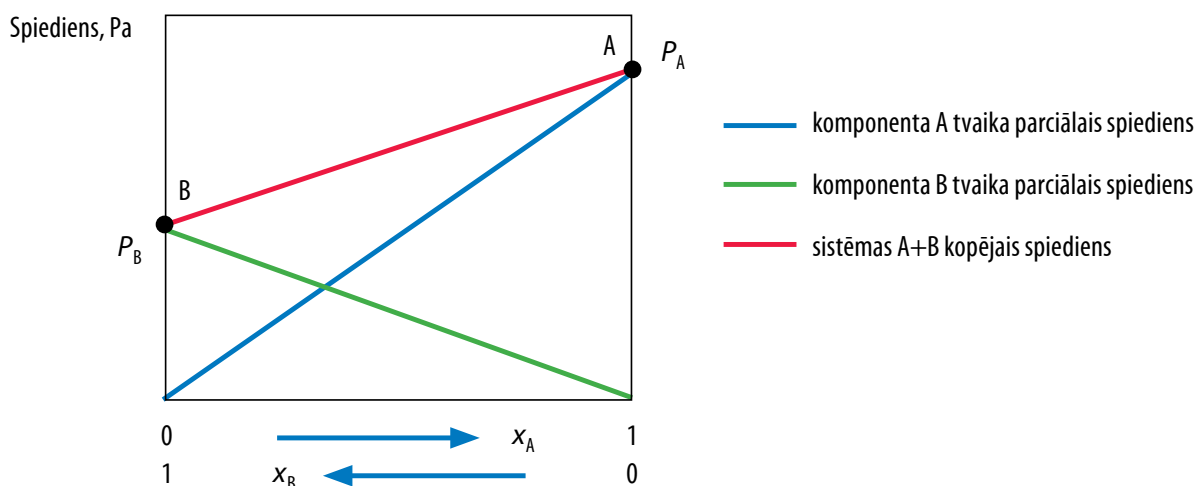
kur p_A, p_B – komponentu A un B parciālais spiediens;

x_A, x_B – komponentu A un B molu daļa šķīdumā.

Pamatojoties uz Daltona likumu, sistēmas kopējais spiediens P ir komponentu A un B parciālo spiedienu summa.

$$p = p_A + p_B = x_A (P_A - P_B) + P_B. \quad (4.3.)$$

No vienādojuma (4.3) redzams, ka sistēmas kopējais spiediens ideālu šķīdumu gadījumā ir lineāra funkcija no šķīduma sastāva (4.2. att.).

4.2. att. P - X diagramma ideālu šķīdumu gadījumā.

Izsakot no vienādojuma (4.3.) x_A , iegūst:

$$x_A = \frac{(p - P_B)}{(P_A - P_B)}. \quad (4.4.)$$

Vienlaikus šķīduma komponentu parciālo spiedienu var noteikt pēc Daltona likuma:

$$P_A = y_A \cdot p, \quad (4.5.)$$

$$P_B = (1 - y_A) \cdot p. \quad (4.6.)$$

Līdzsvara gadījumā ir spēkā sakarība:

$$x_A \cdot P_A = y_A \cdot p, \quad (4.7.)$$

no kuras seko:

$$y_A = \frac{P_A}{p} \cdot x_A. \quad (4.8.)$$

Parasti rektifikācijas process notiek izobāros apstākļos ($p = \text{const}$). Šādos apstākļos, zinot P_A un P_B viršanas temperatūru intervālā t_A un t_B , no vienādojuma (4.4.) var aprēķināt x_A un no vienādojuma (4.8.) attiecīgi y_A vērtību.

Pamatojoties uz Gibbsa³ fāžu likumu:

$$F + B = K + 2, \quad (4.9.)$$

kur F – fāžu skaits;

B – brīvības pakāpju skaits;

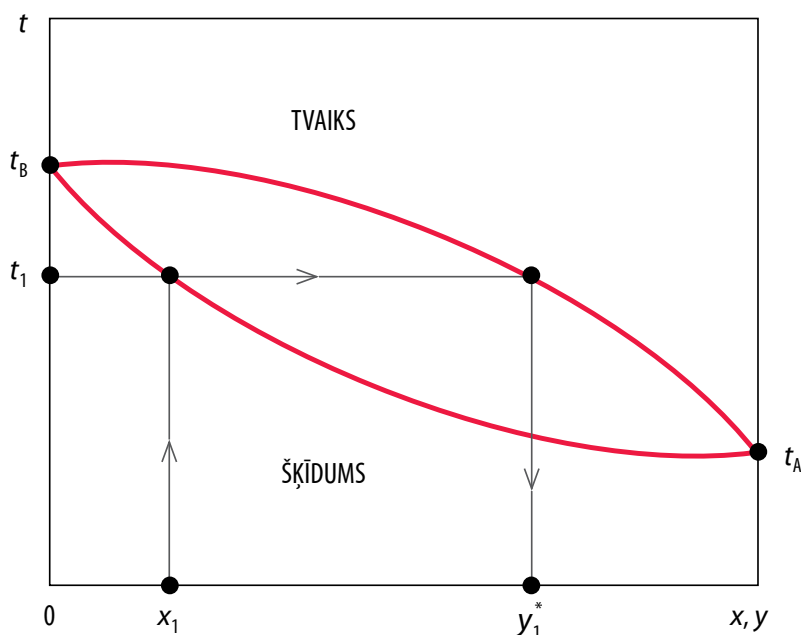
K – komponentu skaits maisījumā,

bināram maisījumam iegūsim $B = 2$. Līdz ar to līdzsvara sakarības var atainot, izmantojot divus mainīgos (p un x , t un $x(y)$, p un t , y un x).

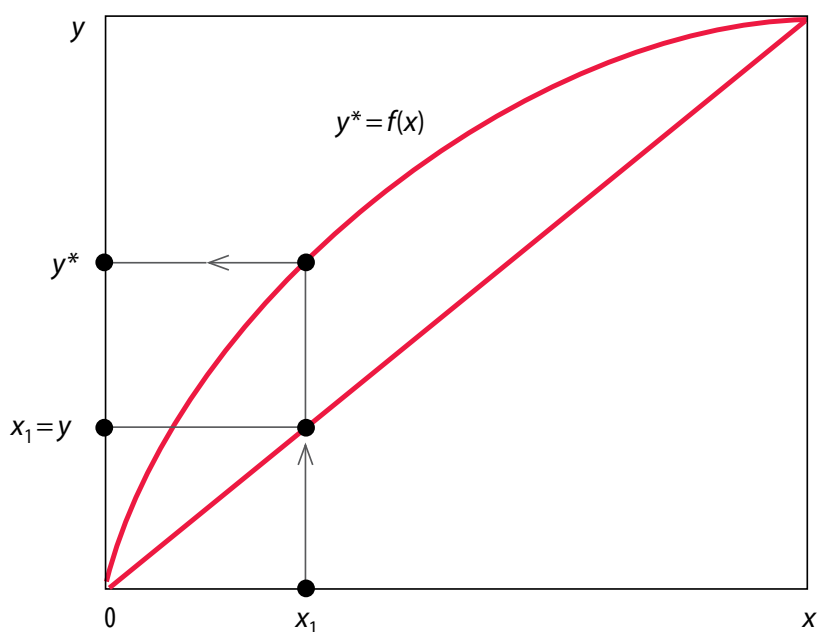
Pie $p = \text{const}$ līdzsvara sakarību var attēlot koordinātās $t-x(y)$ vai $y-x$. Zinot temperatūras un aprēķinātos x un y lielumus, var konstruēt diagrammu, kas raksturo līdzsvaru sistēmā (4.3. att.), sakarības $t-x$ un $t-y$ var savietot.

4.3. att. redzamā apakšējā līkne atbilst šķidrā maisījuma viršanas temperatūrām, augšējā – tvaika fāzes kondensācijas temperatūrām. Izmantojot šo diagrammu un zinot šķidrās fāzes sastāvu x_1 , var atrast atbilstošo tvaika fāzes līdzsvara sastāvu y_1^* un maisījuma viršanas temperatūru t_1 .

Rektifikācijas procesa analīzei ērtāka ir $y-x$ diagramma (4.4. att.).



4.3. att. Tvaika-šķīduma temperatūra atkarībā no fāžu sastāva līdzsvara gadījumā.



4.4. att. Līdzsvara līkne.

Līdzsvara līkni $y^* = f(x)$ apraksta vienādojums:

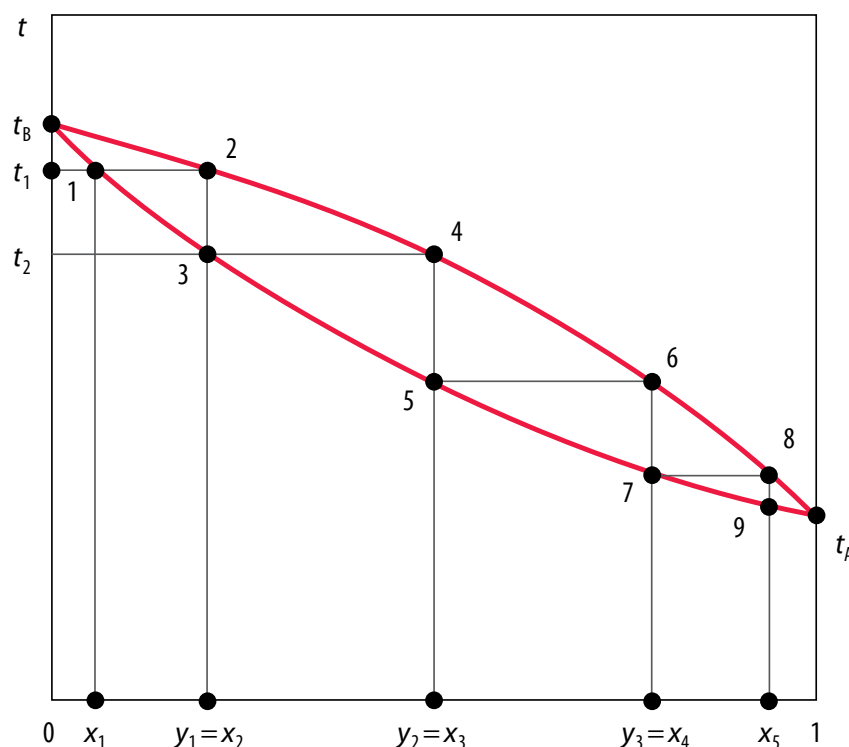
$$y = \frac{\alpha x_A}{1 + (\alpha - 1)x_A}, \quad (4.10.)$$

kur $\alpha = P_A/P_B$ ir relatīvais gaistamības koeficients.

Jo lielāka ir α skaitliskā vērtība, jo tālāk no diagonāles izvietojas līdzsvara līkne un pārtvaices procesā ir vieglāk sadalīt atbilstošo maisījumu.

4.2. Periodiskas darbības rektifikācija

Rektifikācijas procesa būtību var raksturot kā šķidra maisījuma sadalīšanu destilātā (rektifikātā) un atlikumā. Rektifikācijas kolonnā, pretplūsmā mijiedarbojoties šķidrums un tvaiks, notiek šķidrās fāzes vairākkārtēja iztvaicēšana un iegūto tvaiku kondensēšana. Šo procesu uzskatāmi var attēlot t - x , y diagrammā (4.5. att.).

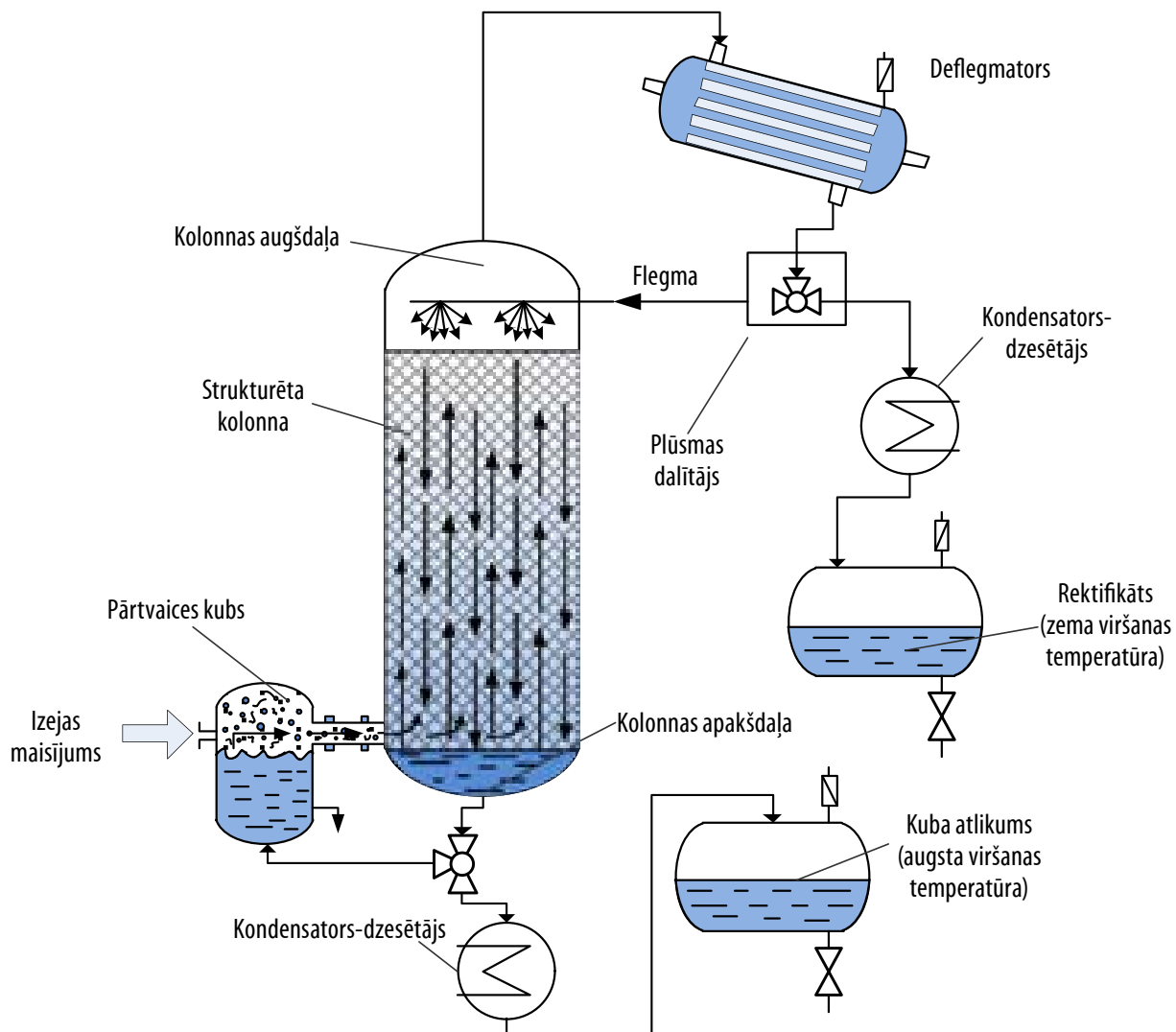


4.5. att. Vairākkārtējas iztvaicēšanas un kondensēšanas attēlojums t - x , y diagrammā.

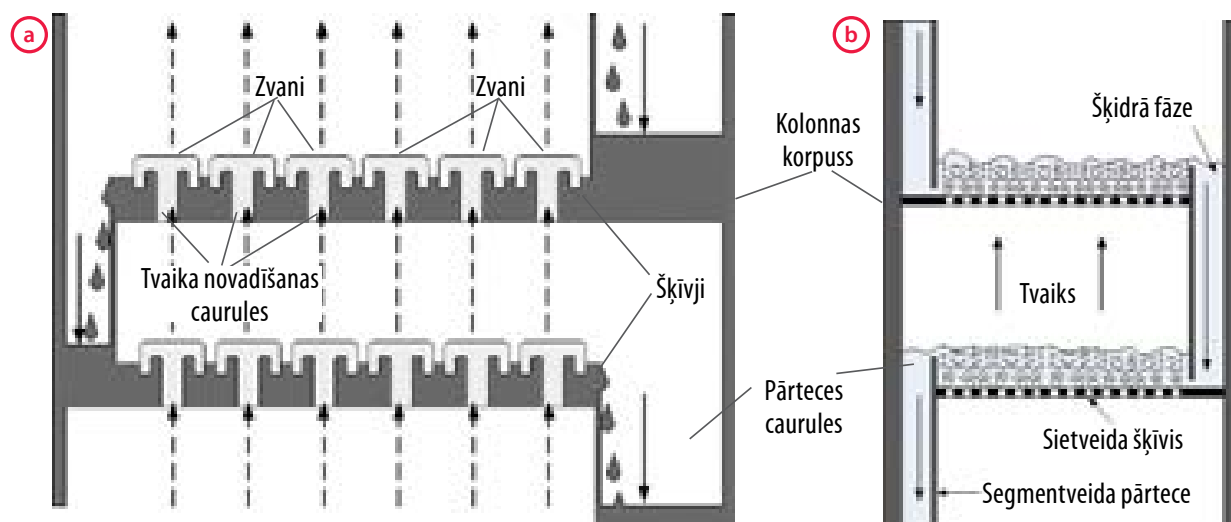
Sākuma šķīdums ar sastāvu x_1 virst temperatūrā t_1 (punkts 1), veidojas tvaiks ar sastāvu y_1 (punkts 2). Tvaiku kondensējot, iegūst šķīdumu ar sastāvu $x_2 = y_1$. Jauniegūtais šķīdums virst temperatūrā t_2 (punkts 3), veidojas tvaiks ar sastāvu y_2 (punkts 4) utt. Pēdējais sastāvs x_5 ir ļoti tuvs tīram komponentam A. Turpinot iztvaicēšanu, teorētiski var iegūt praktiski tīru vieglāk gaistošo komponentu. Šādu koncentrācijas izmaiņu panāk, lietojot rektifikācijas kolonnu, kurā šķīduma iztvaicēšana un tvaiku kondensācija mainās n reizi.

Rektifikāciju ražošanā realizē periodiskas un nepārtrauktas darbības iekārtas. Periodiskas darbības iekārta redzama 4.6. att.

Izejas maisījumu iepilda pārtvaices kubā ar siltummaini un silda, tvaiks pārvietojas uz kolonnu, kas ir izveidota kā vertikāls cilindrs, kurā var atrasties pildķermeņi (4.6. att.) vai noteiktā attālumā citi virs cita novietoti šķīvji. Šķīvju konstrukcija praksē mēdz būt daudzveidīga. 4.7. att. parādītas sietveida un zvanu šķīvju konstrukcijas.



4.6. att. Rūpnieciska mēroga periodiskas darbības rektifikācijas iekārtas shēma.



4.7. att. Rektifikācijas kolonna ar zvani šķīvjiem (a) un sietveida šķīvjiem (b) (šķērsgriezums).

Tvaiks plūst no kuba pa tvaika novadišanas caurulēm un pārvietojas uz augšu. Virs tvaika novadišanas caurulēm novietoti zvani, kuru robotās malas iegremdētas šķidrā fāzē, kuras līmeni virs šķīvja iestata ar pārteces cauruļu palīdzību. Tvaiks burbuļo cauri šķidrā fāzei, kas rodas, no kolonnas aizplūstošo tvaiku kondensējot deflegmatorā. Iegūto flegmu no deflegmatora ar plūsmas dalītāja palīdzību aizvada atpakaļ kolonnā, kurā šķidrā fāze nepārtraukti pārvietojas no augšējā šķīvja uz zemāk esošajiem un tālāk uz kuba.

Tvaiks, burbuļojot caur šķidro fāzi, daļēji atdziest, un daļa tvaika kondensējas. Vairāk kondensējas grūtāk gaistošais komponents, līdz ar to tvaiks, plūstot pa kolonnu uz augšu, bagātinās ar vieglāk gaistošo komponentu. Tvaika kondensācijas siltums veicina šķidrās fāzes iztvaikošanu. Tvaikā pāriet galvenokārt vieglāk gaistošais komponents, un šķidrā fāze, plūstot uz leju, bagātinās ar grūtāk gaistošo komponentu.

Otru daļu tvaika pēc deflegmatora caur plūsmas dalītāju novada uz kondensatoru-dzesētāju, kur tas pilnībā kondensējas. Iegūtais rektifikāts atdziest līdz noteiktai temperatūrai un tālāk plūst uz rektifikāta tvertni. Kad iegūts noteikts daudzums rektifikāta, procesu pārtrauc. No kuba izvada atlikumu, kas ir praktiski tīrs komponents **B**, bet rektifikāta tvertnē sakrājas praktiski tīrs komponents **A**.

Kolonnās bieži izmanto arī sietveida šķīvjus. Tie veidoti no caurumota metāla diska, parasti caurumu diametrs ir 2–8 mm. Pie noteikta tvaika fāzes plūsmas ātruma šķidrā fāze neplūst cauri šķīvja caurumiem, bet pa pārteces caurulēm. Tvaiks plūst pa caurumiem un sīku burbulīšu veidā pārvietojas cauri šķidrums slānim, izraisot intensīvu putošanu un šķakatu veidošanos. Tas veicina masas apmaiņu starp šķidro un tvaika fāzi.

Ja kolonnas augšdaļā ievada šķidrumu G_1 , sadalīšanas procesā iegūst rektifikātu G_2 un kuba atlikumu G_0 , tad rektifikācijas kolonnas materiālo bilanci izsaka vienādojums:

$$G_1 = G_2 + G_0, \quad (4.11.)$$

kur G_1 , G_2 , G_0 izteikti kmol vai kg.

Attiecībā uz vieglāk gaistošo komponentu materiālā bilancē ir šāda:

$$G_1 x_1 = G_2 x_2 + G_0 x_0, \quad (4.12.)$$

kur x_1 , x_2 , x_0 – vieglāk gaistošā komponenta koncentrācija sākumā, rektifikātā un kuba atlikumā, molu daļās (kg/kg).

Ja zināms sākuma šķīduma daudzums, no vienādojuma (4.12.) var aprēķināt rektifikāta iznākumu:

$$G_2 = G_1 \frac{x_1 - x_0}{x_2 - x_0} \quad (\text{kmol vai kg}). \quad (4.13.)$$

Destilāta daudzums, ko iegūst deflegmatorā, ir vienāds ar tvaika daudzumu, kas tiek novadīts uz to. Iegūtais destilāts dalās divās daļās – viena daļa tiek novadīta atpakaļ kolonnā (flegma), otra daļa ir galaprodukts (rektifikāts). Cik kmol (kg) flegmas G_f jāaizvada atpakaļ kolonnā uz vienu kmol iegūtā rektifikāta G_2 , rāda flegmas skaitlis:

$$R = \frac{G_f}{G_2}. \quad (4.14.)$$

Sastādot bilances vienādojumu brīvi izvēlētam kolonnas šķēlumam un pieņemot, ka $G_2 = 1$, iegūst rektifikācijas darba taisnes vienādojumu, kas apraksta tvaika (y) un šķidrās fāzes (x) darba koncentrācijas izmaiņu dažādos kolonnas augstumos. Periodiskas rektifikācijas gadījumā darba taisnes vienādojumam ir šāds veids:

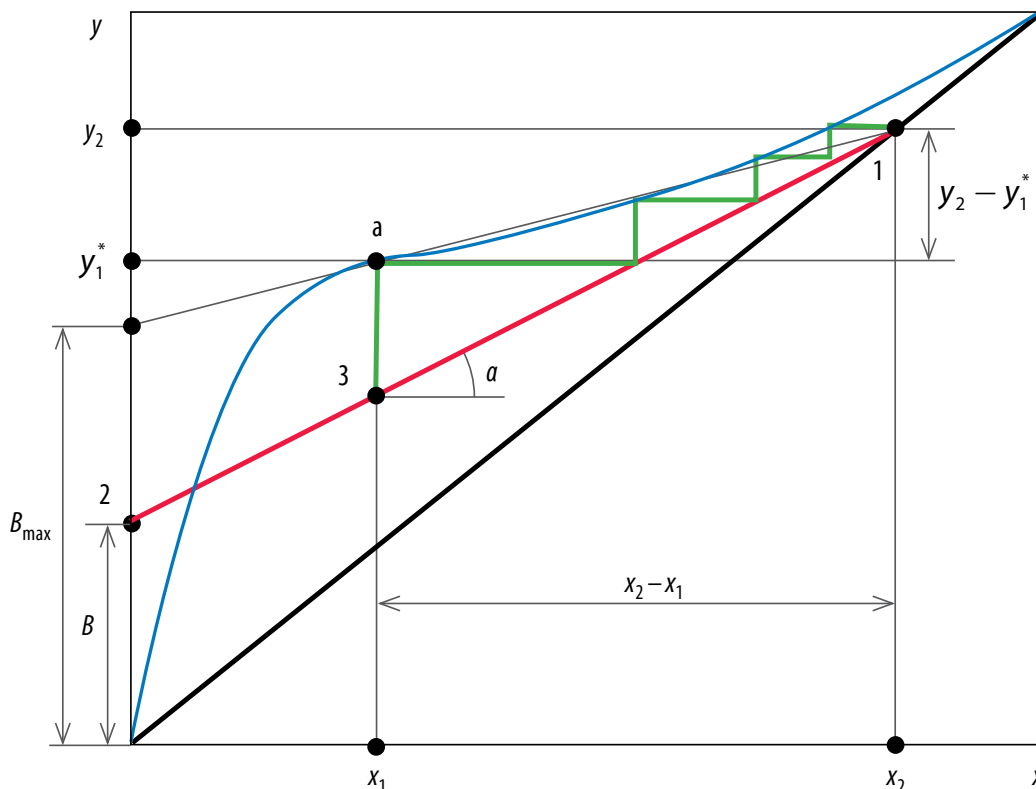
$$y = \frac{R}{R+1} x + \frac{x_2}{R+1}. \quad (4.15.)$$

Ja vienādojumā (4.15.) izdara pārveidojumu, apzīmējot $R/R+1 = A$ un $x_2/R+1 = B$, tad iegūstam:

$$y = Ax + B. \quad (4.16.)$$

Iegūtais vienādojums ir taisnes vienādojums, kuras slīpuma leņķis pret absisu asi $\text{tg}(\alpha) = A = R/R+1$. Šī taisne uz ordinātu ass atšķēļ nogriezni: $B = x_2/R+1$.

Rektifikācijas procesa darba taisni attēlo y - x diagrammā (4.8. att.). Tas dod iespēju noteikt koncentrācijas maiņas pakāpienus, kas nepieciešami sākuma šķīduma sadalīšanai līdz koncentrācijai x_2 .



4.8. att. Darba taisnes konstruēšana.

Lai uzkonstruētu rektifikācijas procesa darba taisni y - x , diagrammā pieņem, ka no kolonnas augšdaļas aizplūstošā tvaika sastāvs ir vienāds ar flegmas sastāvu, t. i., $y_2 = x_2$. Darba punkts, kas atbilst kolonnas augšējām šķēlumam atrodas uz diagrammas diagonāles (punkts 1). Darba taisnes slīpums ir atkarīgs no flegmas skaitļa R . Samazinoties flegmas skaitlim, darba taisne pagriežas ap punktu 1 līdzsvara līknes virzienā un pie noteiktas $R = R_{\min}$ krusto līdzsvara līkni punktā a . Flegmas skaitļa vērtību R_{\min} sauc par minimālo flegmas skaitli un to var aprēķināt šādi:

$$R_{\min} = \frac{x_2 - y_1^*}{y_1^* - x_1}. \quad (4.17.)$$

Reālos apstākļos rektifikācijas kolonnas darbojas ar flegmas skaitli, kas ir 1,2 līdz 2,5 reizes lielāks par R_{\min} , t. i.,

$$R = (1,2 - 2,5) R_{\min}. \quad (4.18.)$$

Pēc praktiskiem novērojumiem R_{opt} parasti ir par 20–30 % lielāks nekā

R_{\min} , t. i.,

$$R_{\text{opt}} = (1,2 - 1,35)R_{\min}. \quad (4.19.)$$

Otru darba taisnes punktu 2 iegūst uz ordinātu ass, atliekot nogriezni B , kuru savukārt aprēķina šādi:

$$B = \frac{x_2}{R_{\text{opt}} + 1}. \quad (4.20.)$$

Savienojot punktus 1 un 2, iegūst periodiskās rektifikācijas kolonnas darba taisni.

4.

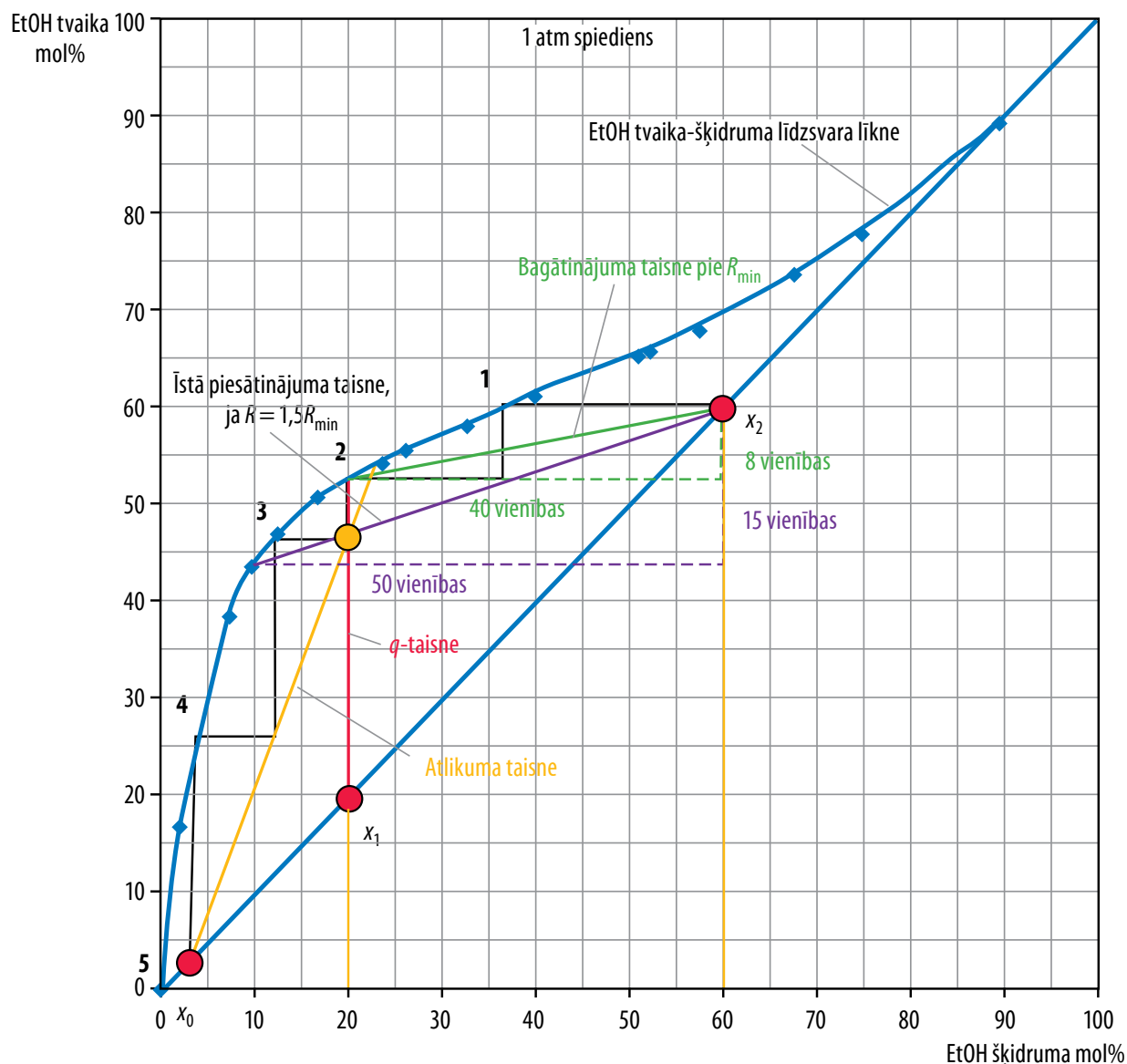
Periodiskas darbības rektifikācijas process ir izteikti nestacionārs process, tāpēc sākotnējā maisījuma sadalīšana un koncentrācijas sadalījums kolonnā mainīsies laikā. Periodisku rektifikāciju ražošanā realizē apstākļos, kad tiek nodrošināts patstāvīgs flegmas režīms, vai arī apstākļos, kad tiek nodrošināts nemainīgs destilāta sastāvs. Ražošanā plašāk izplatīta ir periodiskā rektifikācija nemainīga flegmas skaitļa apstākļos. Šajā gadījumā darba taisnes slīpums nemainās. Rektifikācijas procesa laikā vieglāk gaistošā komponenta koncentrācija kubā samazinās, līdz ar to samazinās arī vieglāk gaistošā komponenta koncentrācija rektifikātā. Procesā rezultātā iegūst rektifikātu ar kādu vidējo sastāvu.

4.3. Darba uzdevumi

Teorētiskais uzdevums.

Iepazīties ar turpmāk minētu rektifikācijas uzdevuma grafisko risinājuma metodi, ko pazīst arī kā *McCabe-Thiele* metodi (4.9. att.).

Etanola ūdens maisījums, kas satur 20 mol% (x_1) etanola, tiek sildīts un nonāk rektifikācijas kolonnā kā piesātināts etanola ūdens šķīdums. Dots uzdevums koncentrēt šo maisījumu, lai tas destilātā saturētu 60 mol% (x_2) etanola. Kuba atlikumā vajadzētu palikt ne vairāk kā 2 mol% (x_0) etanola. Flegmas skaitlis R tiek izvēlēts 1,5 reizes lielāks par R_{\min} jeb $R = 1,5 \cdot R_{\min}$. Cik rektifikācijas stadijas jeb šķīvji ir nepieciešami, lai īstenotu ieceri? Kurā rektifikācijas stadijā ieteicams ievadīt sākotnējo maisījumu? Cik liels ir R_{\min} ? Cik liels ir R ?



4.9. att. Etanola ūdens tvaika-šķidruma līdzsvara diagramma ar rektifikācijas stadijām un darba taisnēm.

1. Y - X etanola tvaika-šķidruma diagrammā uz diagonāles ($y=x$) atliek uzdevumā dotos punktus x_0 , x_1 un x_2 .
2. Piesātināts etanola-ūdens šķidrums nozīmē, ka darba parametrs q šādā situācijā ir vienāds ar 1. Taisnes q gradients tiek atrasts attiecīgi $q/(q-1)$ jeb $1/(1-1) = \infty$. Tas nozīmē, ka q līnija ir vertikāla un tiek vilkta no x_1 līdz tvaika-šķidruma līdzsvara līknei.
3. Tālāk no punkta x_2 velk rektifikācijas jeb bagātinājuma darba taisni, kas krusto q taisni uz tvaika-šķidruma līdzsvara līknes. Rektifikācijas taisnes gradients ir $R_{\min}/(R+1) = 8/40 = 0,20$. Tā kā $R = 1,5R_{\min}$, tad iepriekšējo izteiksmi var uzrakstīt kā $R_{\min}/(1,5R_{\min} + 1) = 0,20$, no kurienes $R_{\min} = 0,285$. Tad $R = 1,5 \cdot 0,285 = 0,43$.

4. Īstā rektifikācijas taisne līdz ar to nedaudz izmainās, un tās gradients ir $R/R + 1$ jeb $0,43/(0,43 + 1) = 0,3$ jeb $15/50$.
5. Novelk kuba atlikuma daļas taisni no x_0 tā, lai tā krusto īsto rektifikācijas taisni un q taisni. Iegūst 3 taisņu krustpunktu.
6. Atrod rektifikācijas stadiju skaitu, kas nepieciešamas, lai īstenotu uzdevumā minēto etanola bagātināšanu. To veic, zīmējot uz leju vedošas “trepes” no x_2 līdz x_0 starp darba taisnēm (t. i., īsto piesātinājuma taisni un atlikumu taisni) un tvaika–šķidrums līdzsvara līkni. Saskaita pakāpienus un iegūst piecas stadijas.
7. Trīs taisņu krustpunkta tuvumā atrodas 2. un 3. stadija jeb ideālā maisījuma ievades vieta ir starp 2 un 3 rektifikācijas stadiju.
Pēc iepriekš minētās risinājuma gaitas atrisināt šo pašu uzdevumu, ja punkti x_0 , x_1 un x_2 ir attiecīgi 4 mol%, 15 mol% un 65 mol% vai tādi, kā tos norāda pasniedzējs.

Praktiskais uzdevums.

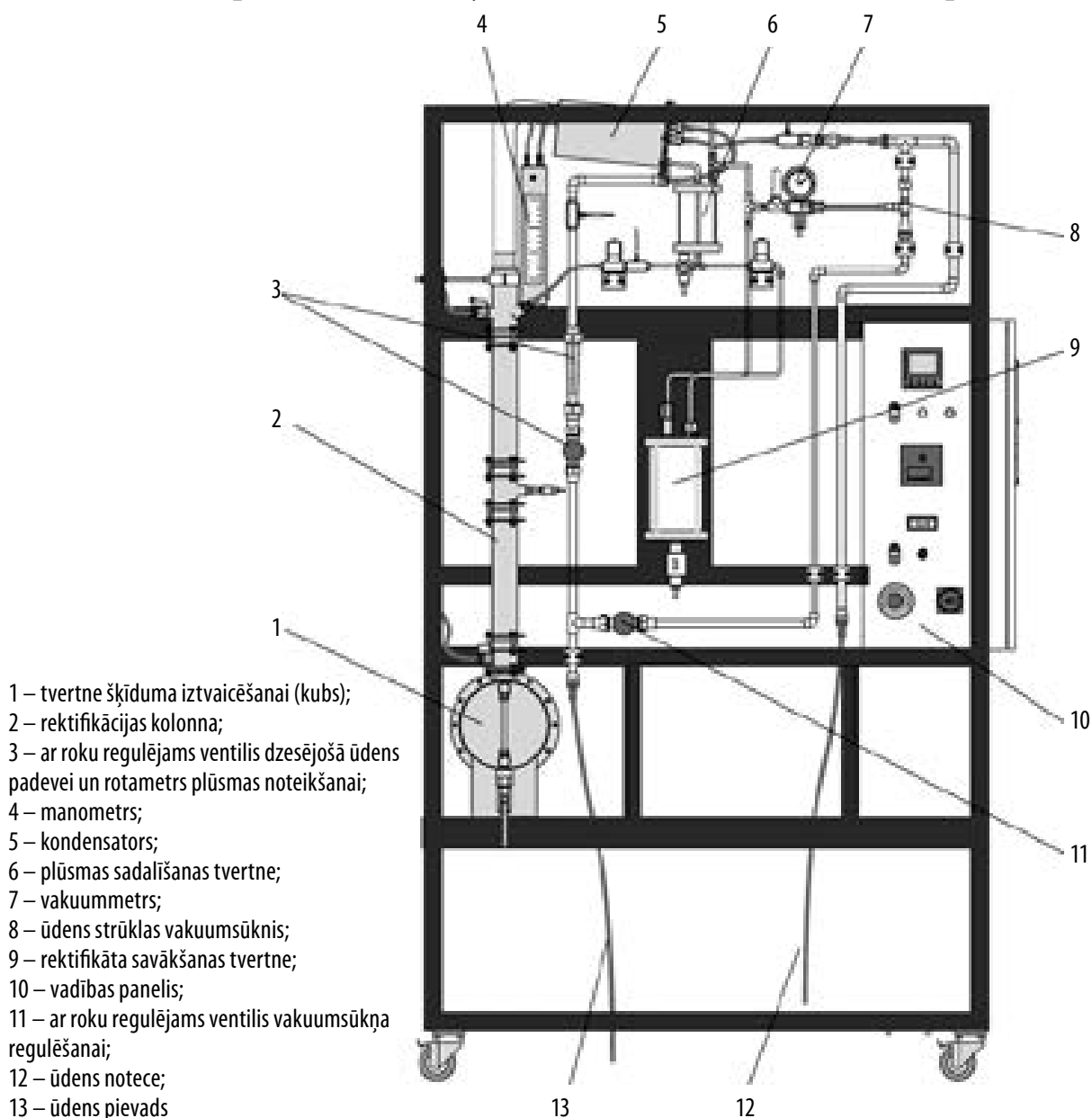
Apgūt rektifikācijas/destilācijas iekārtas darbību un pārtvaicēt (t. i., bagātināt) dotā etanola–ūdens maisījumu. Eksperimentāli noteikt pārtvaicētā etanola %v/v. Aprēķināt, cik daudz etanola %v/v ir sākotnējā maisījumā. Aprēķināt procesā patērēto elektroenerģiju (kWh). Izdarīt secinājumus par rektifikācijas/destilācijas procesu, tā efektivitāti un ierobežojumiem. Ja iespējams, pamatot kolonnas šķīvju skaitu, kas nepieciešams pārtvaices procesā.

Atplūdes režīmu (0–100 %), sildīšanas un/vai vakuuma režīmu norāda pasniedzējs! Vienkāršā destilācijā (atplūde 0 %) viss destilāts tiek uztverts destilāta tvertnē. Rektifikācijas jeb frakcionētās destilācijas režīmā daļa destilāta tiek ievadīta atpakaļ kolonnā. 100 % atplūde nozīmē, ka viss destilāts tiek ievadīts atpakaļ kolonnā un nonāk destilācijas ciklā. Lai iegūtu relatīvi tīru destilātu parasti izmanto 40–80 % atplūdi. Jo augstāks atplūdes %, jo tīrāks būs destilāts, bet arī ilgāks destilācijas laiks un lielāks enerģijas patēriņš.

4.4. Iekārtas apraksts

Iekārta aprakstīta 4.10. att.–4.13. att. Tērauda tvertne 1 ar iebūvētu elektrisko sildītāju kalpo kā iztvaicētājs (kubs). To var uzpildīt caur vāku tā augšējā daļā. Tvertnes priekšpusē ir caurulīte, kas norāda tajā esošā šķidrums līmeni. Kolonna 2, kurā notiek masas apmaiņas process, tā norises laikā ir iestiprināta virs kuba. Spiediena kritumu, kas rodas kolonnā, var izmērīt ar manometru 4. Tvaiks plūst pa cauruli, kas atrodas virs kolonnas, uz kondensatoru/deflegmatoru 5, kas tiek

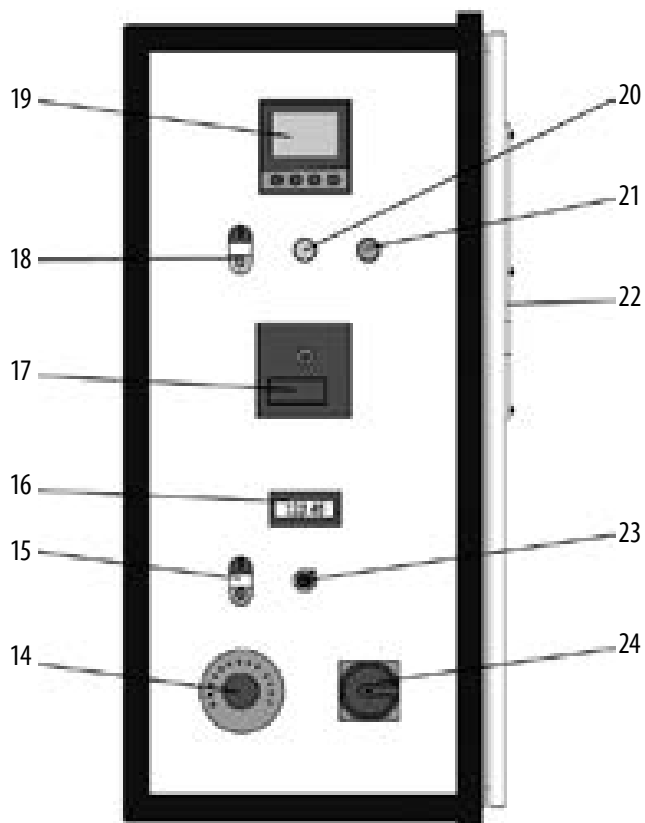
dzesēts ar ūdeni. Kondensators tiek dzesēts ar ūdeni no ūdensvada. Dzesējošā ūdens padevi var regulēt ar vārstu un nolasīt no rotametra 3. Kondensāts no kondensatora plūst uz plūsmas sadalītāju 6., kur to var dalīt flegmā un rektifikātā uz iekārtas vadības panela 10. No sadalītāja var paņemt paraugu sastāva analīzei (caur krānu sadalītāja tvertnes apakšā). Uzmanību, šķīduma paraugs var būt karsts! Rektifikāts ietek savākšanas traukā 9. Kuba atlikumu var novadīt pa noteces vārstu, kas atrodas kuba priekšdaļā. Vakuumsūkni 8 izmanto vakuuma destilācijai jeb destilācijai retinājumā. Vakuumsūknis tiek darbināts ar ūdeni no ārēja ūdens avota. Ar roku darbināms ventilis 11 tiek izmantots, lai regulētu ūdens plūsmu caur sūkni. Sasniegto retinājumu var nolasīt no vakuummetra 7. Visas slēdžu un pārbaudes funkcijas nodrošina elektriskais vadības panelis 10.



4.10. att. Destilācijas un rektifikācijas iekārta.

4.

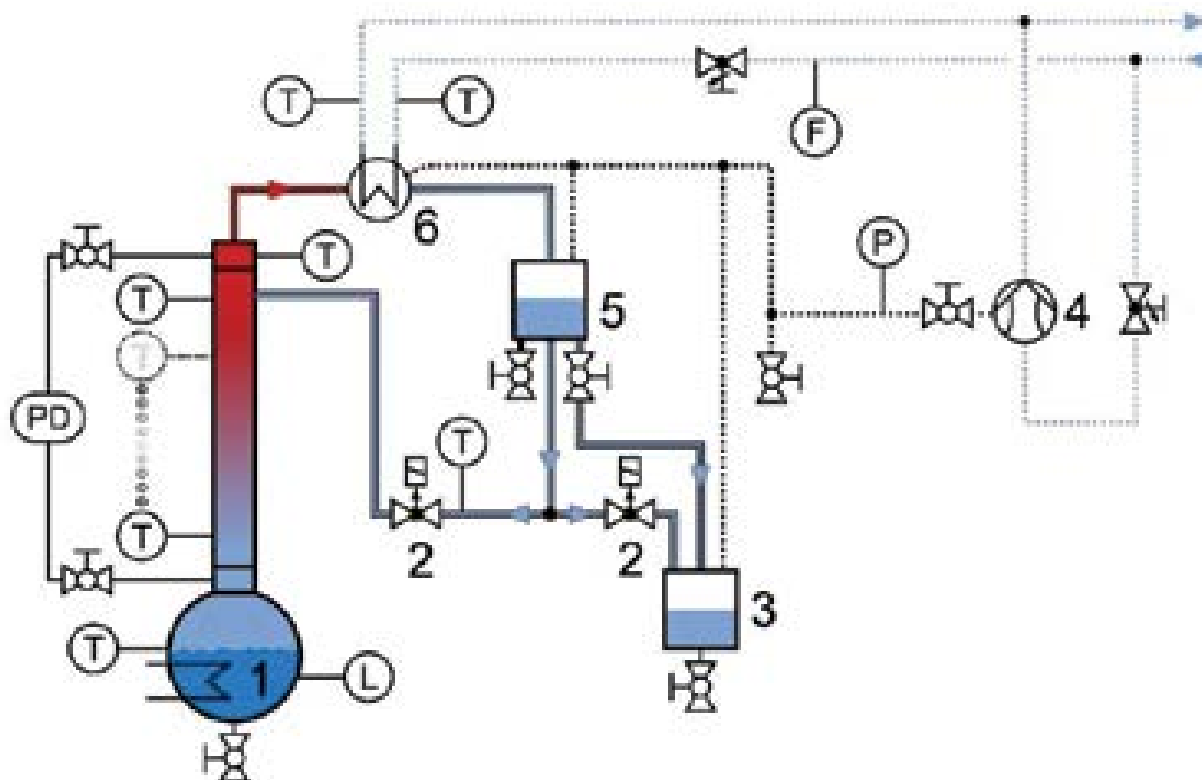
- 14 – ārkārtas izslēgšanas slēdzis;
- 15 – plūsmas sadalītāja ieslēgšanas/izslēgšanas slēdzis;
- 16 – flegmas skaitļa rādītājs (kolonnā atgriezta kondensāta daudzums procentos);
- 17 – ekrāns un mērāmā punkta pārslēgs temperatūrai T1 – T12;
- 18 – sildītāja ieslēgšanas/izslēgšanas slēdzis;
- 19 – galvenais temperatūras T13 regulators;
- 20 – zema šķidrums līmeņa brīdinājuma signālspuldze;
- 21 – sildītāja indikatorspuldze;
- 22 – sistēmas shēma;
- 23 – regulators flegmas skaitļa iestatīšanai;
- 24 – galvenais slēdzis



4.11. att. Vadības panelis.



4.12. att. Temperatūras kontrolieris *T13* regulēšanai. Ar bultiņām regulē iestatāmās vērtības uz augšu vai leju. Ar pogu *EXIT* (pieturot dažas sekundes), ierīces darba režīms pārslēdzas no manuālā uz automātisko un otrādi.



4.13. att. Periodiskas darbības rektifikācijas procesa shēma: 1 – iztvaicētājs ar kolonnu; 2 – vārsti (atceces koeficients); 3 – virsproduktu tvertne; 4 – ūdens strūkļas sūknis; 5 – fāžu atdalīšanas tvertne; 6 – kondensators; F – plūsmas ātrums; L – līmenis; P – spiediens; PD – spiediena starpība; T – temperatūra (punktēta līnija); zila līnija – dzesēšanas ūdens.

4.5. Darba gaita

1. Iepazīstas ar iekārtu un uzzīmē tās shēmu.
2. Nosaka dotā maisījuma koncentrāciju, ja nepieciešams to koriģē atbilstoši darba variantam.
3. Nosaka minimālo un attiecīgi optimālo flegmas skaitli (izmanto “Etanola-ūdens tvaika-sķidruma līdzsvara diagrammu”, sk. pielikumā).
4. Pārbauda, vai visi iekārtas izplūdes vārsti ir aizvērti (kubam, sadalītājam, savācējam utt.)
5. Maisījumu iepilda pārtvaices kubā, iepriekš nosakot tā kopējo sākuma tilpumu.
6. Ieslēdz kuba sildītāju vadības panelī (manuālajā režīmā) un iestāda nepieciešamo jaudu (50 %) vai nepieciešamo temperatūru kolonnā (automātiskajā režīmā) atbilstoši uzdotajam variantam.
7. Deflegmatorā/kondensatorā ieregulē dzesēšanas ūdens padevi. Ūdens plūsmu deflegmatorā ieregulē tādu, lai izejošā dzesēšanas ūdens aptuveni

nā temperatūra būtu 40 °C, reģistrē ūdens plūsmas ātrumu.

8. Uzņem laiku, kad darbs sāks.

Destilācija (1. variants)

9. Atver destilāta notecināšanas vārstu plūsmas sadalītājā.
10. Flegmas skaitli iestāda uz 0 % (flegma uz kolonnu netiek padota).
11. Kad sakrājies uzdotais produkta daudzums, noslēdz savākšanas vārstu un flegmas skaitli uzregulē uz 100 % (flegma tiek padota šķīvjū saslapiņāšanai).
12. Uzņem laiku, kad destilācija pabeigta.
13. Nosaka iegūtā destilāta koncentrāciju (no blīvuma).

4.

Rektifikācija (2. variants)

14. Noslēdz destilāta notecināšanas vārstu plūsmas sadalītājā.
15. Sākumā flegmas skaitli iestata uz 100 % (100 % kondensāta tiek atgriezti rektifikācijas kolonnā).
16. Kad kolonnas temperatūra T13 sasniedz 68–73 °C, tad apmēram pēc 10 minūtēm iestata prasīto flegmas skaitli.
17. Uzņem laiku, kad sākas rektifikācija.
18. Ik pēc norādītā produkta tilpuma uzkrāšanās nosaka rektifikāta relatīvo blīvumu un koncentrāciju.

Rektifikācija (destilācija) retinājumā (3. variants)

19. Rīkojas kā parastās destilācijas vai rektifikācijas gadījumā.
20. Atver ūdens strūklas sūkņa sūcvada krānu, nodrošina ūdens padevi un iestāda plūsmas ātrumu tādu, lai sasniegtu –0,4..–0,5 bāru spiedienu, aizgriez rektifikāta savākšanas tvertnes ventilācijas krānu un krānu zem vakuum metra.
21. Eksperimenta laikā regulāri jāpārbauda retinājums un jānodrošina, lai tas paliek konstants.

Darba beigšana

1. Ja pēdējais darbs ir bijis rektifikācija (destilācija) retinājumā, tad vispirms sistēma ir jāatbrīvo no gaisa, atverot krānu, kas ir zem vakuummetra, tad rektifikāta savākšanas trauka atgaisošanas krānu.
2. Izslēdz sildītāja slēdzi, ļauj vēl aptuveni 5 minūtes cirkulēt dzesēšanas ūde-

nim, noslēdzūdens padevi regulējošos ventīlus un ūdens pievada krānu.

3. Izslēdz iekārtas galveno slēdzi.

Etanola-ūdens maisījuma raksturlielumus, t. i., savstarpējās masas%, tilpuma% un blīvuma sakarības pie dažādām temperatūrām var atrast interneta resursos un rokasgrāmatās. Etanola-ūdens tvaika šķidruma līdzsvara diagramma atrodama šīs grāmatas pielikumā.

4.6. Kontroljautājumi

4.

- ◆ Kas ir šķīdums un kas ir šķidrums?
- ◆ Kas ir azeotrops šķīdums?
- ◆ Kas ir kopīgs un kas atšķirīgs destilācijai un rektifikācijai?
- ◆ Kas nosaka iegūstamā produkta tīrību?
- ◆ Kas ir flegma un kur tā plūst?
- ◆ Kas ir flegmas skaitlis? Kādam tam vajadzētu būt un kā tas ietekmē rektifikātu?
- ◆ Kā ir saistīts šķidruma blīvums, viršanas temperatūra un koncentrācija?
- ◆ Kādos gadījumos izmanto pārtvaici retinājumā?

5. KONVEKTĪVĀ ŽĀVĒŠANA

5.1. Teorētiskais pamatojums

Žāvēšana ir mitruma aizvadišanas process no materiāla, to iztvaicējot un radušos tvaikus aizvadot. Lai to realizētu, žāvējamam materiālam ir jāpievada siltums, kas ir nepieciešams mitruma iztvaicēšanai. Žāvēšanu ļoti plaši izmanto ķīmiskajā rūpniecībā. Izšķir dabisko un mākslīgo žāvēšanu. Dabisko žāvēšanu realizē atklātā gaisā bez papildu siltuma pievadišanas. Izžāvētā produktā mitrums būs mainīgs un atkarīgs no laika apstākļiem.

5. Ķīmiskajā rūpniecībā izmanto mākslīgo žāvēšanu. Siltumu mitrajam materiālam pievada ar karstu gaisu, dūmgāzēm, retāk ar karstām inertām gāzēm. Žāvējošais aģents uzņem mitrumu no materiāla un tiek nosūkts ar ventilatoru.

Ķīmiskajā rūpniecībā lieto vairākus mākslīgās žāvēšanas veidus:

- 1) kontakta žāvēšana – siltums materiālam no siltumnesēja tiek pievadīts caur atdalošu virsmu;
- 2) konvektīvā žāvēšana – siltums materiālam tiek pievadīts tieši, saskaroties ar žāvēšanas aģentu;
- 3) radiācijas žāvēšana – siltums tiek pievadīts ar infrasarkanajiem stariem;
- 4) dielektriskā žāvēšana – siltums materiālā izdalās augstas frekvences strāvas iedarbībā;
- 5) sublimācijas žāvēšana – materiāls žūst sasaldētā veidā dziļā vakuumā.

Atkarībā no apstākļiem lielākā daļa materiālu mitrumu no apkārtējās vides var gan uzņemt, gan atdot tai. Ja materiāls atdod mitrumu apkārtējai videi – notiek žāvēšana. Šo procesu ietekmē ūdens tvaika parciālais spiediens apkārtējā vidē p_v un virs materiāla p_m .

Ja $p_m > p_v$, tad mitrums no materiāla pārvietojas uz apkārtējo vidi, t. i., materiāls žūst. Ja $p_m < p_v$, tad materiāls uzņem mitrumu no apkārtējās vides, t. i., materiāls mitrinās. Līdz ar to spiedienu starpība $\Delta p = p_m - p_v$ ir žāvēšanas procesa virzošais spēks. Jo lielāks ir Δp , jo straujāk notiek materiāla žūšana. Žūšanas process turpinās tik ilgi, līdz $p_m = p_v$, t. i., $\Delta p = 0$. Materiāla mitrumu, kas atbilst šim stāvoklim, sauc par līdzsvara mitrumu w^* . Līdzsvara mitrums ir atkarīgs no vides relatīvā mitruma φ un temperatūras t , to izsaka sakarība: $w^* = f(\varphi, t)$.

5.2. Materiāla mitrums, konvektīvās žāvētavas materiālā bilance

Žāvētavu aprēķinu pamatā ir žāvēšanas procesa materiālā un siltuma bilance. Tas ļauj aprēķināt izžāvējamā mitruma daudzumu un šim nolūkam nepieciešamo gaisa un siltuma (enerģijas) daudzumu. Pievadāmais gaisa daudzums nosaka ventilatora, gaisvada, atputekļošanas iekārtu un arī pašas žāvētavas izmērus. Žāvētavai pievadāmais siltuma daudzums nosaka siltumnesēja vai kurināmā patēriņu, kā arī kaloriferu vai kurtuvju izmērus.

Materiāla mitrumu parasti izsaka procentos kā relatīvo vai absolūto mitrumu. Ja mitrā materiāla iesvaru apzīmē ar G_m , bet absolūti sausa materiāla masu ar G_s , tad $G_m - G_s = W$ ir mitruma masa.

Relatīvo materiāla mitrumu jeb vienkārši materiāla mitrumu w iegūst, attiecinot aizvadītā mitruma masu pret sākuma masu:

$$w = \frac{G_m - G_s}{G_m} \cdot 100 \% = \frac{W}{G_m} \cdot 100 \% \quad (5.1.)$$

Materiāla absolūto mitrumu iegūst, attiecinot mitruma masu pret sausa materiāla masu:

$$w_a = \frac{G_m - G_s}{G_s} \cdot 100 \% = \frac{W}{G_s} \cdot 100 \% \quad (5.2.)$$

Pārejai no relatīvā uz absolūto mitrumu un otrādi lieto šādas izteiksmes:

$$w = \frac{100 \cdot w_a}{100 + w_a}; \quad (5.3.)$$

$$w_a = \frac{100 \cdot w}{100 - w}. \quad (5.4.)$$

Mitruma daudzumu, ko žāvēšanas procesā aizvada no materiāla, nosaka:

$$W = G_1 - G_2 \quad \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right), \quad (5.5.)$$

kur G_1 un G_2 – žāvētavā ievadītā mitrā materiāla masa sekundē un no žāvētavas izvadītā materiāla masa sekundē.

Ja žāvētavā ievadītā materiāla mitrums ir w_1 % un no žāvētavas izvadītā materiāla mitrums ir w_2 %, tad sekundē izžāvētā materiāla masa ir:

$$G_2 = G_1 \frac{100 - w_1}{100 - w_2} \quad \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right). \quad (5.6.)$$

Bet sekundē iztvaicētā mitruma masa ir:

$$W = G_1 \frac{w_1 - w_2}{100 - w_2} = G_2 \frac{w_1 - w_2}{100 - w_2} \quad \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right). \quad (5.7.)$$

Ja žāvēšanai izlieto L (kg/s) absolūti sausa gaisa un tā mitruma saturs pirms žāvētavas ir x_1 ($\text{kg}_{\text{mitruma}}/\text{kg}_{\text{sausā gaisa}}$), bet no žāvētavas aizvadāmā mitrā gaisa mitruma saturs ir x_2 ($\text{kg}_{\text{mitruma}}/\text{kg}_{\text{sausā gaisa}}$), tad ar gaisu žāvētavā nokļūst $L \cdot x_1$ (kg/s) mitruma, no žāvētavas tiek aizvadīts $L \cdot x_2$ (kg/s) mitruma, no materiāla tiek iztvaicēts W (kg/s) mitruma. Žāvētavas materiālā bilance attiecībā uz mitrumu ir:

$$Lx_2 = Lx_1 + W. \quad (5.8.)$$

5. Izmantojot vienādojumu (5.8.), var aprēķināt žāvēšanai nepieciešamā sausā gaisa patēriņu:

$$L = \frac{W}{x_2 - x_1} \quad \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right). \quad (5.9.)$$

Nepieciešamais āra gaisa patēriņš:

$$L_{\text{ar}} = L(1 + x_0) \quad \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right). \quad (5.10.)$$

Īpatnējais sausā gaisa patēriņš, t. i., tā sausā gaisa masa, kas nepieciešama 1 kg mitruma iztvaicēšanai žāvētavā, aprēķināms šādi:

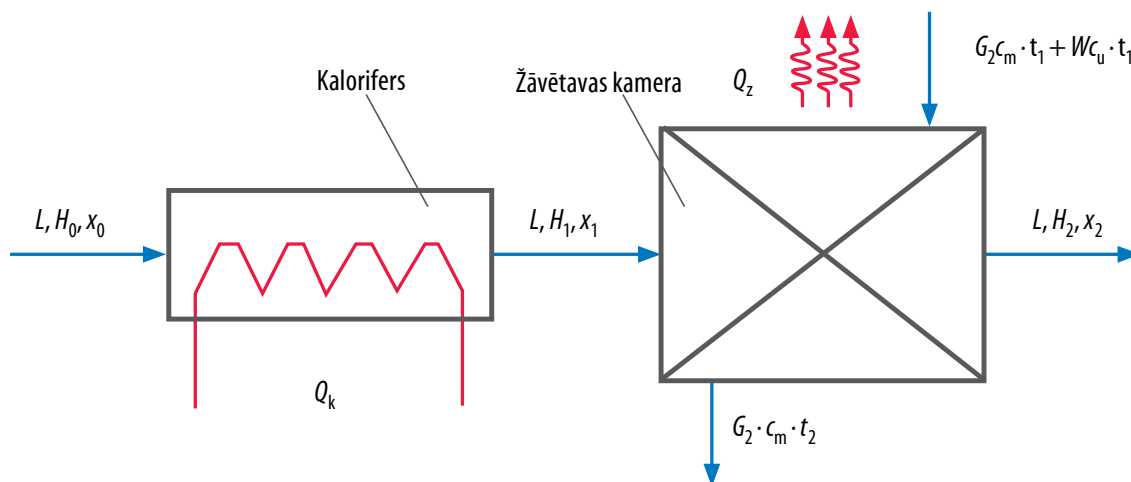
$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{x_2 - x_1} \quad \left(\frac{\text{kg}_{\text{sausā gaisa}}}{\text{kg}_{\text{iztv. mitruma}}} \right). \quad (5.11.)$$

Sildot gaisu kaloriferā, žāvētavā ievadītā gaisa mitruma saturs x_1 ir vienāds ar āra gaisa mitruma saturu x_0 , tādēļ:

$$l = \frac{1}{x_2 - x_0}. \quad (5.12.)$$

5.3. Žāvētavas siltuma bilance

Tradicionālā izpildījuma konvektīvajās žāvētavās žāvēšanas aģents, kas uzsildīts kaloriferā, pārvietojas žāvēšanas kamerā līdzplūsmā vai pretplūsmā žāvējamam materiālam (5.1. att.)



5.1. att. Konvektīvās žāvēšanas shēma siltuma bilances sastādīšanai.

Ņemot vērā to, ka mitrā materiāla G_1 (kg/s) siltuma saturs summējas aditīvi no sausā materiāla $G_2 c_m t_1$ un mitruma daudzuma, kas tajā atrodas $W c_u t_1$, siltuma, to izsaka šādi:

$$G_1 c_m t_1 = G_2 c_m t_1 + W c_u t_1, \quad (5.13.)$$

kur c_m – materiāla īpatnējais siltums, kJ/(kg·K);

c_u – ūdens īpatnējais siltums, kJ/(kg·K);

t_1 – materiāla temperatūra pirms žāvēšanas, °C.

Siltums, kas nepieciešams žāvēšanai, tiek pievadīts no kalorifera (Q_k). Ņemot vērā visas siltuma plūsmas, kas tiek pievadītas žāvēšanas kamerai un no tās aizvadītas, ņemot vērā arī zudumus Q_z apkārtējā vidē, iegūstam siltuma bilances vienādojumu:

$$LH_0 + G_2 c_m t_1 + W c_u t_1 + Q_k = LH_2 + G_2 c_m t_2 + Q_z. \quad (5.14.)$$

Ja vienādojuma (5.14.) abas puses izdala ar aizvadītā mitruma daudzumu W , iegūst īpatnējo siltuma patēriņu 1 kilograma mitruma aizvadīšanai no materiāla kamerā:

$$q_k = l(H_2 - H_0) + q_m + q_z - c_u t_1, \quad (5.15.)$$

kur $q_m = (G/W) \cdot c_m (t_2 - t_1)$ un $q_z = Q_z/W$.

Īpatnējo siltuma patēriņu kaloriferā var noteikt arī šādi:

$$q_k = l(H_1 - H_0). \quad (5.16.)$$

Ievietojot (5.16.) vienādojuma izteiksmi vienādojumā (5.15.), iegūsim:

$$l(H_1 - H_0) = l(H_2 - H_0) + q_m + q_z - c_u t_1, \quad (5.17.)$$

vai

$$l(H_2 - H_1) = c_u t_1 - (q_m + q_z). \quad (5.18.)$$

Apzīmējot vienādojuma (5.18.) labo pusi ar Δ , iegūst:

$$\Delta = c_u t_1 - (q_m + q_z), \quad (5.19.)$$

un šādu izteiksmi:

$$l(H_2 - H_1) = \Delta. \quad (5.20.)$$

Ņemot vērā, ka $l = 1/(x_2 - x_0)$, var rakstīt:

$$\frac{(H_2 - H_1)}{(x_2 - x_0)} = \Delta. \quad (5.21.)$$

Iegūtais lielums Δ ir žāvētavas iekšējā siltuma bilance.

5.4. Žāvēšanas procesa attēlojums H - x diagrammā

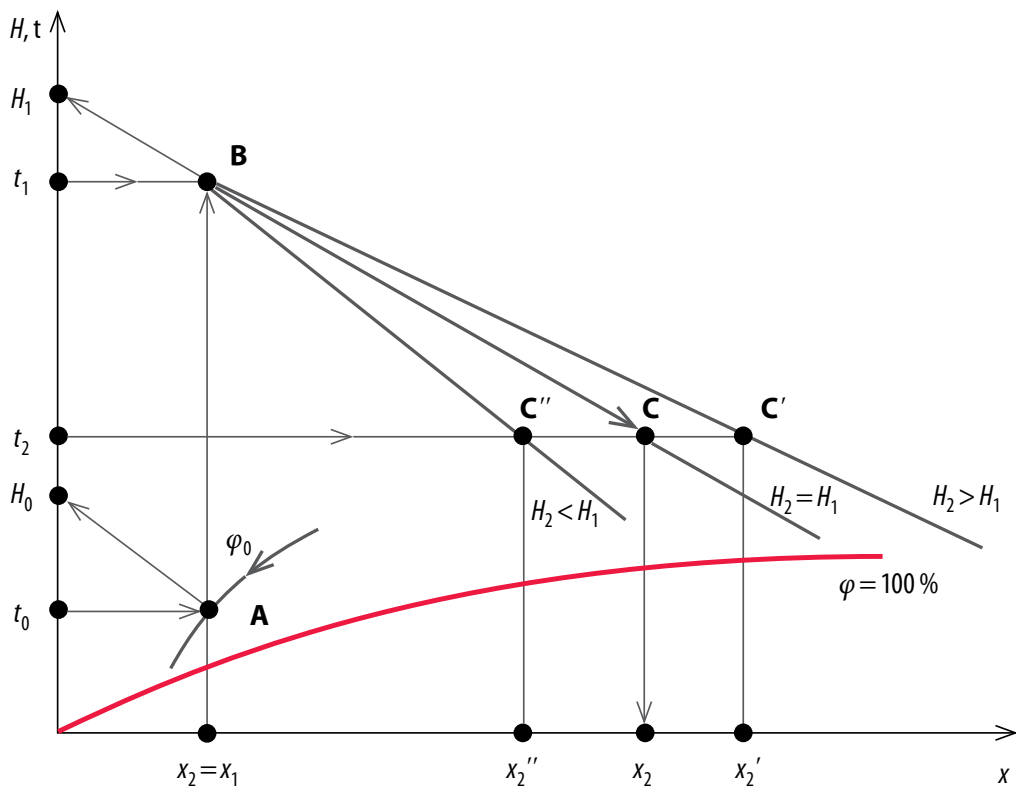
Konvektīvās žāvētavas gaiss (dūmgāzes) uzsilda žāvējamo materiālu, vienlaikus uzņem mitruma tvaikus un aizvada tos. Šo gaisu sauc par siltumnesēju. Siltumnesēja svarīgākos parametrus un to izmaiņu žāvēšanas procesā var noteikt, izmantojot H - x diagrammu (sk. "Dzeses tornis" aprakstu).

Gaisa uzsildīšana kaloriferā no ieejas parametriem (t_0, ϕ_0) līdz nepieciešamajai temperatūrai attēlojas kā taisne AB. Tā kā gaisa mitruma saturs kaloriferā nemainās, tad $x_0 = x_1$.

Atkarībā no lieluma Δ skaitliskās vērtības reālas žāvētavas darba taisne (5.2. att.) var atrasties trīs stāvokļos (BC, ja $\Delta = 0$; BC', ja $\Delta > 0$; BC'', ja $\Delta < 0$). Δ vērtību nosaka, izmantojot (5.19.) vienādojumu. Gadījumā, kad $\Delta = 0$, sauc par teorētisko žāvētavu, t. i., $q_m = 0, q_z = 0, t_1 = 0$. Mitrums no materiāla, kura temperatūra $t_1 = 0$, iztvaicējas uz tā siltuma rēķina, ko gaiss atdod atdzīstot. Tai pašā laikā gaisa entalpija nemainās $H_1 = H_2$, jo siltuma samazinājumu kompensē tvaiks, kas no materiāla ir pārgājis gaisā.

Aprēķinot Δ vērtību un konstruējot reālas žāvētavas darba taisni, var noteikt atstrādātā gaisa mitruma saturu X_2 . Turklāt īpatnējo gaisa un mitruma patēriņu nosaka pēc jau zināmiem vienādojumiem (5.12.) un (5.16.).

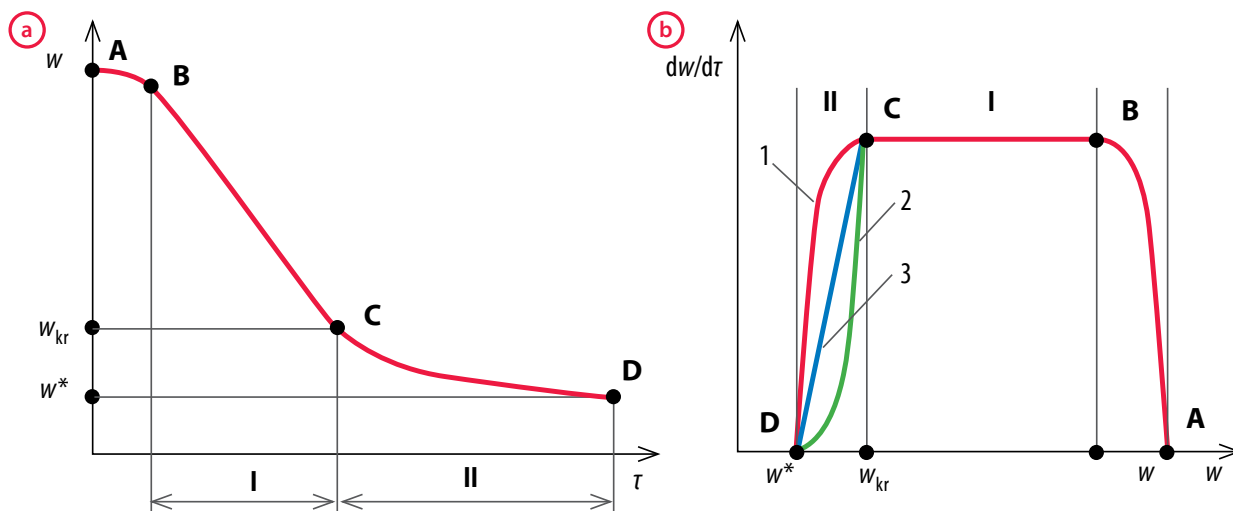
5.



5.2. att. Žāvēšanas procesa attēlojums H - x diagrammā.

5.5. Žāvēšanas kinētika

Žāvēšanas kinētika raksturo materiāla mitruma izmaiņu žāvēšanas laikā, to attēlo žāvēšanas līkne un žāvēšanas ātruma līkne (5.3. att.).



5.3. att. Mitra materiāla žāvēšana (a) un žāvēšanas ātruma līkne (b).

Materiāla mitruma samazināšanos laikā $w=f(\tau)$ attēlo žāvēšanas līkne (5.3. att. a).

Teorētiski materiāla mitrums var sasniegt līdzsvara mitruma w^* bezgalīgi ilgā laikā, turklāt žāvēšanas ātrums $dw/d\tau$ līdzsvara brīdī kļūst vienāds ar nulli (5.3. att. b), t. i.,

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{dw}{d\tau} = 0. \quad (5.22.)$$

Pētot materiālu žāvēšanas līknes, parasti var izdalīt trīs periodus: AB – materiāla sasilšanas periods, BC – pirmais jeb nemainīga žāvēšanas ātruma periods, CD – otrs jeb mainīga žāvēšanas ātruma periods.

Sasilšanas periods AB ir atkarīgs no žāvējamā materiāla īpašībām. Materiālam pievadītais siltums tiek patērēts, lai materiālu uzsildītu no sākuma temperatūras t_1 līdz mitrā termometra temperatūrai t_m . Šajā periodā mitruma atdeve ir niecīga, žāvēšanas ātrums no nulles līdz noteiktam lielumam pieaug pirmajā periodā (5.3. att. b). Tālāk seko nemainīga žāvēšanas ātruma periods BC, materiāla mitrums strauji samazinās. Punktā C sākas otrs žāvēšanas jeb mainīga žāvēšanas ātruma periods. Materiāla mitruma izmaiņu atspoguļo līkne CD, perioda beigās mitrums asimptotiski tuvojas līdzsvara mitrumam. Žāvēšanas ātruma līkne otrajā periodā (5.3. att. b) ir mainīga (līknes – 1, 2, 3) un atkarīga no žāvējamā materiāla. Līkne 1 un 3 attiecas uz plāniem plakaniem materiāliem (piem., keramika). Mitrumu punktā C starp pirmo un otro periodu sauc par materiāla kritisko mitrumu w_{kr} . Tas atbilst stāvoklim, kad no materiāla jau ir aizvadīts brīvais mitrums (mehāniski saistītais). Turpmāko žāvēšanas ātrumu limitē mitruma difūzija no materiāla iekšējiem slāņiem uz virsmu.

Parasti žāvēšanas līknes un žāvēšanas ātruma līknes iegūst eksperimentāli pie nemainīgiem žāvēšanas aģenta parametriem (t, x).

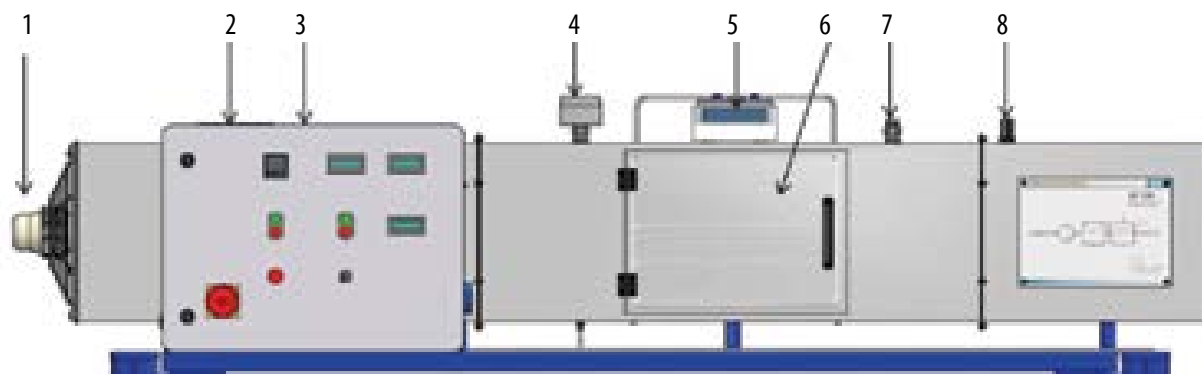
5.6. Darba uzdevumi

- ♦ Pēc pasniedzēja norādījumiem (t. i., žāvēšanas temperatūra un/vai ventilatora ātrums) veic dažādu materiālu (lupatiņas, māla podiņi vai gāzbetona klucīši) žāvēšanu.
- ♦ Pierakstīt un grafiski attēlot žāvēšanas kinētiku (žāvēšanas procesa līkni un ātruma līkni). Šo procesu var veikt manuāli vai izmantot iekārtai blakus pieejamo datoru ar CE130 programmatūru. Norādes, kā lietot datoru, vaicāt pasniedzējam.
- ♦ Attēlot izvēlētā materiāla žūšanas procesu $H-x$ diagrammā.
- ♦ Izdarīt secinājumus no žāvēšanas procesa līknes rakstura un ieteikt kādu žāvēšanas paātrināšanas metodi.

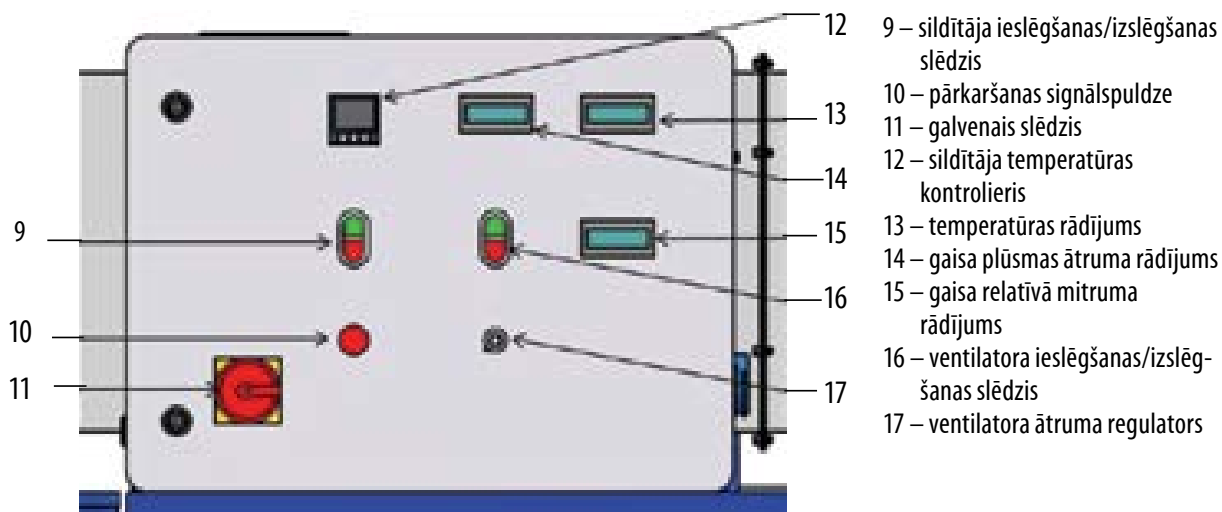
5.7. Iekārtas apraksts

Galvenie iekārtas elementi paskaidroti 5.4. att. un 5.5. att. Iekārtu izmanto cietu vielu žāvēšanai konvekcijas ceļā. Žāvētava ir konstruēta kā metāla gaisa vads ar kvadrātisku šķērsriezumu 350 mm × 350 mm. Vienā gaisa vada galā novietots ventilators (1) piespiedu konvekcijas nodrošināšanai. Gaisa vadā iesūktais gaiss virzās gar sildelementu (2). Vadības panelī (3) gaisa temperatūru iestata ar kontrolieri (12), gaisa kustības ātrumu – ar ventilatora ātruma regulatoru (17). Sildītāju un ventilatoru ieslēdz un izslēdz ar divvirzienu slēdzi (9 un 16). Sasildītais gaiss plūst uz žūšanas kameru (5). Žūšanas kamerā materiālu ievieto un var novērot pa caurspīdīgām durtiņām. Materiālu var novietot uz metāla plauktiņiem vai iekarināt. Materiāla žūšanas kinētiku var pētīt, mērot masas izmaiņu laikā, jo mitro materiālu turošais statīvs ir iekārtas svaros (5). Gaisa mitrumu un temperatūru var mērīt atbilstošo sensoru ieviejojot pozīcijā 4 vai 7. Pozīcijā 8 atrodas gaisa plūsmas mērītājs (anemometrs).

5.



5.4. att. Eksperimentālās konvektīvās žāvētavas shēma: 1 – ventilators; 2 – sildelements; 3 – vadības panelis; 4 – temperatūras un mitruma sensors; 5 – digitālie svāri; 6 – žāvēšanas kamera; 7 – sensora pieslēgvietā; 8 – anemometrs.



5.5. att. Vadības panelis.

5.8. Darba gaita

1. Ieslēdz iekārtas galveno slēdzi.
2. Nosaka materiāla masu.
3. Nospiež pogu *TARE*, līdz svaru displejā parādās nulle.
4. Izņem materiālu no žāvētavas un ieliek ūdenī mitrināties.
5. Ieslēdz ventilatoru un ieregulē uzdoto režīmu.
6. Nolasa gaisa parametrus, darbu uzsākot.
7. Ieslēdz sildītāju un ieregulē uzdoto režīmu.
8. Sagaida stacionāru režīmu.
9. Nolasa gaisa parametrus sasilušai iekārtai.
10. Samitrināto materiālu ievieto iekārtā, piedomājot par materiāla izvietojumu!
11. Nolasa un pieraksta mērījumus ik pēc 60 s vai pēc pasniedzēja norādījumiem.
12. Materiālu žāvē, līdz tā masa praktiski nemainās (max. 40 min).
13. Iekārtu izslēdz, vispirms izslēdzot sildītāju un pēc 5 min ventilatoru.
14. Izslēdz iekārtas galveno slēdzi un sakārto darba vietu.

5.

5.9. Kontroljautājumi

- ♦ Kas ir konvekcija?
- ♦ Kāda tipa plūsma ir laboratorijas iekārtā attiecībā pret žāvējamo materiālu?
- ♦ Nosauciet jums zināmos žāvētavu veidus pēc to siltuma pārvades veida.
- ♦ Kāda veida žāvētavu jūs izmantotu: birstošam, viengabala, plāksņveida, auduma materiālam.
- ♦ Kādi ir žūšanas kinētiku ietekmējošie faktori?
- ♦ Ar ko atšķiras relatīvais un absolūtais mitrums?

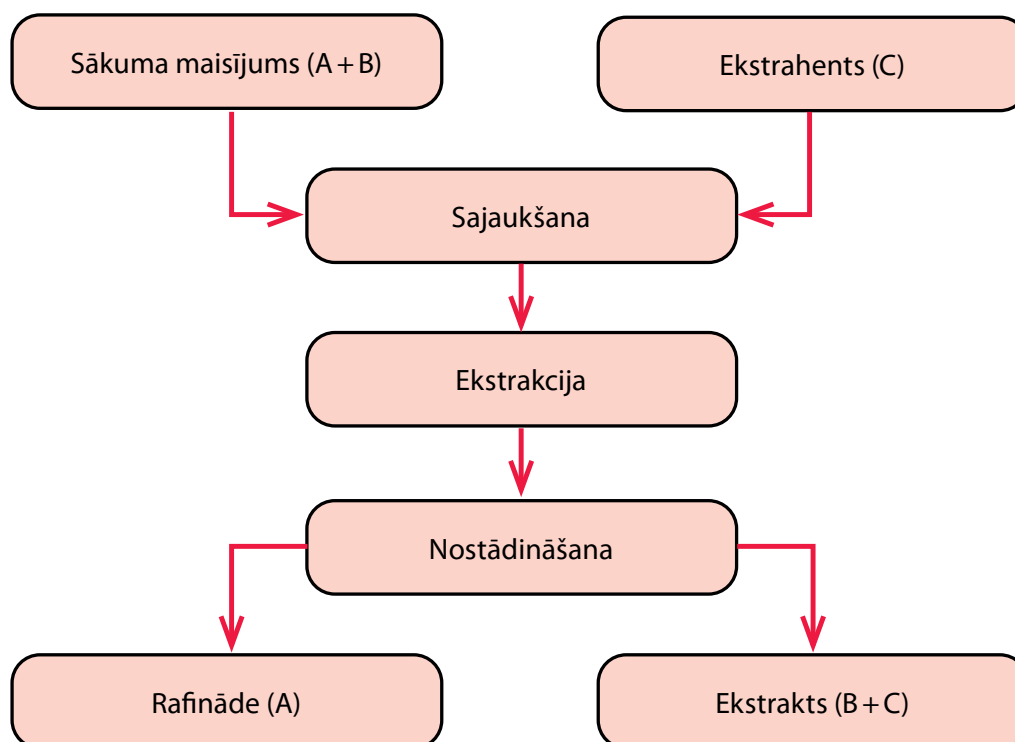
6. ŠĶĪDUMA EKSTRAKCIJA

6.1. Teorētiskais pamatojums

Ekstrakcija ir viena vai vairāku komponentu izdalīšana no šķīduma, izmantojot selektīvu šķīdinātāju – ekstrahentu.

Ekstrakcijas procesa pamatā ir šķīdumā esošo vielu dažāda šķīdība ekstrahentā. Šķīdumu ekstrakcijas rezultātā iegūst ekstraktu un rafinādi (sākuma šķīdums bez ekstrahētā komponenta). Par ekstraktu sauc ekstrakcijas rezultātā iegūtu izvilkumu, ja šķīdinātājs ir ūdens. Ja kā šķīdinātāju izmanto spirtu, iegūto izvilkumu sauc par tinktūru.

Ekstrakcijas process sastāv no vairākām stadijām (6.1. att.):



6.1.att. Vienkāršās ekstrakcijas shēma.

- 1) Sākuma maisījuma A + B sajaukšana ar ekstrahentu C;
- 2) Ekstrakcijas process;
- 3) Iegūtā ekstrakta B + C atdalīšana no rafinādes A.

Tālāk seko, ja tas ir nepieciešams, ekstrahētā komponenta B atdalīšana no ekstrakta B + C, to atdzesējot, rektificējot vai kā citādi.

Šķīduma ekstrakcijas procesu plaši izmanto ķīmiskajā, naftas, farmaceitiskajā un pārtikas rūpniecībā. Ekstrakcija ir viena no pamatmetodēm, lai sadalī-

tu homogēnus šķidrums maisījumus, kuru komponentu viršanas temperatūra ir ļoti tuva vai vienāda. Ekstrakciju var izmantot termiski nestabilu šķidrums maisījumu sadalīšanai, gadījumos, kad nav pieļaujama to karsēšana, līdz viršanas temperatūrai.

6.2. Fāžu līdzsvars

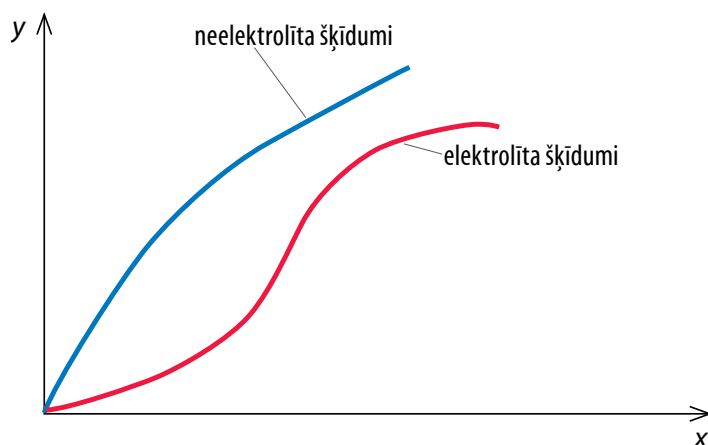
Līdzsvars ekstrakcijas procesos pakļaujas tā sauktajam sadalījuma likumam. Ja vielu A + B šķīdumam pievieno šķīdinātāju C, kas ar A sajaucas un neveido šķīdumu, komponents B difūzijas rezultātā pārvietojas uz šķīdinātāju. Process turpinās, līdz iestājas attiecīgajai temperatūrai atbilstošs līdzsvars starp vielas B koncentrāciju iegūtajā ekstraktā C_E un rafinādē C_R .

Pēc Gībsa fāžu līdzsvara likuma atdalāmās vielas līdzsvara koncentrāciju attiecība starp fāzēm noteiktā temperatūrā ir konstants lielums K_B un to sauc par sadalījuma koeficientu (6.1.):

$$K_B = \frac{C_E^B}{C_R^B}, \quad (6.1.)$$

kur C_E^B un C_R^B – atdalāmās vielas līdzsvara koncentrācija ekstraktā un rafinādē.

Ekstrakcijas procesi galvenokārt notiek pastāvīgā temperatūrā. Tāpēc līdzsvara sistēmu, kas sastāv no diviem šķīdinātājiem un aktīvā komponenta, ērti attēlot līdzsvara izotermu veidā x - y^* koordinātās: x – komponenta koncentrācija izejas šķīdumā, $y^*(x)$ komponenta līdzsvara koncentrāciju ekstraktā (6.2. att.).

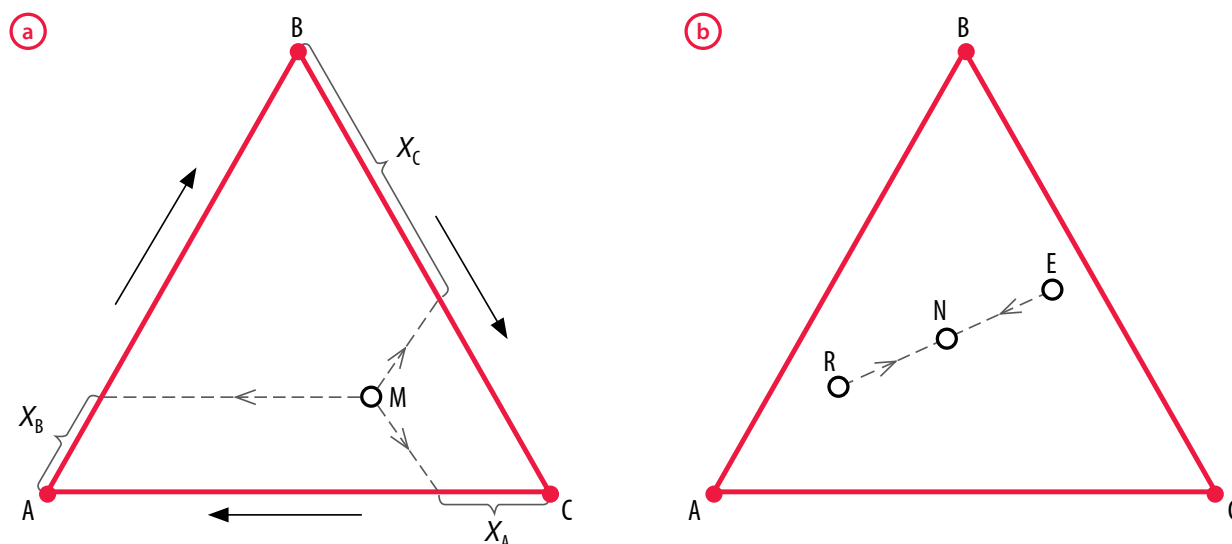


6.2. att. Ekstrakcijas līdzsvara izotermas piemēri.

Ja ir zināmas izotermas pie dažādas temperatūras, iespējams izvēlēties optimālo ekstrahēšanas temperatūru.

Ekstrakcijas procesos sistēmās šķidrums-šķidrums parasti ekstrahents C un sākuma maisījuma A + B šķīdinātājs daļēji savstarpēji šķīst. Līdz ar to abi

šķīdumi – ekstrakts un rafināde – ir piesātināti un sastāv no trim komponentiem. Šādas trīskomponentu sistēmas sastāvu attēlo vienādmalu trijstūra diagrammā (6.3. att.). Vienādmalu trijstūra diagrammas virsotnes atbilst tīriem komponentiem A, B un C. Trijstūra malas attēlo divkomponentu maisījumu A + B, A + C un B + C. Trīskomponentu maisījumu raksturo punkts trijstūra laukumā.



6.3. att. Trijstūra diagramma: a – koncentrācijas noteikšana; b – sviras likuma lietošana.

Ja trīskomponentu maisījumu A + B + C trijstūra diagrammā raksturo M punkts, tad šī maisījuma sastāva noteikšanai caur punktu M, velk trijstūra malām paralēlas līnijas (6.3. att. a). Lietojot trīstūra diagrammu, var noteikt ne tikai trīs komponentu maisījuma sastāvu, bet, izmantojot sviras likumu, arī fāžu patēriņu (masu). Ja samaisa divus trīskomponentu šķīdumus, kuru sastāvi trijstūra diagrammā atbilst punktiem R un E, iegūst maisījumu, kas uz taisnes RE atbilst punktam N. Punkta N atrašanās vieta uz taisnes ir atkarīga no sākumā ņemto šķīdumu G_E un G_R patēriņa (vai masas). Ievērojot masas nezūdamības likumu, iegūtā maisījuma masa:

$$G_N = G_E + G_R. \quad (6.2.)$$

Pēc sviras likuma

$$\frac{G_E}{G_R} = \frac{RN}{EN}, \quad (6.3.)$$

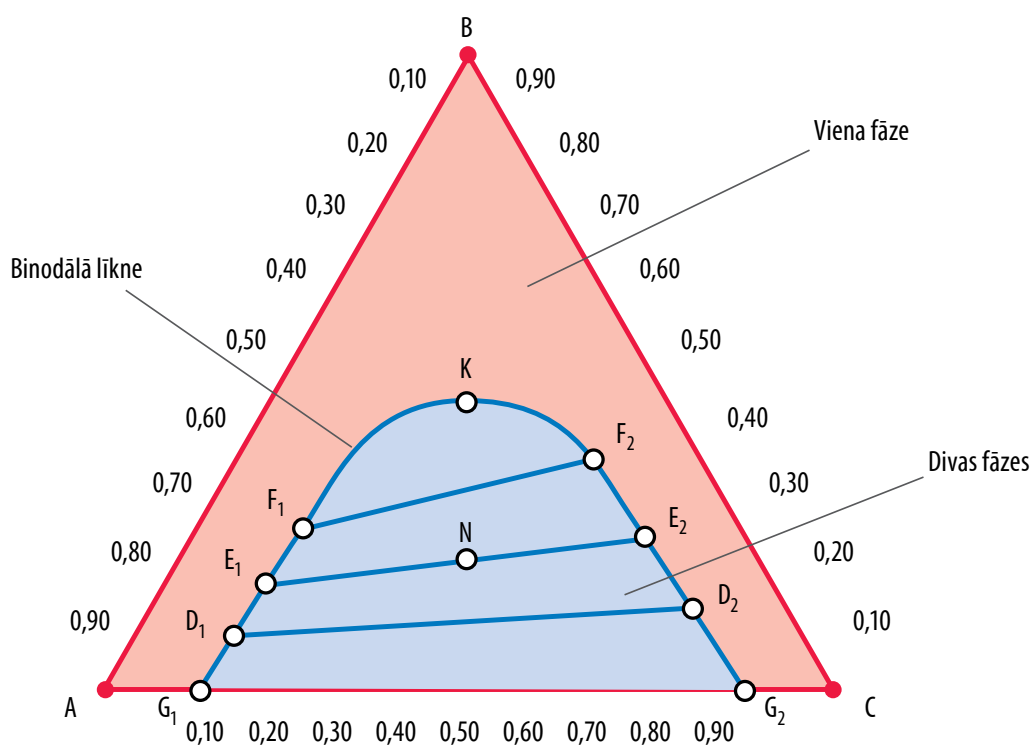
kur G_E un G_R – maisījumu E un R patēriņš (vai masa).

Vienādojums (6.3.) ļauj aprēķināt punkta N atrašanās vietu, ja zināms šķīdumu E un R daudzums. Ja maisījumu N sadalītu divās frakcijās R un E (pieņemam, nostādinot) un ir zināms frakciju sastāvs un maisījuma N daudzums,

iespējams noteikt iegūto frakciju daudzumu (masu):

$$\frac{G_E}{G_N} = \frac{RN}{RE}, \quad \frac{G_R}{G_N} = \frac{EN}{RE}. \quad (6.4.)$$

Ekstrakcijas procesa aprēķinam, tāpat kā jebkuram masas apmaiņas procesam, nepieciešams zināt līdzsvara koncentrācijas. Trīskomponentu sistēmai šķīdums-šķīdums tās var attēlot trijstūra diagrammā. 6.4. att. redzama raksturīgā trijstūra līdzsvara diagramma trīskomponentu A + B + C maisījumam.



6.4 att. Trīskomponentu maisījuma līdzsvara diagramma.

Viršotne A atbilst sākuma maisījuma šķīdinātājam, kas nešķīst ekstrahētā, viršotne B – ekstrahējamam komponentam un viršotne C – ekstrahētā. Jebkurš šķīdinātāju A un C maisījums nogriežņa G_1G_2 robežās noslāņosies divos viendabīgos divkomponentu piesātinātos šķīdumos G_1 (piesātināts C šķīdums šķīdinātājā A) un G_2 (piesātināts A šķīdums šķīdinātājā C). Ja pievieno trešo komponentu B, iegūst trīskāršu maisījumu, kas noslāņosies divos līdzsvarā esošos šķīdumos ar sastāvu D_1 un D_2 . Taisne D_1D_2 ir tā sauktā līdzsvara horda, kas norāda līdzsvarā esošu fāžu sastāvu. Ja līdzsvarā esošām fāzēm, kas atbilst stāvoklim D_1D_2 pievienotu papildu komponentu B, tad līdzsvarā esošais fāžu sastāvs būtu izsakāms ar citu līdzsvara hordu (E_1E_2 , F_1F_2 utt.). Turpinot palielināt komponenta B daudzumu maisījumā, komponenta A un C savstarpējā šķīdība pieaug, līdz veidojas homogēns vienfāzes šķīdums, ko raksturo punkts K. To sauc par kritisko punktu. Ja savieno punktus $G_1D_1E_1F_1K$ utt. iegūst līdz-

Ja ekstrakcijas procesā fāzes praktiski nešķīst viena otrā, procesa materiālo bilanci var aprakstīt ar šādu vienādojumu:

$$G_F + G_C = G_R + G_E, \quad (6.5.)$$

kur G_F un G_R – sākuma šķīduma un iegūtās rafinādes daudzums, kg;

G_C , G_E – ekstrahenta un iegūtā ekstrakta daudzums, kg.

Vienādojumu (6.5.) var izmantot arī nepārtrauktiem ekstrakcijas procesiem, ja attiecīgos lielumus G_F , G_C , G_R , G_E izsaka patēriņa vienībās, kg/s.

Vienādojumu (6.5.) var pārrakstīt šādā veidā:

$$G_F + G_C = M = G_R + G_E. \quad (6.6.)$$

No diagrammas pēc sviras likuma

$$\frac{G_C}{G_F} = \frac{FM}{CM}, \quad (6.7.)$$

var atrast ekstrakcijas procesam nepieciešamo ekstrahenta daudzumu:

$$G_C = G_F \frac{FM}{CM} \quad (6.8.)$$

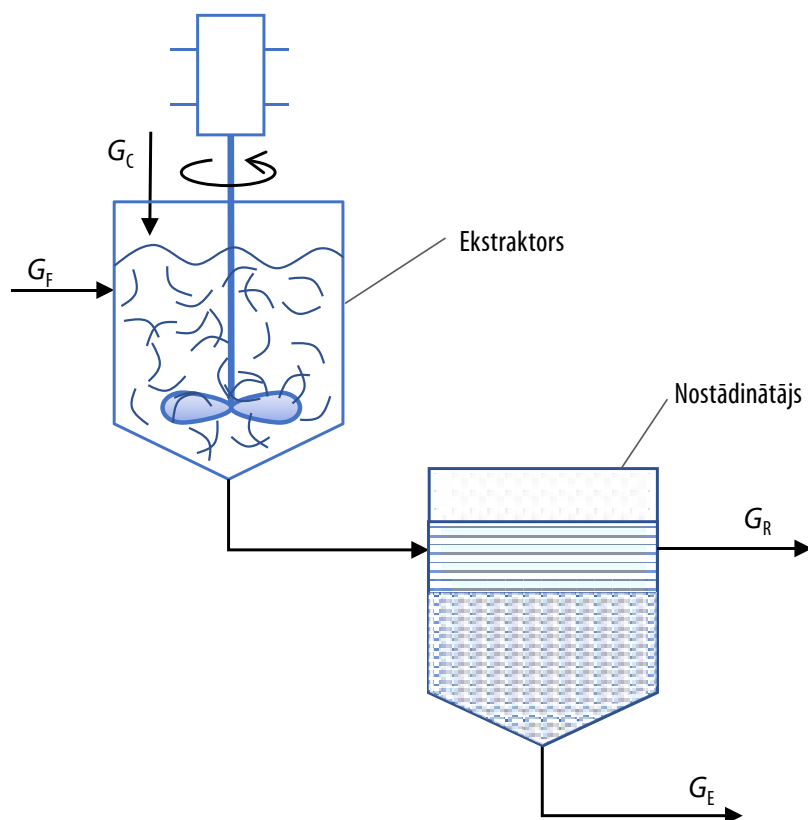
vai attiecību starp iegūtā ekstrakta un rafinādes daudzumu

$$\frac{G_R}{G_E} = \frac{EM}{MR}. \quad (6.9.)$$

6.4. Ekstrakcijas metodes

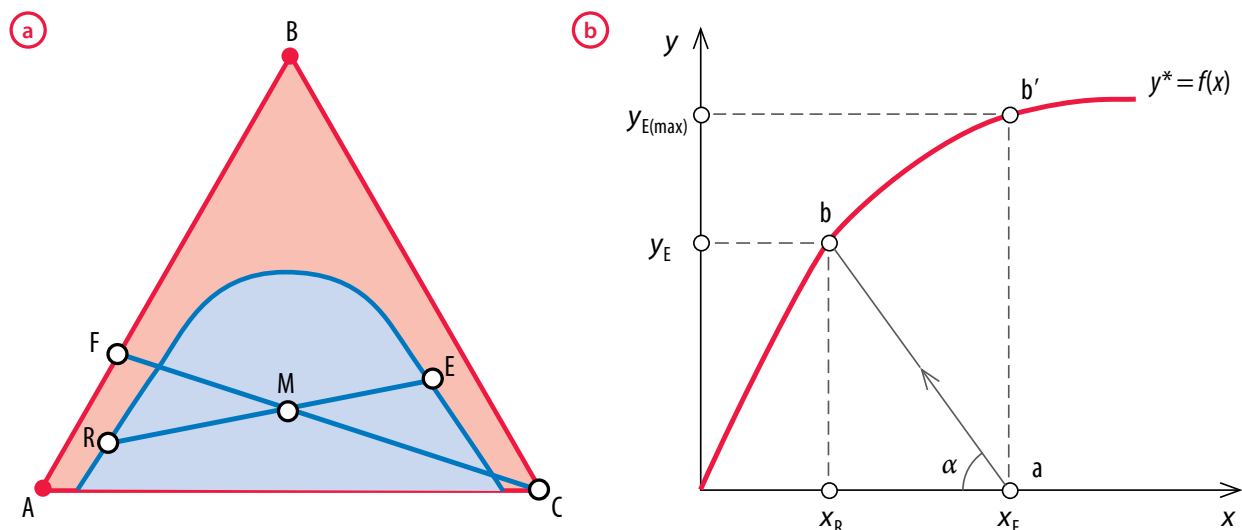
Atkarībā no aktīvās vielas izvilkuma pakāpes no izejas šķīduma, prasības, kas uzstādītas ekstraktam un rafinādei, ir iespējami dažādi šķīduma ekstrakcijas realizācijas veidi. Taču jebkura ekstrakcija noteikti iekļauj divas stadijas: sākuma šķīduma sajaukšana ar ekstrahentu un iegūtā maisījuma sadalīšana ekstraktā un rafinādē. Ķīmijas tehnoloģijā galvenokārt izmanto šādus ekstrakcijas veidus: vienpakāpes ekstrakcija, vairākpakāpju ekstrakcija ar ekstrahenta kustību pretplūsmā vai šķērsplūsmā un nepārtrauktā pretplūsmas ekstrakcija.

Attēlā (6.6. att.) redzama vienpakāpes ekstrakcijas shēma.



6.6. att. Vienpakāpes ekstrakcijas shēma.

Ekstraktorā 1 ievada sākuma maisījumu G_F un ekstrahentu G_C . Abus šķīdumus intensīvi maisa līdz līdzsvara sasniegšanai, tālāk maisījumu pārvieto nostādinātājā, kurā atdala iegūto ekstraktu G_E no rafinādes G_R .

6.7. att. Vienpakāpes ekstrakcijas attēlojums: (a) trijstūra diagrammā; (b) y^* , y - x koordinātēs.

Vienkāršo ekstrakcijas procesu var attēlot trijstūra diagrammā (6.7. att. a). Sajaucot sākuma šķīdumu F ar ekstrahentu C , izveidojas trīskāršs maisījums, ko raksturo punkts M . Pēc nostādināšanas veidojas divas līdzsvarā esošas

fāzes – ekstrakts un rafināde, kuru sastāvu raksturo punkti E un R, kas atrodas līdzsvara hordas ER galos, kas iet caur punktu M.

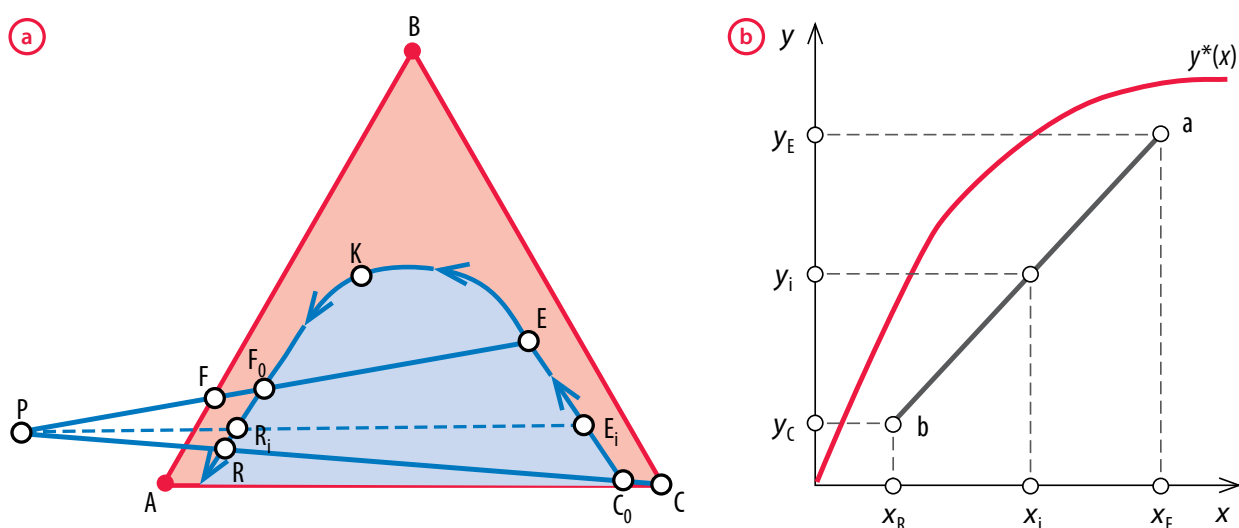
Mainot sākuma šķīduma un ekstrahenta attiecību, pēc sviras likuma var piemērlēt nepieciešamo ekstrakta un rafinādes sastāvu

$$\frac{G_F}{G_C} = \frac{CM}{FM}. \quad (6.10.)$$

Ja fāzes savstarpēji praktiski nešķīst, vienkāršās ekstrakcijas procesu var attēlot y - x diagrammā kā taisni ab, kuras slīpuma leņķis α ir atkarīgs no sākuma šķīduma G_F un ekstrahenta G_C attiecības. Mainot šo attiecību, var noteikt dažādus ekstrakta un rafinādes sastāvus. Ekstrakta maksimālo piesātināšanos ar aktīvo komponentu nosaka punkts b' , kam atbilst $y_{E(\max)}$.

Ekstrakcijas efektivitāti var būtiski palielināt, ja to veic daudzkārt vai nepārtrauktā pretplūsmas režīmā. Pēdējā metode parasti tiek īstenota kolonnas tipa aparātos ar pildījumu. Sākuma maisījums nepārtraukti tek no augšas uz leju, aktīvais komponents pāriet ekstrahentā, kas pretplūsmā virzās kolonnā no apakšas uz augšu.

Nepārtrauktas pretplūsmas ekstrakcijas procesu var attēlot ar trijstūra diagrammu (6.8. att. a).



6.8. att. Nepārtrauktas pretplūsmas ekstrakcijas procesa trijstūra (a) un y - x diagramma (b).

Zinot aktīvā komponenta koncentrāciju sākuma šķīdumā un ekstrahentā (punkti F un C) un uzdotās sasniedzamās koncentrācijas ekstraktā un rafinādē (punkti E un R uz binodālās līknes), nogriežņus EF un CR turpina līdz tie krustojas darba polā P. Šķīdumu līdzsvara sastāvs mainās, ekstrakcijas procesā virzoties pa binodālās līknes zariem: rafinādē no F_0 līdz R, ekstraktā – no C_0 līdz punktam E. Aktīvā komponenta koncentrāciju brīvi izvēlētā kolonnas

ekstraktora augstumā nosaka punktus E_i un R_i , kas atrodas uz taisnes, vilktas caur darba polu P.

Līdzīgi kā iepriekšējā gadījumā, ja fāzes praktiski nešķīst viena otrā, nepārtrauktas pretplūsmas ekstrakcijas procesu y - x diagrammā var attēlot kā līniju ab (6.8. att. b). Katrs punkts uz šīs līnijas raksturo abu fāžu darba koncentrāciju jebkurā kolonnas tipa aparāta šķērsgriezumā, piemēram x_i un y_i .

6.5. Darba uzdevumi

- ♦ Sadalīt divu komponentu sistēmu, ekstrakciju veicot periodiskas darbības režīmā.
- ♦ Sadalīt divu komponentu sistēmu, ekstrakciju veicot nepārtrauktas darbības režīmā.
- ♦ Pēc ekstrakcijas veikt šķīdinātāja (ekstrahenta) reģenerāciju, to pārdestilējot.

6.

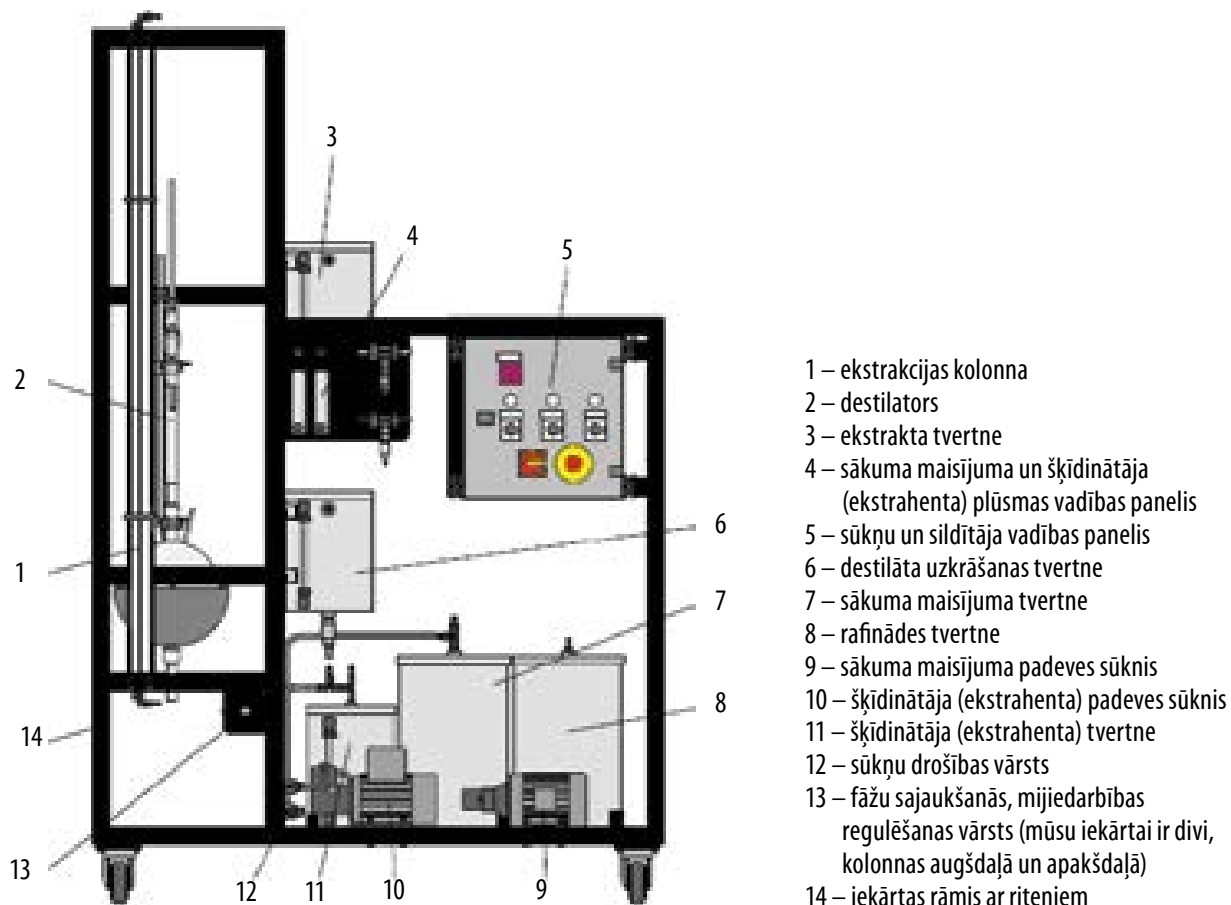
6.6. Iekārtas apraksts

Ekstrakcijas iekārta (6.9. att.) veidota tā, lai galvenās sastāvdaļas būtu labi pārredzamas, ar ērtu piekļuvi. Ekstrakcijas kolonna (1) ir nostiprināta metāla rāmī (14). Tā veidota no 50 mm resnas stikla (*Duran*[™] stikla) caurules, kura pildīta ar Rašīga gredzeniem. Sākuma maisījums no tvertnes (7) ar sūkni (9) tiek sūknēts ekstrakcijas kolonnas (1) apakšdaļā, savukārt šķīdinātājs (ekstrahents) no tvertnes (11) ar sūkni (10) tiek pievadīts kolonnas (1) augšdaļā, tādējādi ekstrakcijas process tiek organizēts pretplūsmā. Tā kā sākuma maisījums un šķīdinātājs (ekstrahents) nešķīst viens otrā, tad ekstrakcijas kolonnā veidojas fāžu saskares robežvirsmas, uz kuras notiek ekstrakcijas process. Sākuma maisījuma un šķīdinātāja (ekstrahenta) sajaukšanās intensitāti regulē ar vārstu (13), savukārt komponentu plūsmas parametrus iestata vadības panelī (4).

Ekstrakcijas iekārta ir aprīkota ar destilatoru (2), lai no iegūtā ekstrakta varētu atdalīt šķīdinātāju (ekstrahentu). Destilators (6.10. att.) sastāv no 5 L apaļkolbas (1), kura aprīkota ar *Hempel* tipa pildīto kolonnu (2) (pildīta ar Rašīga gredzeniem), kura savukārt savienota ar Libīga dzesinātāju (6), izmantojot Virca pāreju (3). Apaļkolbas sildīšanai izmanto grozveida elektrisko sildītāju (4), kura sildīšanas jaudu kontrolē ar proporcionālās darbības integrālo (PID) regulatoru (6.11. att. 2). Temperatūras datus PID regulators iegūst no temperatūras sensora PT100, kas novietots apaļkolbas apakšdaļā. Savukārt šķīdinātāja (ekstrahenta) tvaiku temperatūru var nolasīt no destilatora augšdaļā ievietotā termometra (5). Destilatora kuba atlikumu, ekstrahēto komponentu, savāc,

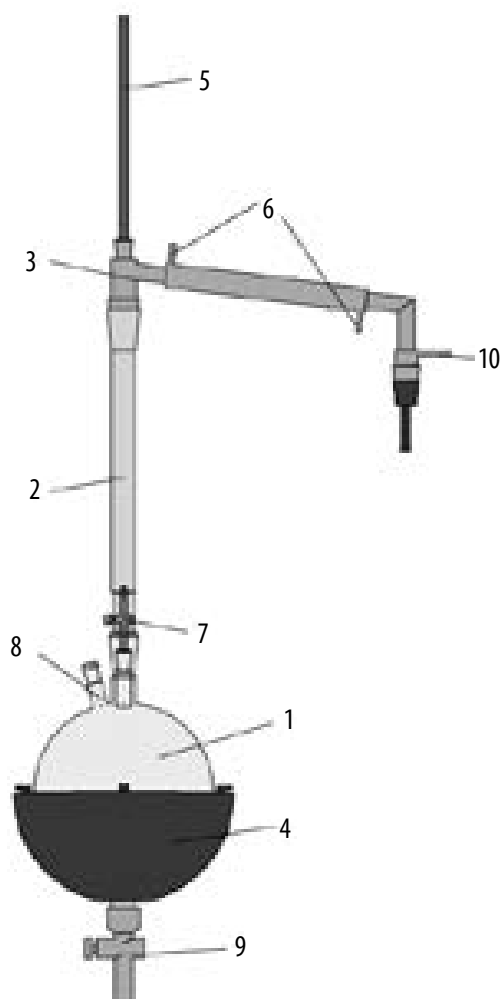
izmantojot apaļkolbas apakšdaļā esošo krānu (9). Savukārt apaļkolbas mazgāšanu veic, izmantojot krānu (8). Reģenerētais šķīdinātājs (ekstrahents) tiek uzkrāts destilāta tvertnē (6.9. att. 6).

Ja šķīdinātāja (ekstrahenta) reģenerācija veicama pie pazemināta spiediena, tad izmanto ūdens strūkļas vakuumsūkni, kas ar cauruli pie destilatora tiek pievienots pie atzara (10).



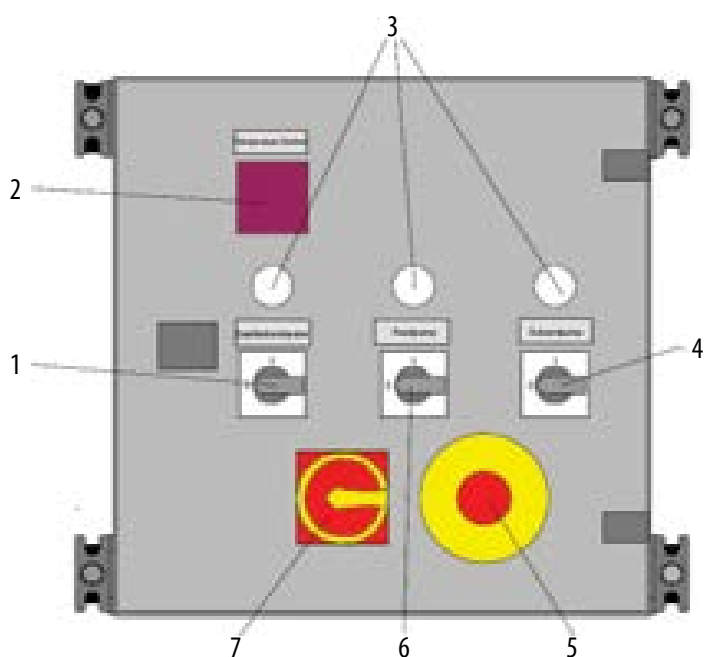
6.9. att. Ekstrakcijas iekārtas uzbūve.

6.



- 1 – apaļkolba
- 2 – kolonna
- 3 – Virca pāreja
- 4 – elektriskais sildītājs
- 5 – termometrs
- 6 – Libiga dzesētājs
- 7 – stopkrāns
- 8 – kolbas mazgāšanas krāns
- 9 – apakšējais krāns
- 10 – vakuumsūkņa pievienošanas atzars

6.10. att. Destilatora uzbūve.



- 1 – destilatora sildītāja ieslēgšanas/izslēgšanas slēdzis
- 2 – destilatora sildītāja PID regulators
- 3 – procesu indikatorspuldze
- 4 – šķīdinātāja (ekstrahenta) sūkņa ieslēgšanas/izslēgšanas slēdzis
- 5 – ārkārtas izslēgšanas slēdzis
- 6 – sākuma maisījuma sūkņa ieslēgšanas/izslēgšanas slēdzis
- 7 – galvenais slēdzis

6.11. att. Ekstrakcijas iekārtas vadības panelis.

Šķidrumu plūsmas regulēšanai izmanto sākuma maisījuma un šķīdinātāja (ekstrahenta) plūsmas vadības paneli (6.12. att.).



6.12. att. Sākuma maisījuma un šķīdinātāja (ekstrahenta) plūsmas vadības panelis.

Plūsmas vadības paneļa augšdaļā un kreisajos sānos izvietotas pieslēgvietas, lai maršrutētu šķidrumu plūsmu uz ekstrakcijas kolonnu. Pieslēgvietas un caurules marķētas ar krāsām, līdz ar to, kombinējot krāsas, panāk vēlamo šķidruma ievadi ekstrakcijas kolonnas augšdaļā vai apakšdaļā. Krāsu kombinācijas apkopotas tabulā (6.1. tabula). Slēguma variants 1 izmantojams, ja šķīdinātāja (ekstrahenta) blīvums ir lielāks nekā sākuma maisījumam. Savukārt slēguma variantu 2 izmanto, ja sākuma maisījuma blīvums ir lielāks par šķīdinātāja (ekstrahenta) blīvumu. Šāda iekārtas modificēšana ļauj to izmantot šķidrumiem ar dažādiem fizikālajiem parametriem.

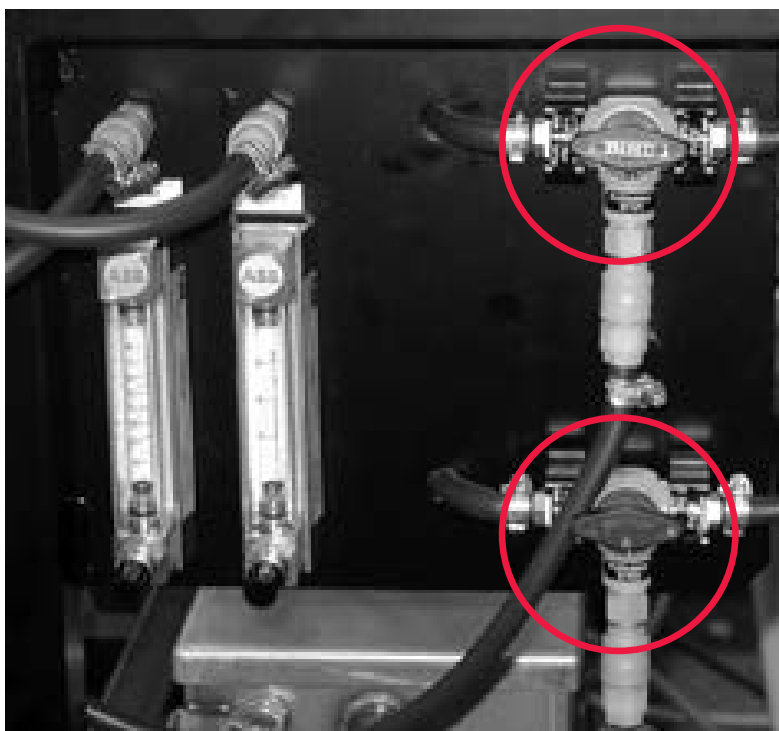
6.1. tabula

Plūsmas vadības paneļa iestatījumi

Slēguma variants	Plūsmas tilpuma mēritājs/sākuma maisījumam	Plūsmas tilpuma mēritājs/šķīdinātājam (ekstrahentam)	Trīsceļu krāns/sākuma maisījumam	Trīsceļu krāns/šķīdinātājam (ekstrahentam)
1	Sarkans/Sarkans	Zils/Zils	Dzeltens/Dzeltens	Zaļš/Zaļš
2	Sarkans/Zils	Zils/Sarkans	Dzeltens/Zaļš	Zaļš/Dzeltens

Kontroli veic, izmantojot divus plūsmas tilpuma mēritājus un divus trīsceļu krānus. Ar plūsmas tilpuma mēritājiem var precīzi noregulēt gan sākuma maisījuma, gan šķīdinātāja (ekstrahenta) plūsmu. Savukārt trīsceļu krāns

(6.13. att.) ļauj iekārtu ekspluatēt divos principiālos tehnoloģiskajos režīmos. Attiecīgi iekārtu var izmantot kā nepārtrauktas darbības vai kā periodiskas darbības ekstraktoru. Periodiskas darbības režīms būs tad, ja trīsceļu krāni nodrošinās šķidrumu plūsmu atpakaļ izejas tvertnēs. Trīsceļu krānus (6.13. att.) pārslēdz tā, lai izplūstošie šķidrumi nonāktu rafinādes un ekstrakta tvertnēs.



6.13. att. Trīsceļu krāni uz ekstrakcijas iekārtas.

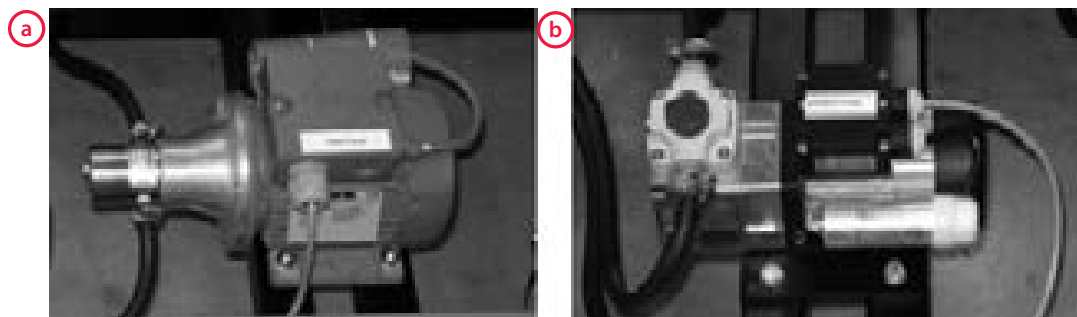


6.14. att. Sildīšanas zonu regulators.

Atkarībā no destilatora apaļkolbas aizpildījuma jāizvēlas atbilstošs sildīšanas groza darba režīms, jauda. Darba režīmi apzīmēti ar piktogrammām uz regulatora, kas izvietots blakus destilatora sildītājam (6.14. att.).

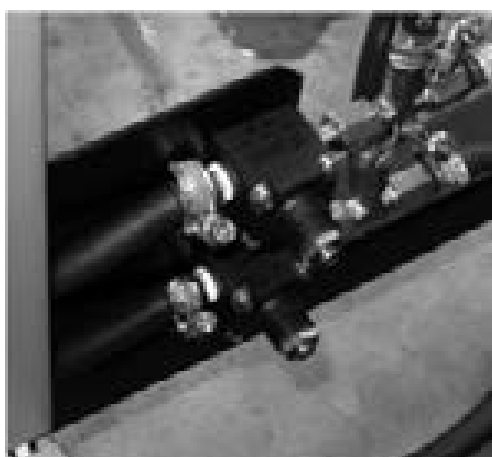
Šķidrumu padevei iekārtā izmanto divu tipu sūkņus. Sākuma maisījumu uz ekstrakcijas kolonnu sūknē ar zobratu sūkni, kuru darbina maiņstrāvas vienfāzes motors (6.15. att. a). Motora apgriezienu skaits nav regulējams, tas ir konstants – 3000 apgr./min. Šis sūknis paredzēts mazviskozu šķidrumu sūknēšanai. Šķīdinātāju (ekstrahentu) uz ekstrakcijas kolonnu sūknē ar membrānas sūkni, kuru darbina maiņstrāvas vienfāzes motors (6.15. att. b). Sūkņa sānos izvietots pārslēgs, kas ļauj iestatīt sūkņa virzuļa gājienu. Izmainot virzuļa gājienu, var panākt pārsūknētā šķidruma daudzuma izmaiņas, motoram veicot vienu apgriezienu.

6.

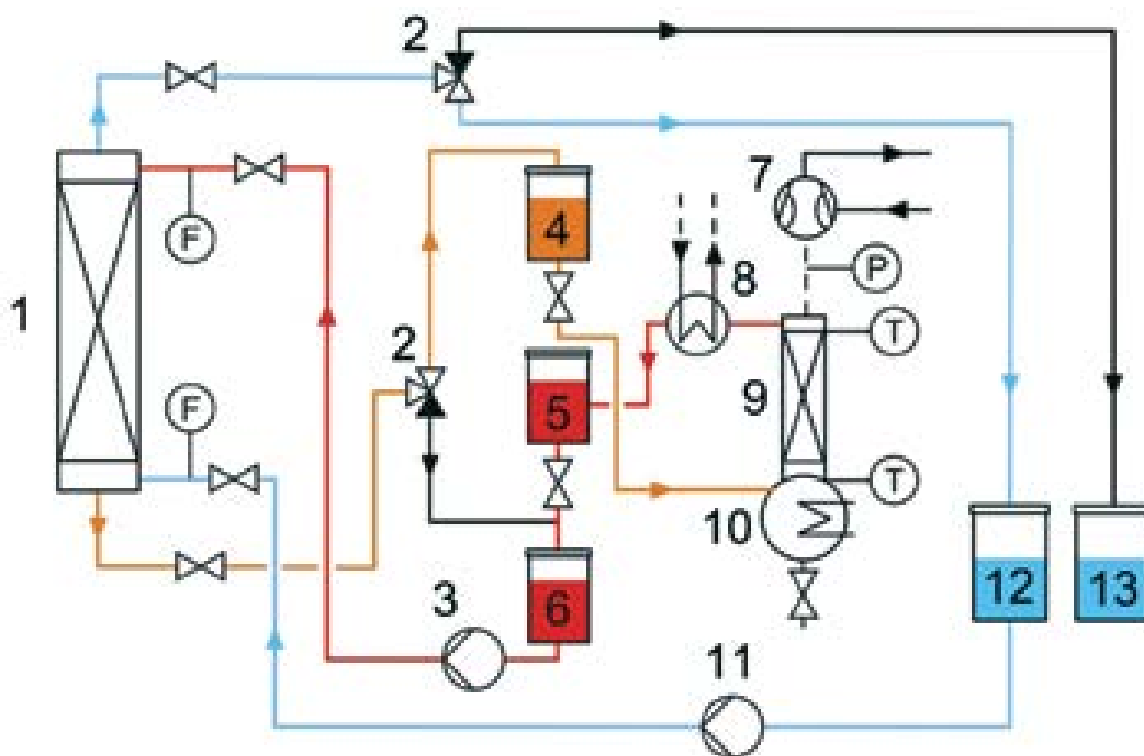


6.15. att. Ekstrakcijas iekārtas šķidrumu padeves sūkņi:
(a) zobratu sūknis; (b) membrānas sūknis.

Tā kā iekārtā uzstādītie sūkņi cauruļvados rada virspiedienu, drošas darbības nodrošināšanai aiz katra sūkņa cauruļvada līnijā ir uzstādīti drošības vārsti (6.16. att.). Drošības vārstu atvēršanās spiedienu noregulē atkarībā no izmantoto šķidrumu fizikālajām īpašībām. Jāņem vērā, ka, izmainot viena vārsta regulējumu, jāmaina regulējums arī otram vārstam, abu vārstu atvēršanās spiedienam jābūt vienādam.



6.16. att. Drošības vārsti.



6.17. att. Ekstrakcijas iekārtas uzbūve: 1 – ekstrakcijas kolonna; 2 – trīscelšu vārsts; 3 – šķīdinātāja (ekstrahenta) sūknis; 4 – ekstrakta tvertne; 5 – reģenerētā šķīdinātāja (ekstrahenta) tvertne; 6 – šķīdinātāja (ekstrahenta) tvertne; 7 – ūdens strūklas sūknis; 8 – Lībiga dzesētājs ar ūdens pieslēgumu dzesēšanai; 9 – destilācijas kolonna; 10 – destilatora apakšējā tvertne; 11 – sākuma maisījuma padeves sūknis; 12 – sākuma maisījuma tvertne; 13 – rafinādes tvertne; f/F – plūsmas ātrums; p – spiediens; T – temperatūra.

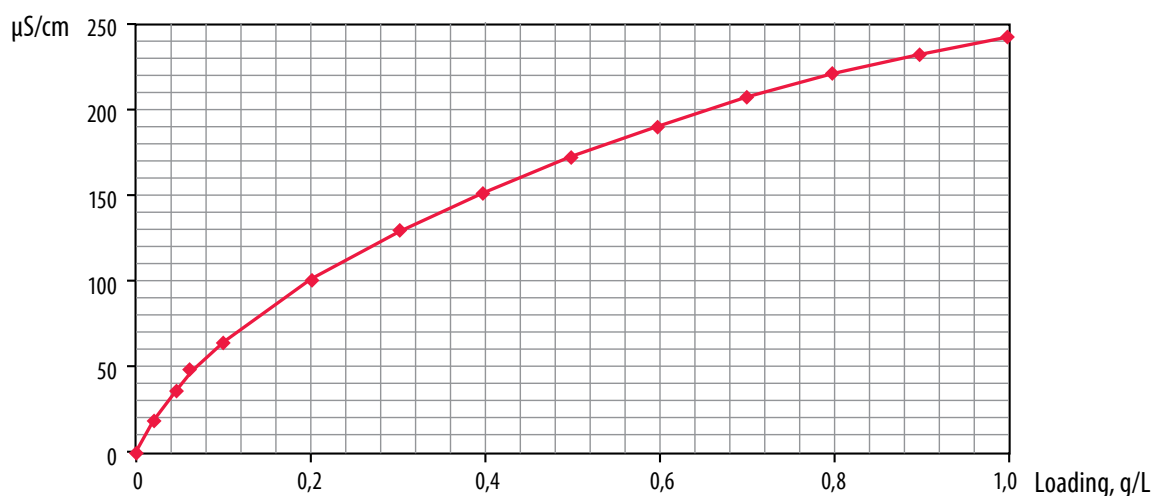
- ◆ Ekstrakcijas kolonnu ar šķīdumiem uzpilda tikai ar sūkņu palīdzību. Sākuma maisījumu sagatavo ārpus iekārtas un tikai tad to ielej sākuma maisījuma tvertnē. Ja nepieciešama šķīdinātāja (ekstrahenta) sagatavošana, arī to dara ārpus iekārtas.
- ◆ Aizver visus regulēšanas vārstus un, izmantojot sākuma maisījuma padeves sūknī, uzpilda ekstrakcijas kolonnu. Ļauj sākuma maisījumam nepārtraukti plūst iekārtā.
- ◆ Ieslēdz šķīdinātāja (ekstrahenta) sūkni un ekstrakcijas kolonnai pievada ekstrahentu.
- ◆ Atver regulēšanas vārstus, kad ekstrakcijas kolonnā var skaidri saredzēt fāžu saskares vietu. Regulējot šķīduma padeves un šķīdinātāja plūsmu, izmanto tilpuma daudzuma mērītājus un regulēšanas vārstu, saglabājot fāžu saskares vietu nemainīgā augstumā.
- ◆ Darbinot iekārtu periodiskā režīmā, nodrošina sākuma maisījuma un šķīdinātāja (ekstrahenta) cirkulāciju sistēmā. Regulāri ņem paraugus sastāva

analīzei. Kad vēlamā sadalīšanas pakāpe ir sasniegta, šķīdumu plūsmas novada uztvērēja tvertnē, attiecīgi sākuma maisījuma plūsmu novirza uz rafinādes tvertni, bet šķīdinātāja (ekstrahenta) plūsmu – uz ekstrakta tvertni.

- ♦ Darbinot iekārtu nepārtrauktas darbības režīmā, sākuma maisījums uzreiz pēc ekstrakcijas kolonnas tiek novirzīts uz rafinādes tvertni, bet šķīdinātājs (ekstrahents) – uz ekstrakta tvertni. Iekārtā nenotiek vairākkārtēja šķīdumu cirkulācija caur ekstrakcijas kolonnu.
- ♦ Ja sākuma maisījuma blīvums ir ievērojami mazāks nekā šķīdinātāja (ekstrahenta) blīvums, tad var gadīties, ka ekstrakcijas kolonnā esošā sākuma maisījuma augstums var būt nepietiekams ekstrakcijas procesu nodrošināšanai. Šajā gadījumā jāmaina šķīdumu plūsma – pretestība uz ekstrakcijas kolonnu, to dara, izmantojot fāžu sajaukšanās, mijiedarbības regulēšanas vārstu (6.9. att. 13).
- ♦ Lai iztukšotu iekārtu, sākuma maisījums no šķīduma padeves tvertnes jāpārsūkņē uz rafinādes tvertni. Šķīdumu no rafinādes tvertnes var notecināt, izmantojot krānu, kas izvietots tvertnes apakšdaļā. Šķīdinātājs (ekstrahents), kuram ir nepieciešama reģenerācija, no ekstrakcijas tvertnes jānotecina uz destilācijas trauku.
- ♦ Iztukšo ekstrakcijas kolonnu, atverot aizplūšanas vārstus, un ļauj šķīdumam notecēt piemērotā tvertnē. Sākuma maisījuma un šķīdinātāja (ekstrahenta) padeves sūkņus pēc eksperimenta darbina tik ilgi, kamēr cauruļvados acīmredzami parādās gaiss un plūsmas tilpuma mērītāji vairs nefunkcionē.
- ♦ Pēc iztukšošanas iekārta jāizmazgā vairākas reizes ar destilētu ūdeni.
- ♦ Šķīdinātāja (ekstrahenta) reģenerācijai ir jāzina tā viršanas temperatūra, kas tiek iestatīta PID regulatorā.
- ♦ Ja šķīdinātāja (ekstrahenta) reģenerācija veicama pazeminātā spiedienā, izmanto ūdens strūklu vakuumsūkni, kuru pievieno destilatoram.

6.7. Darba gaita

Laboratorijas darbā ar destilētu ūdeni jāveic benzoscābes izdalīšana no alifātisko ogļūdeņražu šķīduma. Šajā darbā benzoscābes šķīdums alifātiskajos ogļūdeņražos ir sākuma maisījums, bet destilēts ūdens – šķīdinātājs (ekstrahents). Benzoscābes koncentrāciju šķīdinātājā (ekstrahentā) nosaka, mērot šķīduma vadītspēju. Ūdens vadītspēja atkarībā no benzoscābes koncentrācijas apkopota 6.2. tabulā, savukārt konduktometra kalibrācijas grafiks attēlots 6.18. att.



6.18. att. Kalibrācijas grafiks.

6.

1. Iepazīstas ar iekārtu un uzzīmē tās shēmu.
2. Pārlicinās par iekārtas tīrību, ja nepieciešams, veic tās mazgāšanu.
3. Pagatavo sākuma maisījumu. Atbilstoša izmēra traukā ielej 25 L alifātiskā ogleņūdeņraža, piemēram, heptānu, un pievieno 60 g benzoscābes, izšķīdina to.
4. Sākuma maisījumu iepilda iekārtas sākuma maisījuma tvertnē.
5. Iekārtas šķīdinātāja (ekstrahenta) tvertni uzpilda ar destilētu ūdeni.
6. Atkarībā no darba uzdevuma varianta veic benzoscābes ekstrakciju atbilstošā iekārtas darba režīmā.
7. Ekstrakciju veic 1 h, atbilstoši darba uzdevumam fiksē šķīdinātāja (ekstrahenta) vadītspējas izmaiņas.
8. Pārtrauc ekstrakcijas procesu un iztukšo ekstrakcijas kolonnu, novirzot šķīdumus atbilstošās tvertnēs.
9. No ekstrakta tvertnes uzpilda destilatoru.
10. Uzsāk šķīdinātāja pārdestilēšanu – reģenerēšanu, kuru pārtrauc pēc 1 h. Fiksē šķīdinātāja (ekstrahenta) elektrovadītspējas izmaiņas.
11. Iztukšo visas tvertnes un destilatora apaļkolbu.

6.2. tabula

Elektrovadītspēja atkarībā no benzoscābes koncentrācijas

Elektrovadītspēja, μS/cm	0,0	8,0	20	42	55	64	101	124	149	169	184	202	215	230	243
Benzoscābes koncentrācija, g/l	0,0	0,01	0,02	0,05	0,07	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1

6.8. Kontroljautājumi

- ◆ Kas ir ekstrakcija, ekstrahents, ekstrakts, rafināde?
- ◆ Kas ir fāze un cik fāzes parasti veidojas standarta ekstrakcijas procesa beigās?
- ◆ Kādus jums zināmus ekstrakcijas veidus lieto ķīmijas tehnoloģijā?
- ◆ Kādās rūpniecības nozarēs izmanto šķīduma ekstrakcijas procesus? Piemēri.
- ◆ Kādos gadījumos rūpniecībā destilācijas vietā izmanto ekstrakciju?
- ◆ Kā var paaugstināt ekstrakcijas efektivitāti?
- ◆ Kas ir tinktūra?

7. GĀZU ABSORBCIJA

7.1. Teorētiskais pamatojums

Par absorbciju sauc gāzveida fāzē vai tvaikā esoša komponenta saistīšanu ar šķidru fāzi – absorbentu.

Gāzu saistīšana var notikt vai nu tai šķīstot absorbentā, vai arī ķīmiski reaģējot ar absorbentu. Pirmajā gadījumā procesu sauc par fizikālo absorbciju, otrā gadījumā – par hemosorbciju. Fizikālās absorbcijas procesi parasti ir selektīvi un atgriezeniski. Pēdējā gadījumā realizē desorbcijas procesu, t. i., saistītā komponenta izdalīšanu no šķīduma. Šo procesu lieto sorbenta reģenerēšanai vai arī saistītās vielas izdalīšanai tīrā veidā.

Šajā laboratorijā darbā tiks atdalīts gāzu maisījums no gaisa un CO₂, kā absorbentu izmantojot ūdeni.

7.

7.2. Līdzsvars absorbcijas procesos

Mijiedarbojoties gāzei ar šķidrumu, veidojas sistēma, kas sastāv no trīs komponentiem (aktīvā viela, inertā gāze un šķidrums) un divām fāzēm: šķidrās un gāzveida. Pamatojoties uz fāžu likumu, šādai sistēmai ir trīs brīvības pakāpes P :

$$P = K - F + 2 = 3 - 2 + 2 = 3. \quad (7.1.)$$

kur K – komponentu skaits (aktīvā viela, inertā gāze un šķidrums);

F – fāžu skaits (gāze un šķidrums).

Šajā gadījumā tā ir temperatūra, spiediens un aktīvās vielas koncentrācija gāzē vai šķīdumā. Turklāt saistītā komponenta koncentrācija otrajā fāzē nevar tikt brīvi izvēlēta, tā tiek noteikta ar šiem trīs izvēlētiem parametriem.

Ideālos šķīdumos, pastāvīgas temperatūras un spiediena apstākļos līdzsvaru nosaka Henri (*William Henry*) gāzu šķīdības likums: izšķīdinātās gāzes parciālais spiediens ir proporcionāls tās molu daļai šķīdumā:

$$p_A = E \cdot x_A^*, \quad (7.2.)$$

vai gāzes šķīdība pie dotās temperatūras šķīdumā ir proporcionāla tās parciālajam spiedienam virs šķidrums:

$$x_A^* = \frac{p_A}{E} \quad (\text{Pa}), \quad (7.3.)$$

kur E – Henri koeficients;

p_A – gāzes parciālais spiediens, Pa, kas ir līdzsvarā ar šķīdumu, kurā komponenta koncentrācija ir x_A , molu daļas;

x_A^* – gāzes līdzsvara koncentrācija šķīdumā, molu daļas, ja komponenta parciālais spiediens ir p_A , Pa.

Jo labāka ir gāzes šķīdība absorbentā, jo mazāks ir tā patēriņš.

Henri koeficients katrai konkrētai gāzei ir atkarīgs no absorbenta un procesa temperatūras un to var noteikt šādi:

$$\ln E = -\frac{q}{RT} + C, \quad (7.4.)$$

kur q – gāzes šķīšanas siltums, J/mol;

R – universālā gāzu konstante (8,314 J/(mol·K));

T – šķīdināšanas temperatūra, K;

C – konstante, kas ir atkarīga no gāzes un absorbenta.

No vienādojuma (7.4.) redzams, ka palielinot temperatūru, koeficienta E vērtība pieaug, bet gāzu šķīdība samazinās.

Ja sistēmas kopējais spiediens P un aktīvā komponenta koncentrācija gāzu maisījumā ir y_A , tās parciālais spiediens atbilstoši Daltona (*John Dalton*) likumam ir:

$$p_A = P \cdot y_A. \quad (7.5.)$$

Ņemot vērā vienādojumu (7.5.), iegūstam:

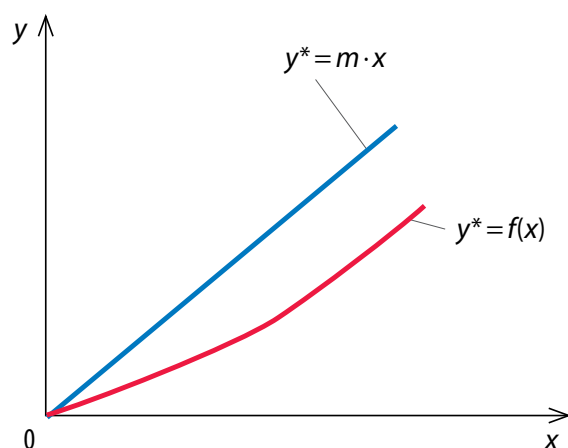
$$y_A^* = \left(\frac{E}{P}\right) \cdot x_A! \quad (7.6.)$$

Henri likumu var izteikt šādi:

$$y_A^* = m \cdot x_A, \quad (7.7.)$$

kur $m = E/P$ – fāžu līdzsvara konstante.

Vienādojums (7.7.) atspoguļo sakarību starp atdalāmā komponenta līdzsvara koncentrāciju šķīduma un gāzes fāzē. Ideālu šķīdumu un atšķaidītu šķīdumu gadījumā y - x koordinātās šī sakarība attēlojas kā taisne, kas sākas koordinātu sākumpunktā (7.1. att.). Šķīdumiem ar lielāku izšķīdušā aktīvā komponenta koncentrāciju līdzsvara sakarība attēlojas kā līkne, to konstruē, pamatojoties uz eksperimentāliem datiem.



7.1. att. Absorbcijas procesa līdzsvara sakarības.

Absorbcijas procesa aprēķinus un analīzi ērti veikt, izsakot aktīvā komponenta koncentrāciju relatīvās vienībās, piemēram, sorbenta relatīvā molārā koncentrācija kmol/kmol.

Šajā gadījumā aprēķinātās gāzveida un šķidrās fāzes plūsmas ir vienādas. Vienādojumā (7.7.) koncentrācijas y un x , kas ir izteiktas molu daļās, nomaina ar Y un X , kas izteiktas relatīvās molu daļās, ņemot vērā attiecības

$$Y = \frac{y}{1-y}; \quad X = \frac{x}{1-x}; \quad y = \frac{Y}{1+Y}; \quad x = \frac{X}{1+X}. \quad (7.8.)$$

Vienādojumu (7.7.) var pārrakstīt šādi:

$$Y = \frac{m \cdot X}{1 + (1-m) \cdot X}. \quad (7.9.)$$

Pie nelielas gāzes koncentrācijas var pieņemt, ka $(1-m)X \ll 1$, un vienādojums (7.9.) kļūst vienkāršāks:

$$Y = m \cdot X. \quad (7.10.)$$

Galvenie faktori, kas ietekmē gāzu šķīdību, t. i., absorbciju, ir spiediena paaugstināšana un temperatūras pazemināšana.

7.3. Absorbcijas procesa materiālā bilance

Masas apmaiņas aparāti sistēmās gāze-šķidrums galvenokārt ir vertikālas kolonnas tipa iekārtas, kurās augšdaļā pievada šķidro fāzi, kas smaguma spēka ietekmē tek uz leju, kolonnas apakšdaļā pievada gāzveida fāzi, kas pretplūsmā pārvietojas uz augšu (7.2. att.).

Pieņemsim, ka absorberī tiek padots G (kmol/s) gāzu maisījuma, ar absorbējamā komponenta koncentrāciju Y_s , pretplūsmā virzās šķidrās sorbents L (kmol/s), ar sākuma koncentrāciju X_s . Sorbcijas procesa rezultātā gāzes fāzē aktīvā komponenta koncentrācija samazinās līdz Y_B , no kolonnas izvadītās šķidrās fāzes koncentrācija ir X_B . Absorbcijas procesa materiālā bilance attiecībā uz aktīvo komponentu ir šāda:

$$GY_s + LX_s = GY_B + LY_B \quad (7.11.)$$

vai

$$G(Y_s - Y_B) = L(X_B - X_s). \quad (7.12.)$$

Parasti no materiālās bilances vienādojuma aprēķina kopējo absorbenta patēriņu:

$$L = \frac{G(Y_s - Y_B)}{(X_B - X_s)} \quad (7.13.)$$

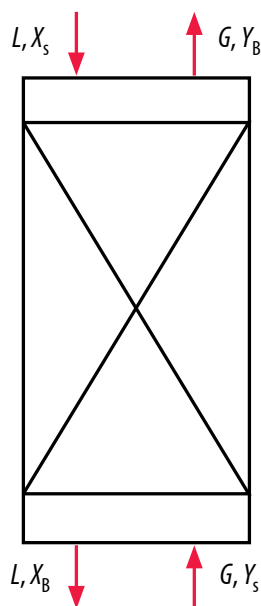
un tā īpatnējo patēriņu l (kmol/kmol inertās gāzes):

$$l = \frac{L}{G} = \frac{(Y_s - Y_B)}{(X_B - X_s)}. \quad (7.14.)$$

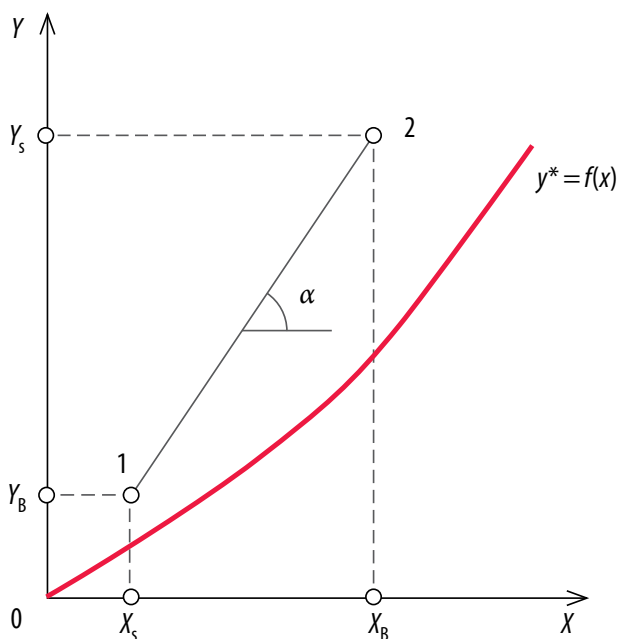
Vienādojumu (7.14.) var pārrakstīt šādi:

$$Y_s - Y_B = l(X_B - X_s). \quad (7.15.)$$

Šo vienādojumu sauc par absorbcijas procesa darba taisnes vienādojumu. Tas nosaka sakarību starp gāzes un šķidrās fāzes sastāvu jebkurā brīvi izvēlēta kolonnas šķērsgriezumā.



7.2. att. Pretplūsmas absorbcijas aparāta shēma.



7.3. att. Darba taisnes attēlojums līdzsvara diagrammā.

Kā redzams no vienādojuma (7.15.), Y - X koordinātās tas attēlojas kā taisne 1-2, kuru ierobežo aktīvā komponenta sākuma un beigu koncentrācija. Taisnes 1-2 slīpuma leņķa tangens $\text{tg } \alpha$ ir vienāds ar absorbenta īpatnējo patēriņu $l = L/G$ (kmol/kmol):

$$\text{tg } \alpha = \frac{L}{G}. \quad (7.16.)$$

Absorbenta īpatnējo patēriņu, kā izriet no (7.14.) vienādojuma, pie diferencētas gāzes sākuma Y_s un beigu Y_B koncentrācijas nosaka izvēlētā sorbenta

beigu koncentrācija X_B . Mainot izvēlēto X_B , vienlaikus mainīsies taisnes 1-2 slīpuma leņķis, līdz ar to procesa virzītājspēks un absorbera izmērs.

7.4. Darba uzdevumi

- ♦ Eksperimentāli noteikt CO_2 koncentrācijas izmaiņu laikā absorbcijas procesā.
- ♦ Novērtēt temperatūras ietekmi uz CO_2 koncentrāciju.
- ♦ Noteikt kopējo un īpatnējo absorbenta patēriņu.

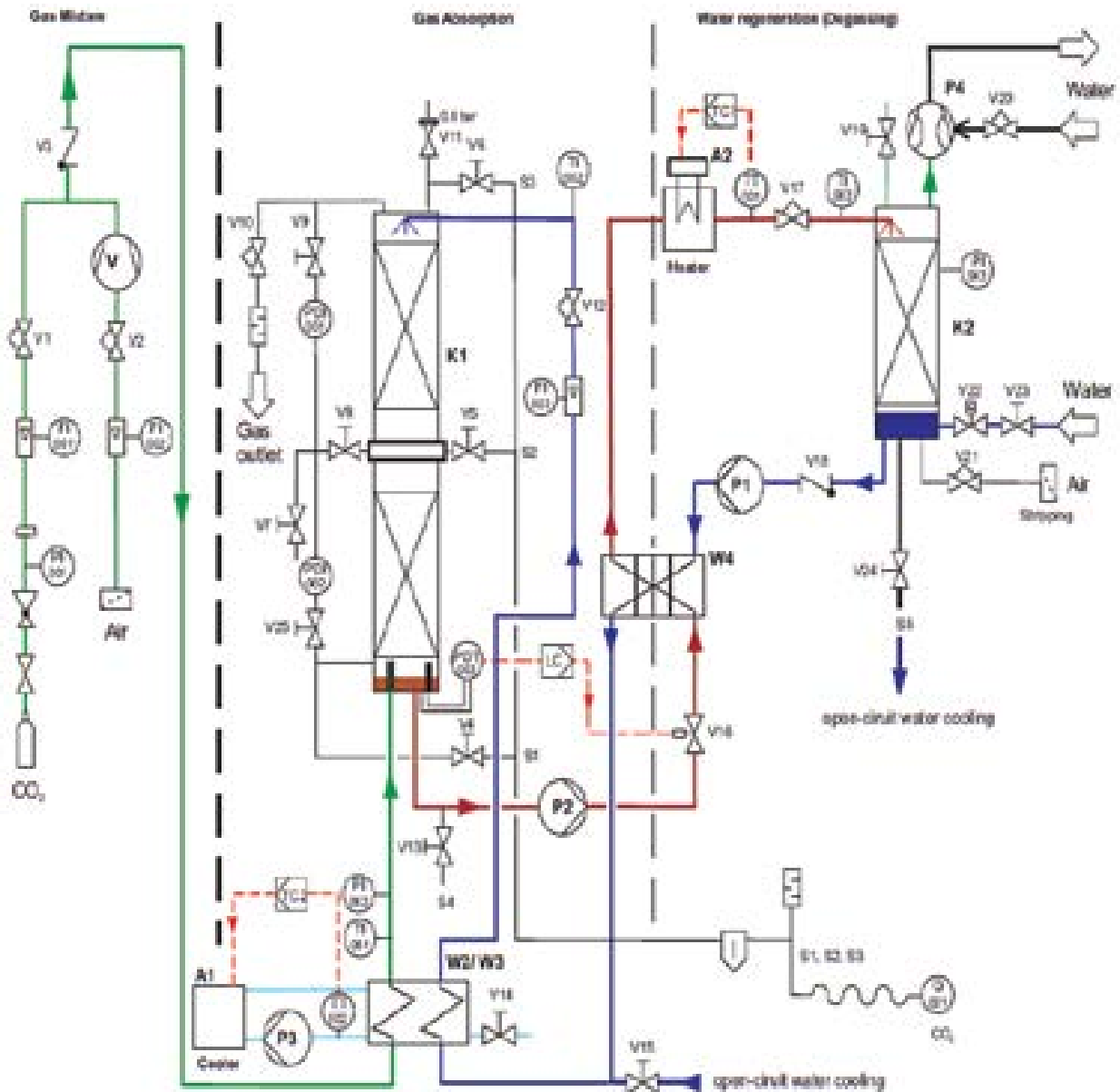
Eksperimenta variantu un citus kritiskus iestatījumus norāda pasniedzējs! Ieteicams mērījumus pierakstīt šādā tabulā (7.1. tabula).

7.1. tabula

Mērījumu tabulas piemērs

Nr.	Mērījumu sērija (vērtības pierakstītas tilpuma %)							Vidējā vērtība
	1	2	3	4	5	6	7	\bar{X}
	Laiks							
	10:00	10:05	10:10	10:15	10:20	10:25	10:30	
S1 (ieeja)	30,2	30,1	30,0	29,6	29,6	29,4	28,2	29,6
S2 (centrs)	22,1	21,0	25,2	18,0	19,0	22,5	13,0	26,6
S3 (izeja)	17,1	10,6	13,9	8,7	11,1	14,1	11,0	22,7

7.5. Iekārtas apraksts



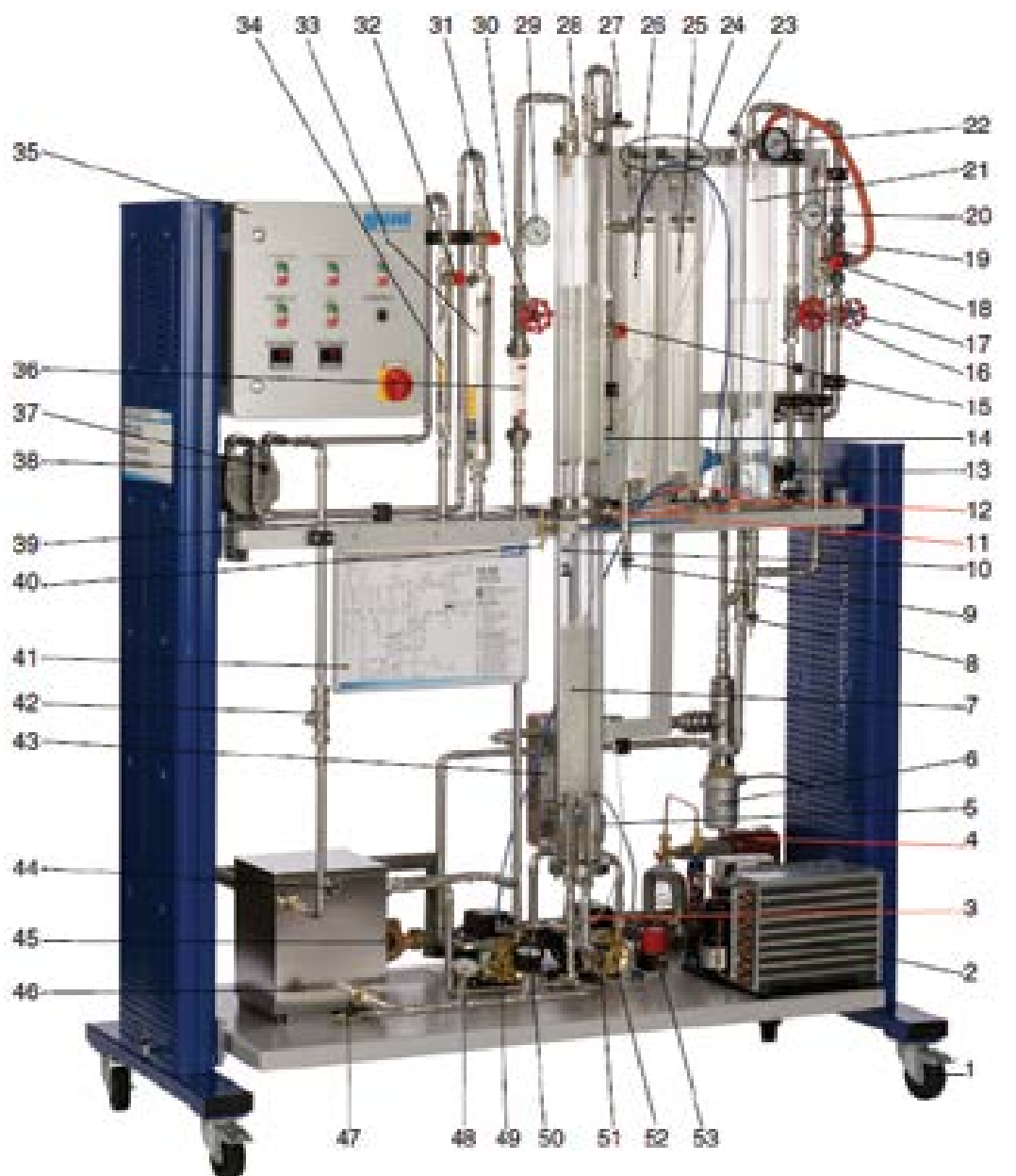
7.

- A1 – dzesēšanas iekārta
- A2 – sildītājs pirms ielūdes desorberi
- K1 – absorbcijas kolonna (absorbētājs)
- K2 – reģenerācijas kolonna (desorbers)
- P1 – cirkulācijas sūknis ievadišanai absorbcijas kolonnā
- P2 – cirkulācijas sūknis piegādei uz reģenerācijas kolonnu
- P3 – cirkulācijas sūkni dzesēšanas lokā
- P4 – ūdens strūkļas vakuuma sūkņa
- V – gaisa kompresors
- W2 / W3 – siltummainis
- W4 – siltummainis (rekuperators)
- V1 – CO₂ plūsmas regulēšanas ventilis
- V2 – gaisa plūsmas regulēšanas ventilis
- V3 – pretvārsts
- V4 – lodveida krāns gāzes paraugu ņemšanai kolonnas pamatnē

- V5 – lodveida krāns gāzes paraugu ņemšanai kolonnas centrā
- V6 – lodveida krāns gāzes paraugu ņemšanai kolonnas augšā
- V7 – lodveida krāns
- V8 – lodveida krāns spiediena mērīšanas punkta atbrīvošanai kolonnas centrā
- V9 – lodveida krāns spiediena mērīšanas punkta atbrīvošanai kolonnas augšā
- V10 – vadības ventilis kolonnas spiediena noregulēšanai
- V11 – absorbcijas kolonnas drošības vārsts
- V12 – ūdens plūsmas ātruma regulēšanas ventilis
- V13 – lodveida krāns šķidruma paraugu ņemšanai no absorbcijas kolonnas
- V14 – lodveida krāns dzesēšanas loka iztukšošanai
- V15 – lodveida krāns reģenerētā absorbenta paraugu ņemšanai

- V16 – elektromagnētiskais vadības ventis līmeņa regulēšanai absorbcijas kolonnā K1
- V17 – absorbenta vadības ventis pirms reģenerācijas kolonnas K2
- V18 – pretvārsts
- V19 – lodveida krāns spiediena izlīdzināšanai kolonnā K2 pēc eksperimenta
- V20 – ūdens strūkļas vakuuma sūkņa vadības ventis
- V21 – izplūstošā gaisa daudzuma vadības ventilis
- V22 – elektromagnētiskais ventīļi kolonnu (K1 un K2) uzpildīšanai ar ūdeni
- V23 – lodveida krāns ūdens padeves noslēgšanai
- V24 – lodveida krāns reģenerācijas kolonnas iztukšošanai
- V25 – lodveida krāns spiediena mērīšanas punkta atbrīvošanai kolonnas pamatnē

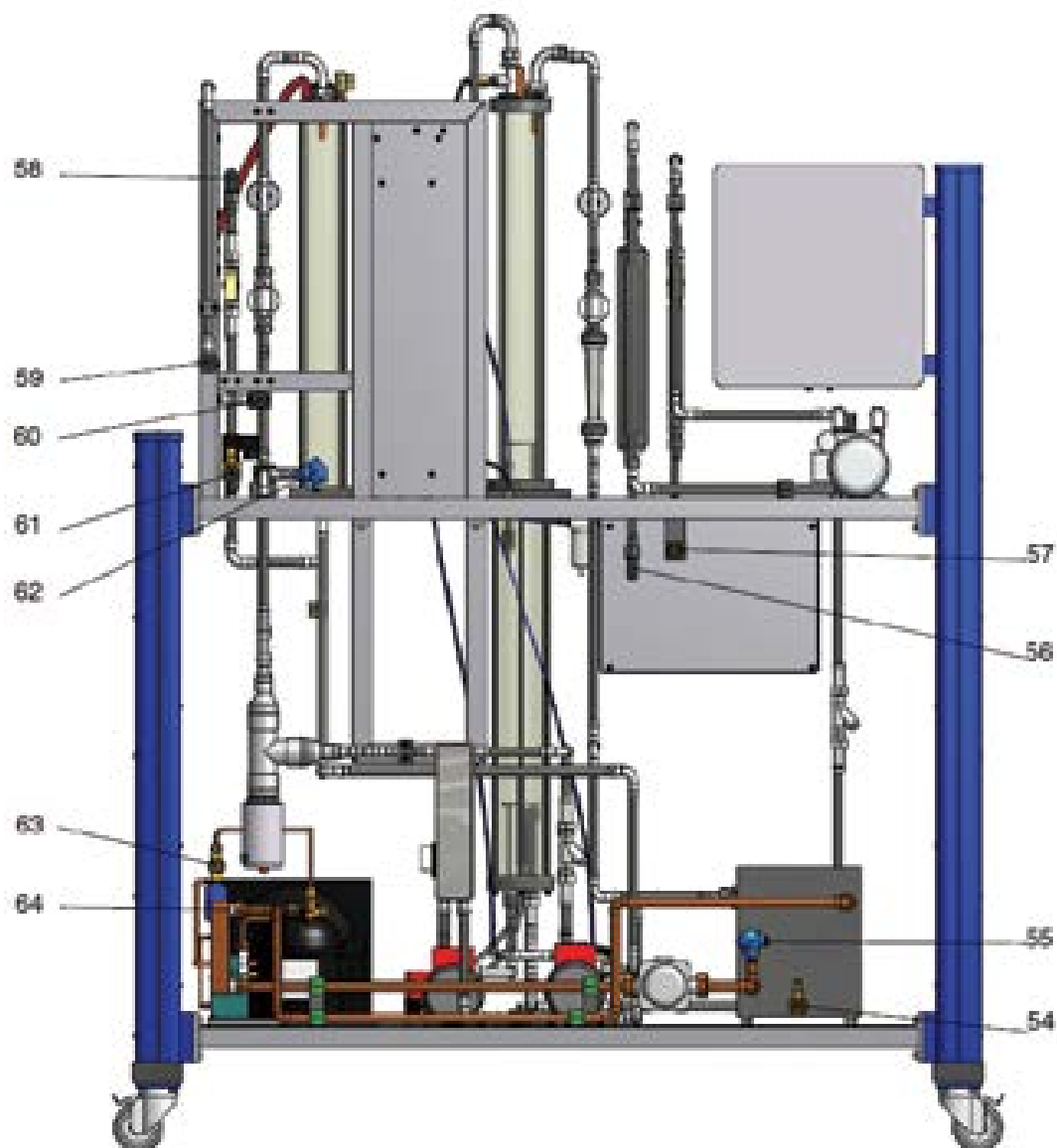
7.4. att. Absorbcijas iekārtas procesa diagramma.



7.

- | | | |
|--|---|--|
| 1 – veltnis ar bremzi | 19 – ūdens strūkļas vakuuma sūknis P4 | 35 – vadības panelis |
| 2 – dzesēšanas iekārta | 20 – termometrs TI003 | 36 – plūsmas mērītājs FI003 (ūdens) |
| 3 – lodveida krāns V25 | 21 – reģenerācijas kolonna K2 | 37 – kompresora spiediena ierobežotājs |
| 4 – siltummainis | 22 – manometrs PI003 | 38 – kompresors gaisam V1 |
| 5 – elektromagnētiskais vadības ventilis V16 | 23 – lodveida krāns V19 | 39 – gāzes parauga ņemšanas vieta |
| 6 – sildītājs A2 | 24 – lodveida krāni diferenciālo manometru atgaisošanai | 40 – gāzes parauga apvedceļš līdz izejai |
| 7 – absorbcijas kolonna K1 | 25 – augšējās kolonnas K1 diferenciālo manometrs | 41 – procesa diagramma |
| 8 – lodveida krāns V24 | 26 – apakšējās kolonnas K1 diferenciālo manometrs | 42 – pretvārsts V3 |
| 9 – lodveida krāns V7 | 27 – lodveida krāns V9 | 43 – siltummainis W4 |
| 10 – ūdens atdalītājs | 28 – drošības vārsts V11 | 44 – dzesēšanas ūdens līmeņa mērs |
| 11 – lodveida krāns V8 | 29 – termometrs TI002 | 45 – dzesēšanas ūdens sūknis P3 |
| 12 – lodveida krāni V4, V5, V6 | 30 – vadības ventilis V12 (ūdens) | 46 – siltummainis W2 / W3 |
| 13 – elektromagnētiskais ventilis V22 | 31 – plūsmas regulēšanas ventilis V2 (gaiss) | 47 – lodveida krāns V15 |
| 14 – trokšņa slāpētājs | 32 – plūsmas regulēšanas ventilis V1 (CO ₂) | 48 – termometrs TI001 |
| 15 – vadības ventilis V10 (gāzes maisījuma izvads) | 33 – plūsmas mērītājs FI002 (gaiss) | 49 – cirkulācijas sūknis P1 |
| 16 – vadības ventilis V17 (ūdens) | 34 – plūsmas mērītājs FI001 (CO ₂) | 50 – manometrs PI002 |
| 17 – vadības ventilis V20 (vakuuma sūknis) | | 51 – lodveida krāns V13 |
| 18 – vadības ventilis V21 (gaisa noņemšana) | | 52 – cirkulācijas sūknis P2 |
| | | 53 – diferenciālā spiediena devējs PDT003. |

7.5. att. Absorbcijas iekārtas priekšskats.



7.

- | | |
|---|--|
| 54 – lodveida krāns V14 | 60 – ūdens ieklūde vakuumsūkņi P4 |
| 55 – temperatūras devējs TT002 dzesēšanas ūdens | 61 – ūdensapgādes pieslēgvietā |
| 56 – gaisa ieklūdes filtrs | 62 – temperatūras devējs TT004 (sildītājs) |
| 57 – CO ₂ bāzes balona pieslēgvietā | 63 – mitruma indikators |
| 58 – gaisa iesūkšanas caur filtru | 64 – dzesēšanas iekārtas termoregulatora izplešanās vārsts |
| 59 – ūdens izvads no vakuumsūkņa P4 | |

7.6. att. Absorbcijas iekārtas aizmugures skats.



- 1 – P1 absorbētāja padeves sūknis
- 2 – P3 cirkulācijas sūknis dzesēšanas lokā
- 3 – P2 desorbera padeves sūknis
- 4 – sildītājs
- 5 – kompresors V
- 6 – ūdens ieplūde
- 7 – dzesētāja temperatūras regulators
- 8 – sildītāja temperatūras regulators
- 9 – galvenais slēdzis

7.

7.7. att. Absorbcijas iekārtas vadības panelis.



7.8. att. CO₂ metrs ar plastmasas filtru.

Gāzu maisījums. Eksperimentam nepieciešamo gāzu maisījumu iegūst iekārtā, sajaucot CO₂ (no balona) ar telpā esošo gaisu, kurš iekārtā tiek padots ar kompresoru V. Lai iegūtu nepieciešamo komponentu attiecību (CO₂ + gaiss), izmanto plūsmas regulēšanas ventiļus V1 un V2. Ieteicams iestatīt CO₂ plūsmu robežās 2–6 L/min. Gāzu ražību mēra ar plūsmas mērītājiem Fl001 (CO₂) un Fl002 (gaiss).

Gāzes absorbcija. Gāzes absorbcijas eksperiments tiek realizēts iekārtas galvenajā kolonnā K1, kurā absorbcijas šķidrums tiek ievadīts no augšas, bet

pretplūsmā – gāzu maisījums. Kolonna K1 veidota no diviem caurspīdīgiem vienāda garuma cilindriem, kuri nostiprināti starp atlokiem. Atlokos izveidotas pieslēgvietas, gan gāzu maisījuma, gan absorbenta plūsmu realizēšanai, kā arī paraugu noņemšanai un diferenciālā spiediena mērīšanai. Ieplūstošā gāzu maisījuma sastāva analīzei paraugu noņem caur lodveida krānu V4, kurš izvietots kolonnas apakšējā atlokā. Cilindrus savienojošajā atlokā, kolonnas vidū, izvietots lodveida krāns V5, lai varētu iegūt gāzes paraugus absorbcijas procesa vidusposmā. Savukārt no absorbcijas kolonnas izplūstošās gāzes paraugus iegūst caur lodveida krānu V6. Atlokos izvietotās pieslēgvietas ar lodveida krāniem V8, V9 un V25 ļauj pieslēgt diferenciālos manometrus PDI 001 un PDI 002, lai noskaidrotu spiediena starpību starp kolonnas apakšu, vidus daļu un augšu. Attiecīgi ar kolonnas augšējā atlokā izvietoto spiediena regulēšanas ventili V10, iestāda nepieciešamo gāzes darba spiedienu kolonnā. Caur ventilis V10 notiek arī atstrādātās gāzes izvadišana no kolonnas apkārtējā vidē. Eksperimentā gāzu maisījums caur absorbcijas kolonu plūst tikai vienu reizi.

7. Dzesēšanas iekārta. Tā kā gāzu absorbcija ir atkarīga no temperatūras, iekārtā ir uzstādīta dzesēšanas iekārta. Tās dzesēšanas jauda ir ierobežota, lai sistēmas temperatūra nebūtu zemāka par 4 °C. Dzesēšanas iekārtā izmanto aukstuma mašīnu ar iztvaicētāju. Aukstuma mašīnā sašķidrinot, tad iztvaicējot aukstuma aģentu, iegūst aukstumu. Dzesēšanas iekārtā iegūto aukstumu, kā siltumnesēju izmantojot ūdeni, pārnes uz siltummaini W2/W3. Tajā ir iespējams atdzesēt gan gāzu maisījumu, gan absorbcijas šķidrums pirms to nonākšanas absorberī.

Desorbcija. Atšķirībā no gāzu maisījuma, absorbcijas šķidrums – ūdens – iekārtā tiek izmantots atkārtoti, tāpēc to nepieciešams reģenerēt.

Absorbcijas šķidruma cirkulāciju sistēmā nodrošina ar sūkņiem P1 un P2. Sūknis P1 reģenerēto šķidrums sūknē caur siltummaini (rekuperatoru) W4 uz siltummaini W2/W3. Atdzesētais absorbcijas šķidrums, caur plūsmas regulēšanas ventili V12, nonāk absorbcijas kolonnā (absorberī) K1 augšā, kurā to caur sprauslu izsmidzina. Pirms šķidrums nonāk absorberī, nosaka tā temperatūru ar termometru Tl002 un ražību ar plūsmas mērītāju Fl001.

Pēc absorbcijas procesa, šķidrums ir piesātināts ar CO₂ un ar sūkni P2, no kolonnas K1 apakšas, tiek padots uz siltummaini (rekuperatoru) W4, kurā tas daļēji tiek uzsildīts – atgūts augstums. Lai sekmīgi realizētu desorbcijas procesu, absorbcijas šķidrums ir jāuzsilda, to veic sildītājā A2. Absorbcijas šķidruma temperatūru pēc sildītāja nosaka ar termometru Tl003, bet plūsmu regulē ar ventili V17. Desorbcijas process – absorbcijas šķidruma (ūdens) reģenerācija – notiek kolonnā K2. Ogļskābās gāzes desorbcijas intensificēšanai, absorbcijas

šķidrumu kolonnas K2 augšā izsmidzina, kā arī kolonnā K2 rada retinājumu ar ūdens strūkļas vakuuma sūkni P4. Nepieciešamo retinājumu iestāda regulējot ūdens strūkļas vakuuma sūknim pievadīto ūdens daudzumu ar ventili V20. Papildus, desorbcijas kolonnā K2 ir iespēja ievadīt gaisu caur ventili V21, kas palīdz efektīvāk realizēt desorbcijas procesu. Desorbcijas kolonnas K2 spiediena kontrolei izmanto manometru Pl002.

Pēc desorbcijas procesa realizēšanas, absorbcijas šķidrums ir reģenerēts. To no desorbcijas kolonnas K2 apakšas atkal var sūknēt ar sūkni P1 uz absorbcijas kolonu K1. Starp sūkni P1 un kolonu K2 ir uzstādīts pretvārsts V18.

Gāzu maisījuma analīze. Lai noteiktu CO₂ saturu gāzes paraugos, izmanto gāzu analizatoru (7.8. att.). Pareizu analizatora pielietojumu vaicāt laboratorijas vadītājam, laborantam vai skatīt lietošanas instrukciju.

7.6. Darba gaita

7.

Iekārtas (sistēmas) ieslēgšana

1. Iekārtas pievienošanu elektrotīklam, ūdensvadam, kanalizācijai un CO₂ balonam veic laborants (darba vadītājs).
2. Atveriet CO₂ balona ventili. Pārbaudiet vai pie CO₂ balona uzstādītais reduktors uz iekārtu gāzi padod ar 0,8 bar lielu spiedienu. Spiediena regulēšanu veic laborants (darba vadītājs)!
3. Ieslēdziet iekārtu, izmantojot galveno slēdzi.
4. Ieslēdziet dzesēšanas iekārtu.
5. Pievienojiet sistēmai ūdeni (absorbcijas šķidrumu).
6. Ieslēdziet sūkņus P1 un P2. Ūdens tiks izsmidzināts absorbcijas kolonnā. Iestatiet ūdens plūsmas ātrumu līdz aptuveni 200 L/h, izmantojot vārstu V12.
7. Ja nepieciešams, papildiniet ūdeni (absorbcijas šķidrumu).
8. Izslēdziet sūkņus P1 un P2.
9. Atgaisojiet elastīgās caurules, pārlicinieties, ka tajās nav gaisa burbuļi (neskaidrību gadījumā vaicāiet padomu laborantam vai darba vadītājam).
10. Vēlreiz ieslēdziet sūkņus P1 un P2.
11. Absorbcijas šķidruma līmenim jābūt apmēram 5–10 cm no kolonnas apakšas. Ja nepieciešams, mainiet šķidruma plūsmas regulējumu.
12. Atveriet vārstu V10.
13. Ieslēdziet gaisa kompresoru un noregulējiet plūsmu (aptuvenā ražība 5 L/min (m³/h).

14. Iestatiet nepieciešamo retinājumu (0,5 bar) reģenerācijas kolonnā K2. Lai to izdarītu, aizveriet krānu V19, atveriet vārstu V20. Ja nepieciešams, retinājuma stabilizēšanai, varat sistēmā pievadīt gaisu. Gaisa plūsmu regulē ar ventili V21.
15. Spiediena zudumi, absorbcijas šķidrums līnijā no kolonas K1 uz kolonu K2 var radīt troksni, lai to mazinātu, izmantojiet ventiļus V16 (palieliniet atvērumu) un V17 (samaziniet atvērumu).
16. Ja nepieciešams, vadības panelī ieslēdz sildītāju A2.
17. Visbeidzot, gaisa plūsmai pievieno CO₂, atverot ventili V1 (iestatot ražību CO₂ līdz 5 L/min).

Iekārtas (sistēmas) izslēgšana

1. Izslēdziet CO₂ padevi (aizver ventili V1 un tad CO₂ balona ventili).
2. Izslēdziet sildītāju.
3. Izslēdziet dzesētāju.
4. Atveriet ventili V19.
5. Noslēdzat vakuuma sūkņa ūdens padevi V20.
6. Izslēdziet kompresoru.
7. Izslēdziet abus sūkņus P1 un P2.
8. Iztukšojiet iekārtu.
9. Sakārtojiet darba vietu.

7.

7.7. Kontroljautājumi

- ♦ Kas ir absorbcija?
- ♦ Ar ko absorbcija atšķiras no adsorbcijas?
- ♦ Ar ko atšķiras absorbcija no hemosorbcijas?
- ♦ Kā mainās gāzes šķīdība ūdenī, pieaugot temperatūrai?
- ♦ Vai CO₂, šķīstot ūdenī, reagē ar to? Kā un vai tas ietekmē ūdens pH līmeni?
- ♦ Kur CO₂ izmanto industrijā? Nosaukt piemērus.

8. ADSORBTĪVA GAISA ŽĀVĒŠANA

8.1. Teorētiskais pamatojums

Adsorbcijas metodes plaši izmanto, lai attīrītu gāzes, kas satur nelielu daudzumu piemaisījumu gāzes vai tvaika veidā, kā arī dziļai notekūdeņu attīrīšanai no izšķīdušiem organiskiem savienojumiem.

Adsorbcija ir gāzes vai šķidrās vielas saistīšanas process no gāzu maisījuma vai šķidruma uz cietas fāzes virsmas. Kā sorbentus izmanto porainus materiālus ar attīstītu iekšējo virsmu. Aktīvo sorbentu īpatnējā virsma var sasniegt no vairākiem simtiem līdz tūkstošiem kvadrātmetru uz gramu.

Izšķir fizikālo adsorbciju un hemosorbciju. Fizikālo adsorbciju nosaka adsorbenta un adsorbāta savstarpējās mijiedarbības spēki: dispersija, Van der Vālsa, elektrostatiskie u. c. Adsorbāta molekulas piesātina sorbenta virsmu, samazinot brīvo enerģiju, tāpēc process noris patvarīgi. Hemosorbcijas gadījumā noteiktā vietā uz sorbenta virsmas veidojas ķīmisks savienojums starp adsorbātu un sorbentu. Adsorbcijas procesu pavada siltuma izdalīšanās, t. i., adsorbcijas process ir eksotermisks.

Fizikālās adsorbcijas gadījumā to var samērot ar vielas kondensācijas siltumu r un tas var sasniegt 80–100 kJ/kmol. Hemosorbcijas gadījumā izdalītais siltums ir samērojams ar eksotermisku reakciju siltumu un var pārsniegt kondensācijas siltumu par kārtu $r \cdot 10$ kJ/kmol.

Svarīgākais adsorbentus raksturojošais parametrs ir adsorbcijas spēja (adsorbcijas aktivitāte, sorbcijas kapacitāte). To izsaka ar saistītās vielas daudzumu vienā masas vienībā vai tilpuma vienību adsorbentā. Literatūrā to bieži apzīmē ar a :

$$[a] = [\text{kg/kg}], [\text{kg/m}^3], [\text{kmol/kmol}], [\text{mas } \%].$$

Adsorbentiem izšķir statisko un dinamisko adsorbcijas spēju. Statiskā aktivitāte ir adsorbenta saistītās vielas daudzums no procesa sākuma līdz līdzsvara sasniegšanai. Dinamiskā aktivitāte raksturo to vielas daudzumu, ko adsorbents ir saistījis no procesa sākuma līdz brīdim, kad aizplūstošajā fāzē parādās adsorbējamā viela. Dinamiskā aktivitāte vidēji ir 85–95 % no statiskās aktivitātes vērtības. Tehnoloģiskos aprēķinos parasti to veic attiecībā uz dinamisko aktivitāti.

Kā rūpnieciskos adsorbentus galvenokārt izmanto aktivēto ogli, silikageļu, ceolītus. Silikagēls ir atūdeņots (termiski apstrādāts) silīcijskābes gēls, kura

kopējā formula ir $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Silikagels raksturojas ar diezgan vienmērīgu poru sadalījumu, kas parasti ir robežās no 1,5–5 nm, īpatnējā virsma sasniedz 900 m²/g. Silikagels ir izteikti hidroskopisks, var saistīt ūdens tvaikus no gaisa līdz 30 % no savas masas.

8.2. Līdzsvars adsorbcijas procesos

Adsorbcijas process ir patvarīgs process, kas virzīts uz sorbenta virsmas brīvās enerģijas samazināšanos un līdzsvara sasniegšanu.

Līdzsvara gadījumā starp fāzēm adsorbētās vielas daudzums ir atkarīgs no adsorbētā īpašībām, koncentrācijas, procesa realizācijas apstākļiem (temperatūras, spiediena).

Sakarības starp aktīvā komponenta adsorbcijas lielumu pie tā noteiktas koncentrācijas gāzes vai šķidrā fāzē līdzsvara gadījumā un patstāvīgas procesa temperatūras sauc par adsorbcijas izotermām.

Adsorbcijas izotermas noteiktiem temperatūras intervāliem un dažādiem adsorbentiem dod iespēju noteikt optimālos sorbcijas procesa apstākļus.

8.

Lai matemātiski aprakstītu adsorbcijas izotermas, izmanto virkni empīrisko vienādojumu, kuru pamatā ir dažādi teorētiski modeļi. Adsorbcijas teorijā eksistē seši adsorbcijas izotermu tipi:

Procesus, kuros novēro polimolekulāru adsorbciju un kapilāro kondensāciju, var aprakstīt ar Lengmīra vienādojumu:

$$a = a_m \cdot \frac{K_L \cdot C}{1 + K_L \cdot C}, \quad (8.1.)$$

kur a_m – maksimāli iespējamais adsorbcijas lielums (monoslāņa kapacitāte);

K_L – Lengmīra konstante, kas atkarīga no vielas īpašībām un procesa temperatūras;

C – adsorbējamās vielas koncentrācija.

Praktiskiem aprēķiniem bieži izmanto Freindliha vienādojumu:

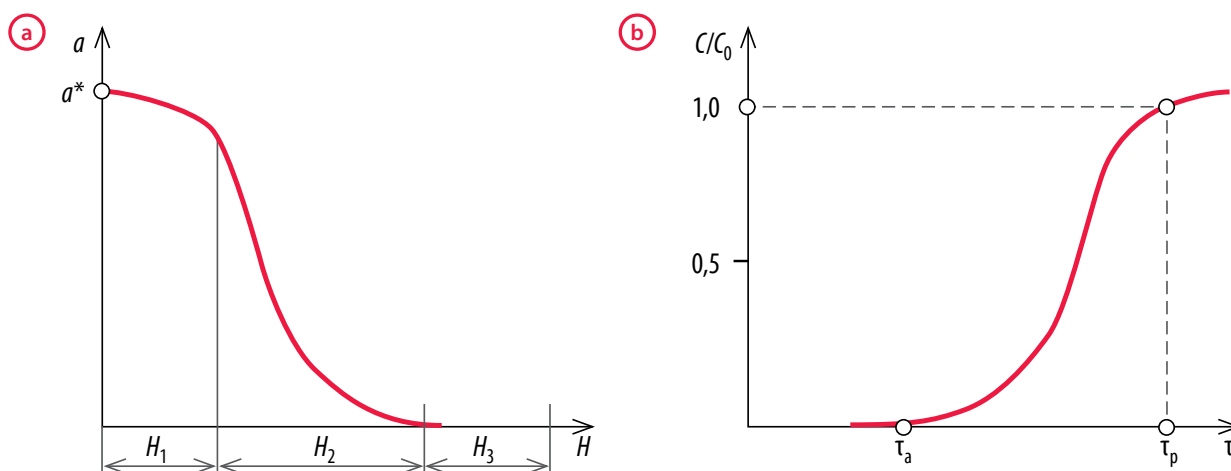
$$a = K_F \cdot C^n, \quad (8.2.)$$

kur K_F un n – empīriskas konstantes dotajai temperatūrai.

8.3. Periodiskas adsorbcijas dinamika

Periodiskas adsorbcijas process ir nestacionārs masas apmaiņas process starp sadalāmā maisījuma plūsmu un nekustīgu adsorbenta slāni. Adsorbcijas process summējas no pakāpeniskas adsorbētiva difūzijas no plūsmas tilpuma uz adsorbenta virsmu (ārējā difūzija), no virsmas adsorbenta iekšienē (iekšējā difūzija) un tieši pats adsorbcijas process. Turklāt tiek uzskatīts, ka pēdējā stadija notiek momentāni.

Adsorbcijas procesu var pētīt un adsorberu aprēķinu var balstīt uz likumsakarībām, kā laikā notiek adsorbenta piesātināšanās un kā mainās adsorbētiva koncentrācija gāzē katrā adsorbenta slāņa šķēlumā. Gāzes plūsma ar patstāvīgu sākuma koncentrāciju C_0 ieplūst svaiga adsorbenta slānī ($a = 0$). Adsorbējamā viela saistās adsorbenta pirmajā, pēc tam otrajā, trešajā utt. adsorbenta slāņa joslā. Katru nākamo slāņa joslu apskalo plūsma, kurā adsorbējamās vielas koncentrācija $C < C_0$, jo daļu no tās saista iepriekšējās joslas. Kad pirmā josla ir pilnībā piesātināta, tā atslēdzas, un gāze ar koncentrāciju C_0 sāk apskalot otro joslu, pēc tam trešo utt. Tādā veidā adsorbcijas norises laikā pa adsorbenta slāņa augstumu H var izdalīt trīs joslas (8.1. att.).



8.1. att. Adsorbētiva koncentrācijas sadalījums adsorbenta slānī (a), adsorbcijas procesa izejas līkne (b).

1. Adsorbentā josla (augstums H_1), kurā sasniegta maksimālā sorbcijas kapacitāte (koncentrācija ir līdzsvarā ar gāzes plūsmas koncentrāciju C_0).
2. Aktīvā adsorbenta josla (augstums H_2), kas vēl nav piesātināta un kurā adsorbcijas process turpinās.
3. Josla, kas vēl nepiedalās adsorbcijas procesā (augstums H_3).

Laiku τ_0 , kad notiek adsorbenta slāņa pirmās joslas piesātināšana, sauc par adsorbcijas frontes veidošanās periodu.

Sākot no momenta $\tau = \tau_0$ (ar augstumu H_1), adsorbenta aktīvajā zonā (AAZ) izveidojas noteikts koncentrācijas sadalījums abās fāzēs, un šī stacionārā koncentrācijas fronte ar nemainīgu ātrumu pārvietojas, atstājot aiz sevis augošu piesātinātu adsorbenta slāni.

Acīmredzot, ja slāņa augstums $H = H_1 + H_2$, gāze aizplūdis no adsorbenta ar beigu koncentrāciju $C_B = 0$. Ja $H < H_1 + H_2$, tad beigu koncentrācija $C_B > 0$, t. i., aizplūstošajā gāzē (šķidrūmā) parādās adsorbējamais komponents.

Laika sprīdi no gāzes ieplūdes adsorbenta slānī līdz izplūdei ar koncentrāciju $C_B = 0$ (līdz sākas adsorbējamā komponenta izplūde) sauc par slāņa aiztures (aizsarg-darbības) laiku.

Sakarību starp adsorbenta slāņa augstumu H un tā aizsargdarbības laiku apraksta Šilova formula:

$$\tau_a = K_a \cdot H - \tau_0, \quad (8.3.)$$

kur K_a – adsorbcijas slāņa aizsargdarbības koeficients, ko nosaka šādi:

$$K_a = \frac{a_d}{W \cdot C_0}, \quad (8.4.)$$

kur a_d – adsorbenta dinamiskā aktivitāte;

w – gāzes plūsmas fiktīvais ātrums;

C_0 – adsorbējamās vielas sākuma koncentrācija.

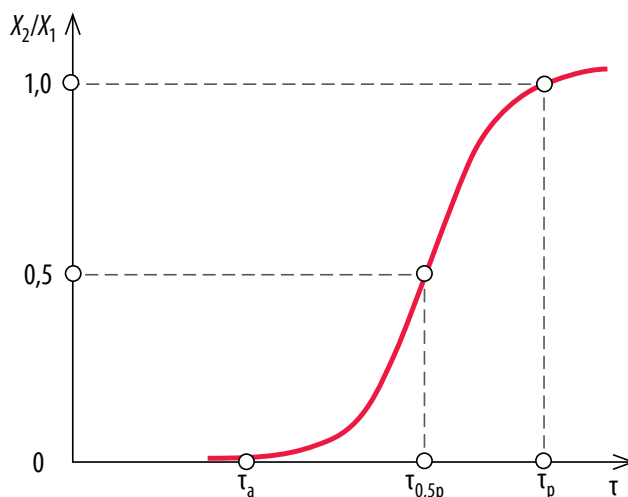
8.1. att. b redzama līkne, kas raksturo adsorbējamā komponenta relatīvās koncentrācijas C/C_0 maiņu adsorbcijas laikā. Šo sakarību sauc par **procesa izejas līkni**. Līdz slāņa aiztures laikam τ_a attiecība C/C_0 vienmēr ir nulle, sākot ar τ_a attiecība $C/C_0 > 0$. Pilnībā piesātināta adsorbenta slāņa gadījumā $C/C_0 = 1$.

8.4. Adsorbētīvā gaisa žāvēšana

Šajā laboratorijas darbā adsorbcijas process tiek pētīts, veicot adsorbētīvu gaisa žāvēšanu. Mitrais gaiss plūdis caur silikagela slāni un ūdens tvaiki tiks saistīti uz tā virsmas.

Adsorbētīva koncentrācijas izmaiņu gaisā var nomainīt ar gaisa mitruma saturu X (g/kg sausa gaisa) izmaiņu pirms un pēc adsorbcijas kolonnas. Tabulā (8.1. tabula) ir doti visu fizikālo lielumu apzīmējumi un paskaidrojumi, kas tiks izmantoti laboratorijas darbā, analizējot gaisa adsorbētīvo žāvēšanu.

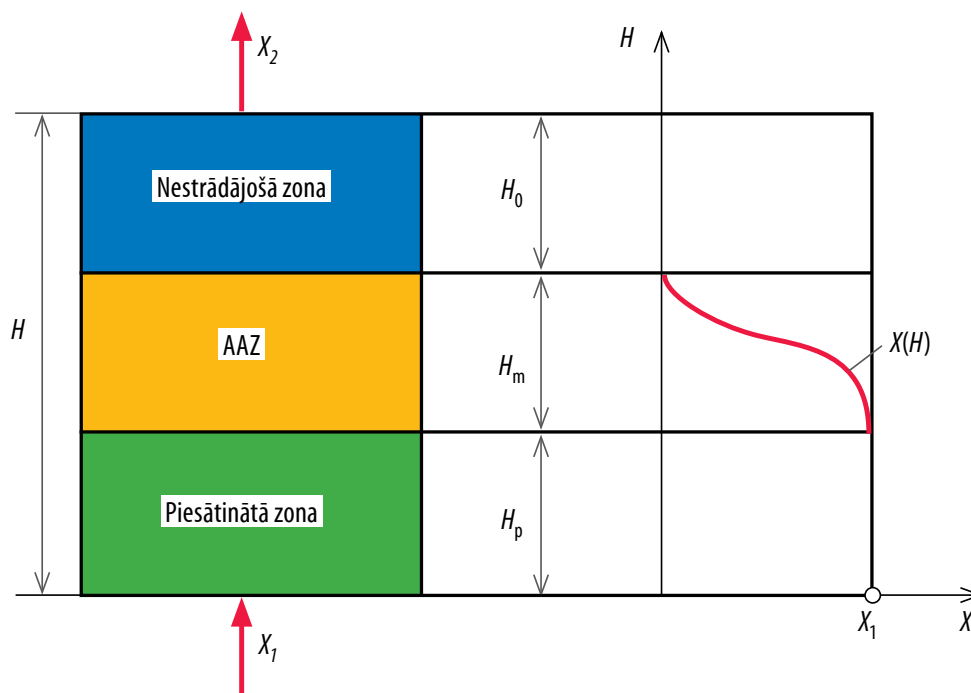
Par adsorbenta piesātinātības pakāpi, kā tas jau redzams no 8.1. att. b, arī gaisa žāvēšanas gadījumā var spriest pēc procesa izejas līknes (8.2. att.), aizstājot relatīvās koncentrācijas C/C_0 maiņu adsorbcijas laikā ar žāvējamā gaisa relatīvā mitruma satura X_2/X_1 maiņu.



8.2. att. Gaisa adsorbīvās žāvēšanas procesa izejas līkne.

8.

Tehnoloģisko parametru ietekmi uz adsorbcijas procesu novērtē pēc vidējās vērtības starp slāņa aiztures laiku τ_a un piesātinājuma laiku τ_p , t. i., pusi no slāņa piesātinājuma laika $\tau_{0,5p}$. 8.3. att. paskaidrots atsevišķu zonu veidošanās adsorbenta slāņa dažādos augstumos adsorbcijas procesa laikā.



8.3. att. Adsorbenta slāņa sadalījums zonās.

Formulās izmantoto fizikālo lielumu apzīmējumi

No.	Apzīmējums	Mērvienība	Paskaidrojums
1.	h	kJ/kg	Entalpija
2.	H	m	Adsorbenta slāņa augstums
3.	H_m	m	Masas pārejas zonas (MPZ) augstums
4.	H_p	m	Piesātināta adsorbenta zonas augstums
5.	H_0	m	Adsorbenta zonas augstums, kas nepiedalās procesā
6.	\dot{m}_1	kg/h	Sausa gaisa patēriņš
7.	\dot{m}_2	kg/h	Mitra gaisa patēriņš
8.	\dot{m}_{Ad}	kg/h	Adsorbētīva (ūdens gaisā) patēriņš
9.	\dot{m}_{As}	kg	Sorbenta (silikagela) masa
10.	τ_a	min vai h	Slāņa aiztures laiks
11.	τ_p	min vai h	Slāņa piesātinājuma laiks
12.	$\tau_{0,5p}$	min vai h	Puse no slāņa piesātinājuma laika
13.	\dot{V}_g	m ³ /h	Ievadītā gaisa tilpuma patēriņš
14.	X_2	g/kg (s.gaiss)	Mitruma saturs atstrādātā gaisā
15.	X_1	g/kg (s.gaiss)	Mitruma saturs ievadītā gaisā
16.	W_a	kg/kg	Ūdens daudzums sorbenta masas vienībā, sasniedzot slāņa aiztures laiku
17.	W_p	kg/kg	Ūdens daudzums sorbenta masas vienībā, sasniedzot slāņa aiztures piesātinājumu
18.	t	°C	Temperatūra
19.	ϕ	%	Relatīvais mitrums
20.	ρ_g	kg/m ³	Gaisa blīvums

Mitrs gaiss sastāv no sausa gaisa un ūdens, ko tas satur. Varam sastādīt bilances vienādojumu:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 + \dot{m}_{Ad}. \quad (8.5.)$$

Tā kā

$$X_1 = \frac{\dot{m}_{Ad}}{\dot{m}_1} \quad (8.6.)$$

un

$$\rho_g = \frac{\dot{m}_2}{\dot{V}_g}, \quad (8.7.)$$

tad ievietojot vienādojumā (8.5.), iegūstam sausā gaisa patēriņa formulu:

$$m_1 = \rho_g \dot{V}_g \cdot \frac{1}{1 + X_1}. \quad (8.8.)$$

Ievietojot m_1 (8.6.) vienādojumā, iegūstam adsorbētīva (mūsu gadījumā ūdens) patēriņu \dot{m}_{Ad} :

$$\dot{m}_{Ad} = X_1 \cdot m_1. \quad (8.9.)$$

Adsorbcijas procesa laikā no $\tau=0$ līdz $\tau=\tau_a$ atstrādātā gaisa mitruma saturs $X_2=0$, viss gaisā esošais mitrums ir saistīts silikagelā. Saistītais ūdens daudzums uz adsorbenta masas vienību, sasniedzot slāņa aiztures laiku, ir:

$$w_a = \frac{\dot{m}_{Ad}}{m_{As}} \cdot \tau_a. \quad (8.10.)$$

Saistīto ūdens daudzumu uz adsorbenta masas vienību, sasniedzot piesātinājuma stāvokli, tuvināti var aprēķināt, izmantojot $\tau_{0,5p}$:

$$w_p = \frac{\dot{m}_{Ad}}{m_{As}} \cdot \tau_{0,5p}. \quad (8.11.)$$

Izmantojot noteiktos lielumus w_a un w_p , iespējams aprēķināt masas pārejas zonas augstumu H_m konkrētajā adsorbcijas procesā, ja adsorbenta slāņa augstums ir H :

$$H_m = H \cdot \left(1 - \frac{w_a}{w_p} \right). \quad (8.12.)$$

Augstuma H_m noteikšanai ir svarīga nozīme, jo tas ietekmē nepieciešamo adsorbenta slāņa augstumu. Tikai pie nosacījuma $H > H_m$ adsorbāts būs sauss. Jo lielāka ir H un H_m attiecība, jo lielāka ir slāņa aiztures laika vērtība τ_a .

8.5. Darba uzdevumi

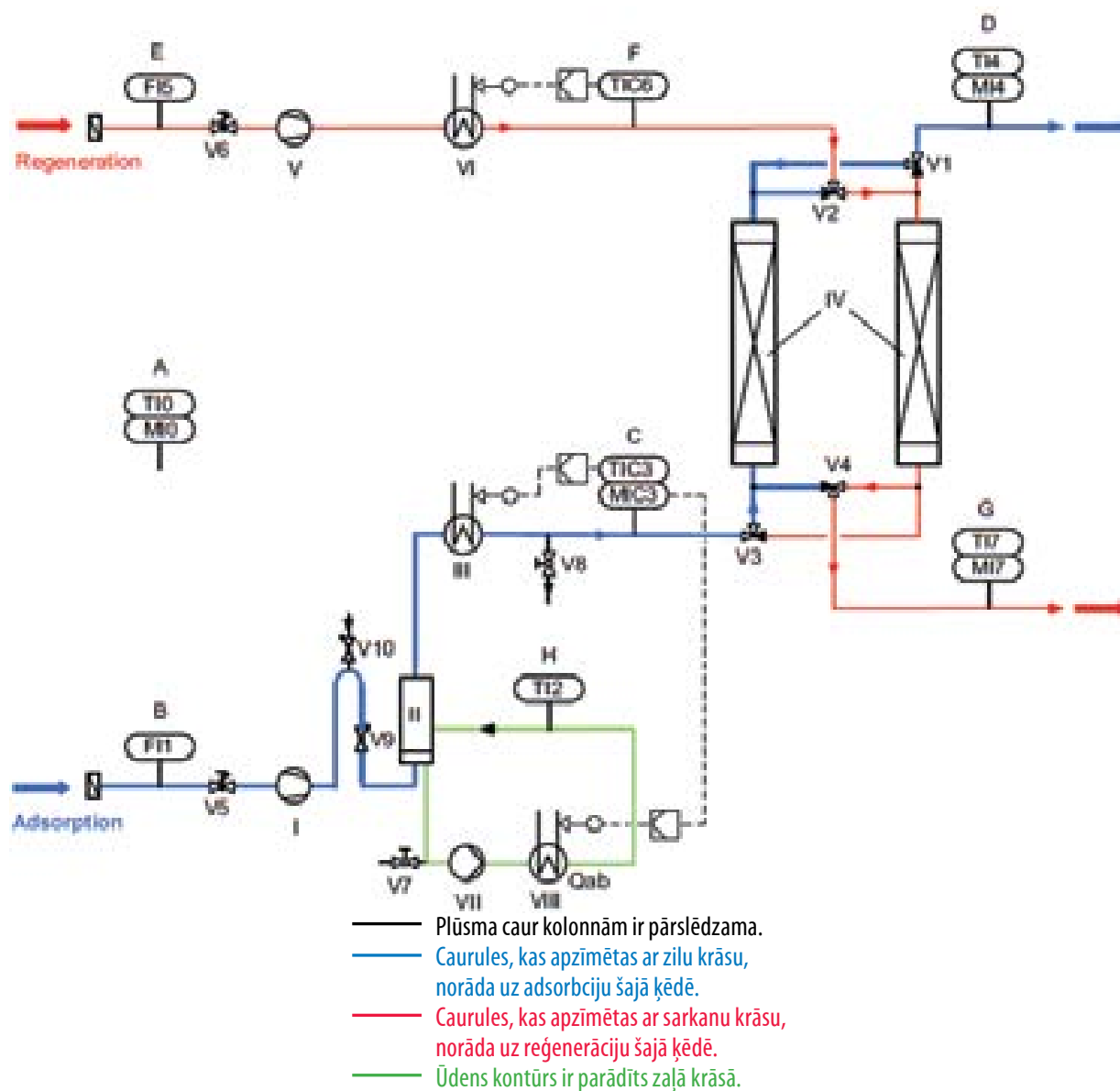
- ♦ Iepazīties ar adsorbētīvo gaisa žāvēšanas procesu.
- ♦ Novēro masas pārnese zonas silikagela kolonnās.
- ♦ Pēc pasniedzēja norādījumiem veic vienu no eksperimenta variantiem. Eksperimentu veikšanai ir nepieciešama Moljēra ($H-x$) diagramma (sk. 3.2. nodaļu).
- ♦ Pēc pasniedzēja dotā varianta veikt mērījumu (temperatūra, relatīvais mitrums, ūdens padeve) un rezultātu grafisko analīzi.

8.2. tabula

Adsorbcijas eksperimenta varianti

Nosacījuma tips	Simbols, vienības	Eksperimenta varianti						
		1. var.	2. var.	3. var.	4. var.	5. var.	6. var.	7. var.
Ienākošā gaisa temperatūra	$T_3, ^\circ\text{C}$	30	30	20	30	30	30	30
Ienākošā gaisa relatīvais mitrums	$\phi, \%$	50	35	90	50	50	50	50
Ievadītā gaisa tilpuma patēriņš	$\dot{V}_g, \text{m}^3/\text{h}$	6	6	6	5	4	6	6
Adsorbenta (silikagela) masa	\dot{m}_{As}, kg	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1,2	1,6

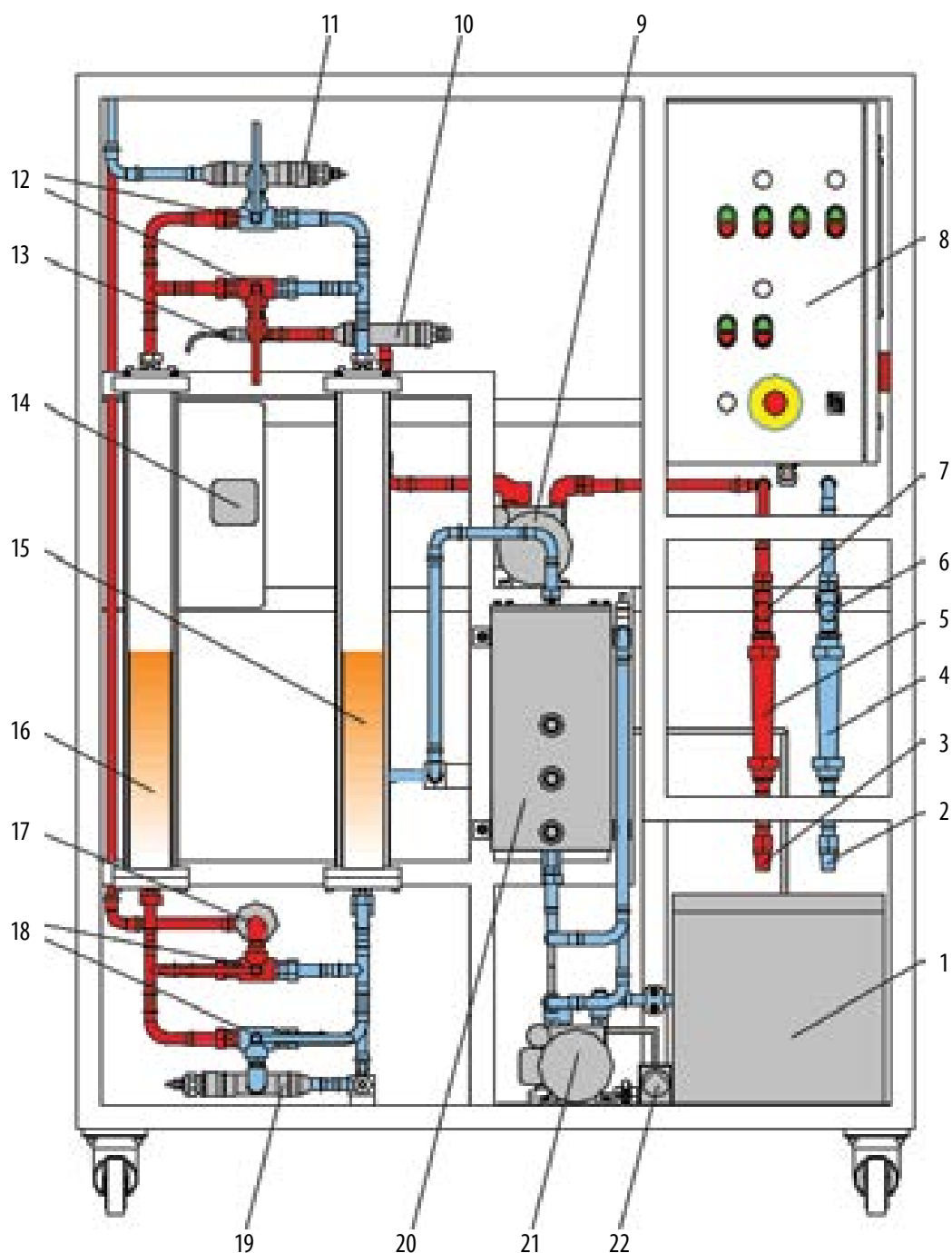
8.6. Iekārtas apraksts



- I – žāvējamā gaisa kompresors
- II – mitrinātājs
- III – žāvējamā gaisa sildītājs
- IV – adsorbcijas kolonnas
- V – reģenerācijai izmantotā gaisa kompresors
- VI – reģenerācijai izmantotā gaisa sildītājs
- VII – mitrinātāja cirkulācijas sūknis
- VIII – ūdens dzesētājs

- A – apkārtējā gaisa temperatūras un mitruma sensoru bloks
- B – žāvējamā gaisa plūsma
- C – žāvējamā gaisa mitruma un temperatūras sensoru bloks
- D – pēc adsorbcijas, mitruma un temperatūras sensoru bloks
- E – žāvējamā gaisa plūsmas mērītājs
- F – reģenerācijai izmantotā gaisa temperatūras sensors
- G – gaisa temperatūras un mitruma sensoru bloks pēc reģenerācijas
- H – mitrinātāja ūdens temperatūras sensors

8.4. att. Adsorbīva gaisa žāvēšana – procesa shēma.



8.

- | | |
|---|---|
| 1 – ūdens dzesētājs | 12 – trīsceļu krāns |
| 2 – žāvējamā gaisa filtrs | 13 – reģenerācijai izmantotā gaisa temperatūras sensors |
| 3 – reģenerācijai izmantotā gaisa filtrs | 14 – apkārtējās vides mitruma un temperatūras sensoru bloks |
| 4 – žāvējamā gaisa plūsmas mērītājs | 15 un 16 – adsorbcijas-desorbcijas kolonnas |
| 5 – reģenerācijas plūsmas mērītājs | 17 – pēc reģenerācijas, mitruma un temperatūras sensoru bloks |
| 6 – žāvējamā gaisa ieplūdes regulēšanas ventilis | 18 – trīsceļu krāns |
| 7 – reģenerācijai izmantotā gaisa ieplūdes regulēšanas ventilis | 19 – pēc adsorbcijas, mitruma un temperatūras sensoru bloks |
| 8 – vadības panelis | 20 – gaisa mitrināšanas tvertne |
| 9 – reģenerācijai izmantotā gaisa kompresors | 21 – žāvējamā gaisa kompresors |
| 10 – reģenerācijai izmantotā gaisa sildītājs | 22 – cirkulācijas sūkņi |
| 11 – izžāvētā gaisa mitruma un temperatūras sensoru bloks | |

8.5. att. Adsorbīva gaisa žāvēšana – iekārtas izkārtojums.

Adsorbīvā gaisa žāvētava (8.4. att. un 8.5. att.) piesaista gaisā esošo mitrumu uz silikagela (adsorbenta) virsmas, tādējādi to žāvējot. Ar mitrumu piesātināto žāvēšanas aģentu – adsorbentu – iespējams reģenerēt. Lai realizētu nepārtrauktu gaisa adsorbīvo žāvēšanu, iekārtā izmanto divas kolonnas, kurām periodiski tiek mainīts darba režīms – vienā kolonnā notiek adsorbīva žāvēšana, otrā adsorbenta reģenerācija.

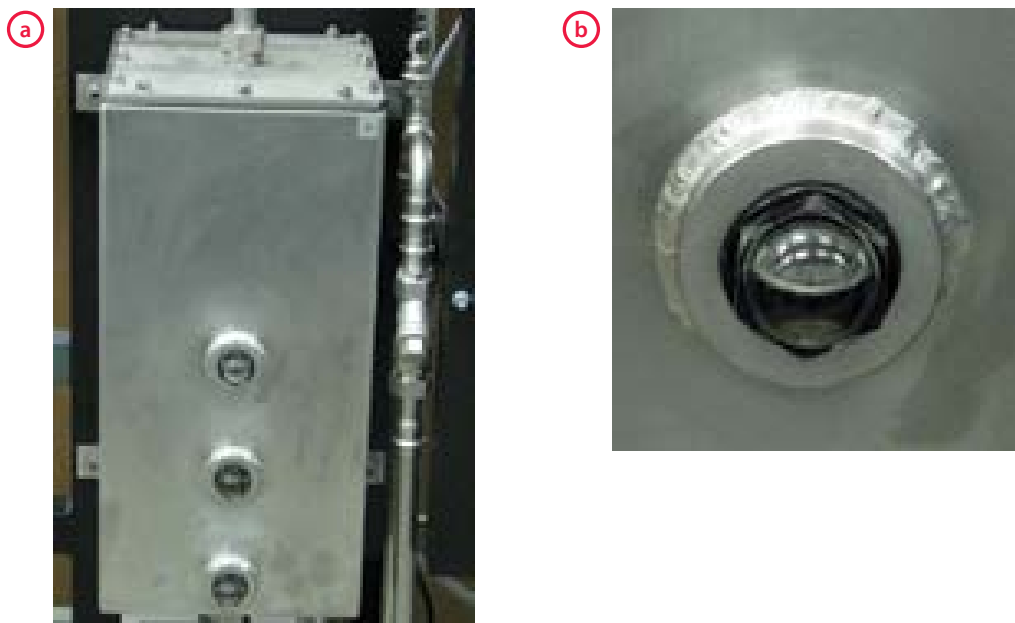
Iekārtas darbībai nepieciešams savienojums ar datoru, kurā ir uzinstalēta atbilstoša programmatūra!

Adsorbcijas-desorbcijas kolonnas (8.5. att.). Kolonnas (15 un 16) veidotas no caurspīdīga materiāla un ir pildītas ar silikagelu. Iekārtā paralēli notiek gan mitra gaisa žāvēšana – adsorbcijas process, gan adsorbenta reģenerācija – desorbcijas process. Attiecīgi, kad konkrētais process kolonnā realizēts, to pārslēdz otra procesa realizēšanas režīmā. Režīmu maina pārslēdzot trīsceļu krānus (12 un 18).

Adsorbcijas procesa laikā no žāvējamā gaisa, uz kolonnā iepildītā silikagela virsmas tiek saistīts mitrums. Mitrā/žāvējamā gaisa plūsma shematiski (8.4. att. un 8.5. att.) attēlota ar zilu krāsu. Adsorbentam (silikagelam) sasniedzot zināmu mitruma piesātinājumu, nepieciešams to reģenerēt – veikt mitruma desorbciju, lai to atkal sekmīgi varētu izmantot. Reģenerāciju veic ar sausu, karstu gaisu, to pūšot caur kolonnu. Adsorbentu reģenerējošā gaisa plūsma shematiski (8.4. att. un 8.5. att.) attēlota ar sarkanu krāsu.

Žāvējamā gaisa plūsma. Kompresors (21) iesūc gaisu caur filtru (2), kurš attīra to no putekļiem un cietajām daļiņām. Starp gaisa filtru un kompresoru līnijā uzstādīts gaisa plūsmas mērītājs (4) un plūsmas regulēšanas ventilis (6). Pēc kompresora saspiestais gaiss plūst uz mitrināšanas tvertni (20). Mitrināšanas tvertnē (20) gaiss barbotē caur ūdens slāni. Tālāk gaiss tiek uzsildīts ar elektrisko sildītāju (23). Adsorbcijai sagatavotā gaisa parametrus – temperatūru un mitruma saturu – iegūst no sensoru bloka (19). Mitrais gaiss tiek ievadīts adsorbcijas kolonnā (15) no apakšas. Pēc gaisa adsorbīvās žāvēšanas tā parametrus – temperatūru un mitruma saturu – iegūst izmantojot sensoru bloku (11).

Gaisa mitrināšana (8.6. att.). Gaisa mitrināšanas tvertnē esošajam ūdenim tiek nodrošināta cirkulācija caur dzesētāju (1) ar sūkni (22). Tas nepieciešams, lai uzturētu konstantu ūdens temperatūru, līdz ar to tiek nodrošināta konsekvanta gaisa mitrināšana. Mitrinot gaisu, tiek patērēts ūdens, tāpēc mitrinātāja tvertne aprīkota ar trīs līmeņa indikatoriem (sk. 8.6. att.). Nepieciešamības gadījumā jāveic ūdens papildināšana.

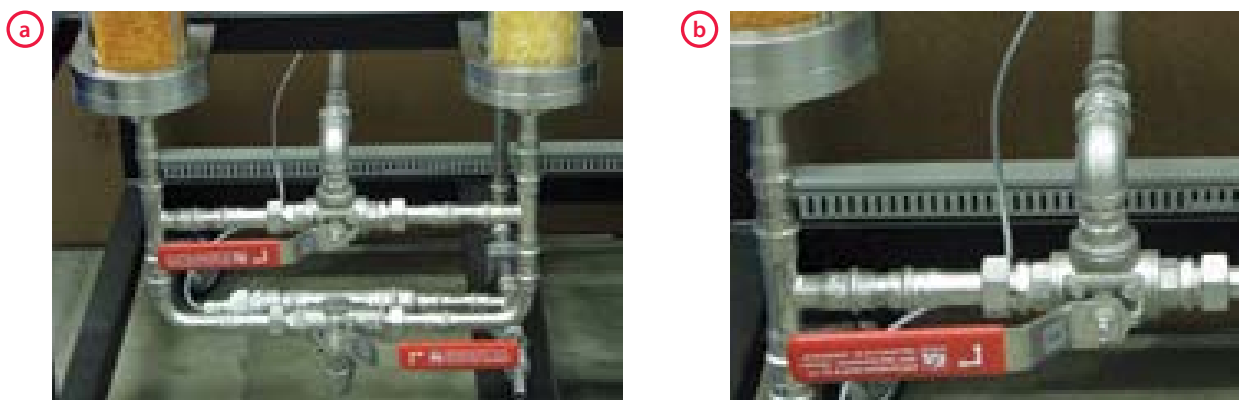


8.6. att. Mitrinātājs (a) un līmeņa indikators (b).

8.

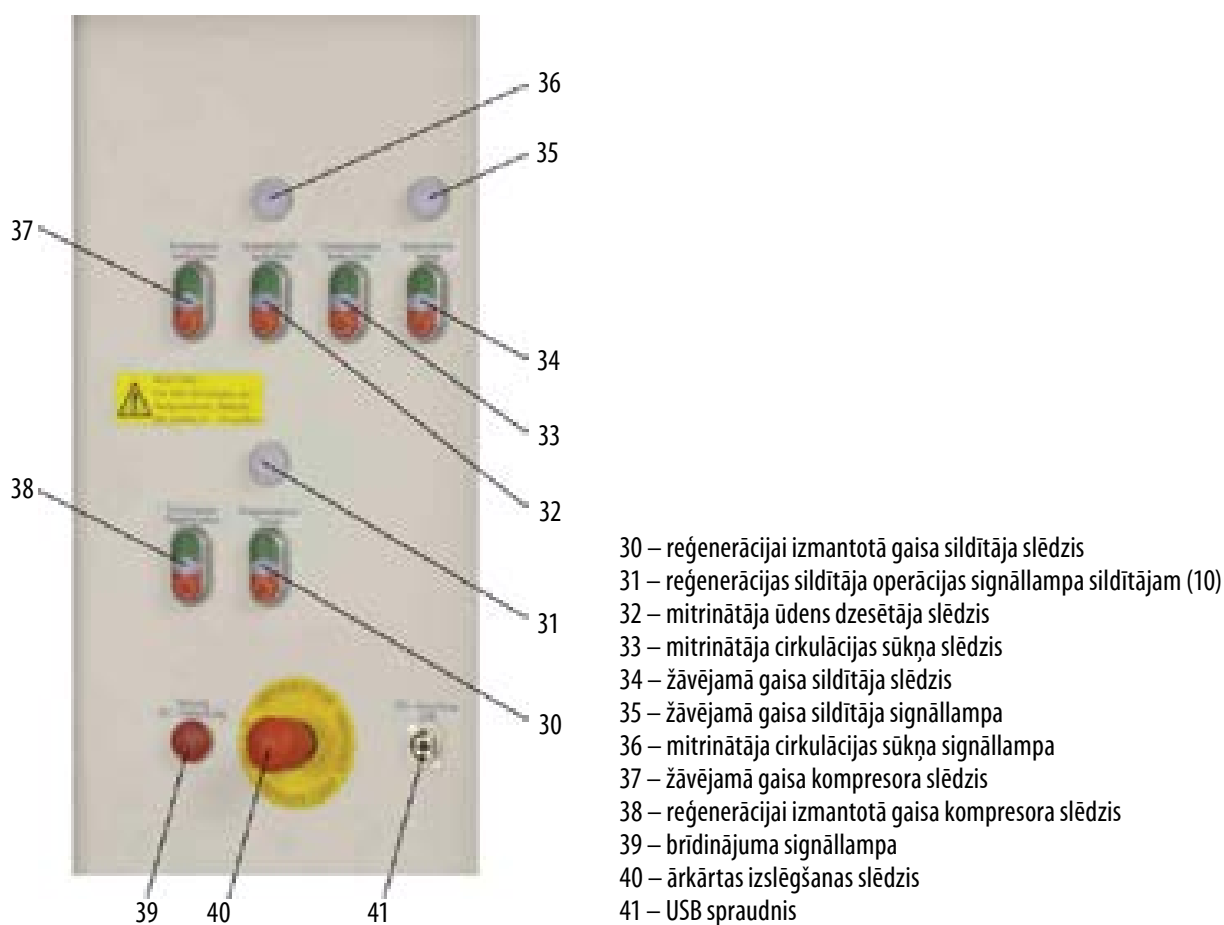
Desorbcija. Adsorbcijas kolonnas reģenerāciju jeb desorbcijas procesu realizē ar sausu, karstu gaisu. Gaisa plūsmu desorbcijas procesam nodrošina kompresors (9). Gaisa ieplūde iekārtā organizēta analogiski žāvējamā gaisa ieplūdei: gaisa filtrs (3), plūsmas mērītājs (5) un plūsmas regulēšanas ventis (7). Pēc kompresora saspiestais gaiss plūst uz sildītāju (10). Uzsildītā gaisa temperatūru nosaka ar temperatūras sensoru (13). Arī desorbcijas procesā gaiss tiek ievadīts kolonnā (16) no apakšas. Atstrādātā gaisa parametrus – mitrumu un temperatūru – nosaka ar sensoru bloku (17). Reģenerācijas procesa dinamiku kontrolē salīdzinot atstrādātā gaisa parametrus ar apkārtējās vides gaisa parametriem. Apkārtējās vides gaisa parametrus iegūst ar sensoru bloku (14).

Trīsceļu krāni. Uz trīsceļu krānu svirām ir piktogrammas – divas bultiņas (8.7. att.), kuras norāda krāna stāvokli. Bultiņas norāda kuri cauruļvadi ir savstarpēji savienoti. Tas ļauj ātri un nekļūdīgi pārslēgt plūsmas režīmus.



8.7. att. Trīsceļu krāni adsorbcijas iekārtā (a) un trīsceļu krāna svira (b).

Sildītāji. Gan žāvējamā gaisa sildītājs (23), gan reģenerācijā izmantotā gaisa sildītājs (10) ir aizsargāts pret termisko pārslodzi. Sildītājos ir iestrādāts termopāris, kas mēra sildītāja virsmas temperatūru, atslēdzot to pie noteiktas temperatūras. Sildītāji tiek ieslēgti tikai tad, ja pievadītā gaisa ražība ir lielāka par 1 m³/h. Ilustrācijā zemāk ir sniegts pārskats par elektrisko ierīču pārslēgšanas un vadības funkcijām, kas atrodas uz kontroles paneļa (8.8. att.).



8.8. att. Adsorbīvas gaisa žāvēšanas iekārtas vadības panelis.

8.7. Darba gaita

Iekārtas (sistēmas) ieslēgšana

1. Pievienojiet iekārtu elektrotīklam.
2. Pievienojiet iekārtu datoram ar USB kabeli (palaist atbilstošo programmu).
3. Ar galveno slēdzi ieslēdz iekārtu.
4. Atveriet krānu V7, lai uzpildītu mitrinātāja ūdens tvertni.
5. Uzpildiet mitrinātāja tvertni ar ūdeni līdz augstākajam līmeņa indikatoram.
6. Aizveriet krānu V7.
7. Ieslēdziet mitrinātāja ūdens cirkulācijas sūkni.
8. Datorprogrammā iestatiet nepieciešamās parametru vērtības (varat izmantot noklusējuma vērtības).
9. Konfigurējiet reģistrējamo parametru ieraksta failu.
10. Datorprogrammā uzsāciet parametru automātisku reģistrēšanu.
11. Vadības panelī ieslēdziet kompresorus un cirkulācijas sūkni.
12. Ieslēdziet abus sildītājus.
13. Iestatiet nepieciešamo gaisa plūsmu ražības.
14. Veiciet adsorbcijas un desorbcijas eksperimentu, kad nepieciešams, pārslēdziet kolonnu darba režīmu.

Iekārtas (sistēmas) izslēgšana

1. Saglabājiat eksperimenta datu failu.
2. Izslēdziet sildītājus.
3. Izslēdziet mitrinātāja cirkulācijas sūkni un gaisa kompresorus.
4. Aizveriet datorprogrammu un izslēdziet datoru.
5. Izslēdziet iekārtas galveno slēdzi.
6. Sakārtojiet darba vietu.

8.8. Kontroljautājumi

- ♦ Kas ir adsorbīva gaisa žāvēšana?
- ♦ Kas ir adsorbcijas izoterma?
- ♦ Kas ir adsorbcijas fronte?
- ♦ Kas ir procesa izejas līkne?
- ♦ Kur izmanto adsorbcijas žāvēšanu rūpniecībā?

9. CIETU MATERIĀLU SMALCINĀŠANA UN KLASIFIKĀCIJA

9.1. Teorētiskais pamatojums

Pirms materiāli un izejvielas tiek pakļautas ķīmiskajai vai citāda veida pārstrādei, tie ir jā sagatavo. Tas nozīmē, ka jā optimizē daļiņu forma un izmērs, lai sekojošā procesā iegūtu optimālo iznākumu. Praktiski visu fizikālo un ķīmisko procesu intensitāte, kuros piedalās cietas vielas, pieaug, pieaugot to īpatnējai virsmai. Līdz ar to parasti ir nepieciešams iegūt mazāka izmēra daļiņas, tās drupinot vai smalcinot. Drupināšana un smalcināšana ir ķermeņa izmēru mehāniska samazināšana no sākotnējā izmēra līdz nepieciešamajam.

Rupjo smalcināšanu (drupināšanu) veic drupinātājos, bet smalko smalcināšanu (malšanu) – dzirnavās. Parasti, lai iegūtu augstu smalcināšanas pakāpi, smalcināšanas procesu veic vairākās stadijās.

9.2. Smalcināšanas teorētiskie pamati

9. Atkarībā no spēka pielikšanas virziena un tā darbības ilguma izšķir šādus smalcināšanas paņēmienus: spiešana, sišana, beršana, skaldīšana, ciršana un laušana. Praktiski visos smalcinātājos vienlaikus realizējas šīs materiāla sloņošanas paņēmieni kombinācijas, piemēram, berzes-spiešanas smalcināšana. Atkarībā no materiāla veida izvēlas smalcināšanas iekārtu, kurā var dominēt viens vai otrs smalcināšanas veids. Izvēloties jāņem vērā materiāla cietība, spiešanas stiprība, mitrums un citi faktori. Piemēram, cietiem un trausliem materiāliem rekomendē iekārtas, kurās dominē spiešana kombinācijā ar sišanu un/vai skaldīšanu.

Smalcināšanas procesu raksturo smalcināšanas pakāpe. Attiecību starp vidēja lieluma gabalu diametru pirms d_s un pēc smalcināšanas d_b sauc par lineāro smalcināšanas pakāpi:

$$i = \frac{d_s}{d_b}. \quad (9.1)$$

Tā kā cieta materiāla daļiņas ir neregulāras formas, aprēķinos izmantoto ekvivalento diametru vai daļiņu izmērus, ko novērtē ar sietu analīzi. Atkarībā no smalcināšanas iekārtas pielietojuma mainās smalcināšanas pakāpe, kas drupināšanas iekārtās sasniedz $i = 3$ līdz 8, smalkās malšanas iekārtām līdz $i = 100$.

Smalcināšanu pēc daļiņu sākuma un beigu lieluma iedala vairākās stadijās (9.1. tabula):

9.1. tabula

Smalcināšanas klasifikācija

Smalcināšanas stadija	Gabalu izmērs, mm	
	d_s	d_b
Rupjā drupināšana	>500	>50
Smalkā drupināšana	50–100	4–20
Rupjā malšana	5–50	0,5–5
Smalkā malšana	1,0–10	0,05–0,5
Koloīdā malšana	<0,1	<0,001

Smalcināšana ir ļoti energoietilpīgs un neefektīvs process. Lai materiālu sagrautu, ārējiem spēkiem jāpārvar materiāla daļiņu savstarpējās saistīšanās spēki, kas ir atkarīgi no materiāla ķīmiskās struktūras, porainības, mikroplaisu klātbūtnes utt. Darbs, kas tiek tērēts smalcināšanai, summējas no vairākiem lielumiem:

- 1) darbs smalcināmā materiāla gabalu tilpuma reformācijai;
- 2) darbs jaunu virsmu radīšanai, samazinoties gabalu izmēriem;
- 3) darbs siltuma radīšanai, darbojoties smalcināšanas iekārtai, kas tiek lietderīgi tērēts apkārtējā vidē.

Materiāls ārējā spēka ietekmē grūst vājākajos posmos. Daļiņu izmēram samazinoties, vājo posmu daudzums samazinās, materiāla izturība pieaug, smalcināšanai patērētā enerģija strauji palielinās. Smalcināšanai patērētā darba noākšana smalcināšanas teorijā ir galvenā problēma.

Pirmais ar to sāka nodarboties kalnu inženieris P. Ritingers (*Peter von Rittinger*). Viņa piedāvātā virsmas teorija pamatojas uz to, ka smalcinot darbs tiek tērēts, lai materiāla lūzuma virsmās pārvarētu molekulārās pievilksnās spēkus, t.i., no jauna izveidotās virsmās. Viņš 1867. gadā izvirzīja šādu hipotēzi: smalcināšanai nepieciešamais darbs ir proporcionāls smalcinātā materiāla no jauna izveidotajām virsmām. Matemātiski to var aprakstīt šādi:

$$A_s = K_R \cdot \Delta S = K_R \cdot D^2, \quad (9.2.)$$

kur ΔS – jaunizveidotās virsmas;

D – gabala izmērs, m, $\Delta S \sim D^2$;

K_R – proporcionalitātes koeficients.

1885. gadā F. Kiks (*Friedrich Kick*) piedāvāja smalcināšanas tilpuma teoriju. Pēc šīs teorijas smalcinot darbs tiek tērēts materiāla deformācijai pirms tā sagraušanas. No tā seko, ka darbs, kas nepieciešams smalcināšanai, ir proporcionāls materiāla gabalu tilpuma samazinājumam pirms sagraušanas:

$$A_V = K_K \cdot \Delta V = K_K \cdot D^3, \quad (9.3.)$$

kur ΔV – tilpuma izmaiņas, $\Delta V \sim D^3$;

K_K – proporcionalitātes koeficients.

Formulas (9.2.) un (9.3.) izsaka sakarību starp minimāli nepieciešamo enerģiju, lai sagrautu vienu noteikta izmēra materiāla kubiskas formas graudu.

Veicot materiālu drupināšanu ar tai sekojošu malšanu, nepieciešamā enerģija kubiska gabala sagraušanai un graudu veidošanai no tā ir proporcionāla tā sagraušanas vidējai ģeometriskai enerģijai. Šādu pieeju Izstrādāja F. Bonds (*Fred Chester Bond*) un 1950. gadā izvirzīja savu smalcināšanas hipotēzi: smalcināšanas darbs var tikt noteikts kā vidējais ģeometriskais no materiāla tilpuma izmaiņām patērētā darba un jaunas virsmas izveidošanas darba. No (9.2.) un (9.3.) vienādojumiem seko:

$$A = A_S + A_V = K_B \cdot \sqrt{D^2 \cdot D^3} = K_B \cdot D^{2.5}. \quad (9.4.)$$

No vienādojumiem (9.2.), (9.3.) un (9.4.) izriet, ka minimālā enerģija kubiska gabala vai grauda sagraušanai var tikt noteikta pēc kopīga vienādojuma:

$$A = K \cdot D^m. \quad (9.5.)$$

Šajā formulā pakāpes rādītājs var mainīties no 2 līdz 3, turklāt proporcionalitātes koeficienti K_R , K_K un K_B ir atšķirīgi un atkarīgi no materiāla īpašībām. Pamatojoties uz šīm formulām, ir izvesti vienādojumi lietderīgā darba aprēķinam, lai sadrupinātu un/vai samaltu tilpuma vienību konkrēta materiāla.

Materiālu smalcināšana notiek smalcināšanas mašīnās. Tās iedala drupinātājos un smalcinātājos jeb dzirnavās. Par drupinātājiem sauc mašīnas, kuras lieto rupjai un vidējai drupināšanai. Par dzirnavām sauc mašīnas, kuras lieto smalkai un koloīdai malšanai. Ir gadījumi, kad atkarībā no galaprodukta izmēriem vienai un tai pašai mašīnai ir dažāds pielietojums.

Pēc konstruktīvām pazīmēm galvenās smalcināšanas mašīnas iedala šādi: žokļa drupinātāji; koniskie drupinātāji; veltņa drupinātāji; dezintegratori; skrejdzirnavas; ložu dzirnavas; koloidālās dzirnavas u. c.

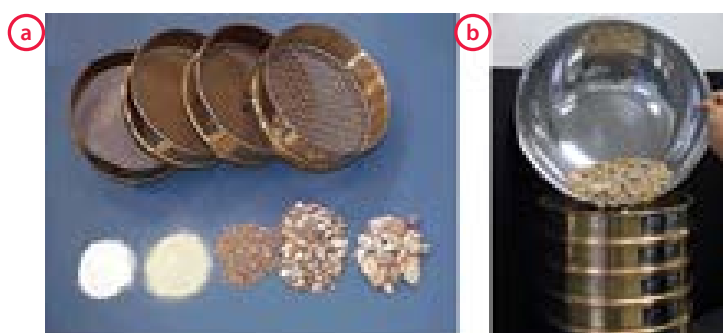
Koniskie drupinātāji lietojami rupjai, vidējai un smalkai smalcināšanai.

9.3. Cietu materiālu šķirošana (klasifikācija)

Sasmalcinātos materiālus klasificējot, sadala frakcijās (klasēs), kuras ierobežo noteikts daļiņu izmērs. Izmantojot klasifikāciju, ir iespējams no polidispersa maisījuma izdalīt šauras graudaino materiālu frakcijas, kas vislabāk atbilst konkrētā tehnoloģiskā procesa nosacījumiem. Ķīmiskajā tehnoloģijā galvenā metode materiālu klasifikācijai ir sijāšana.

Sijāšana ir graudaina, birstoša materiāla sadalīšana atsevišķās klasēs pēc graudu izmēriem uz sieta vai režģa iekārtās, ko sauc par sietiem vai kretuļiem. Sijāšanas procesu pamatā ir graudu izkrišana caur noteikta izmēra caurumiem vai acīm, mazākie graudi izkrīt cauri sietam, lielākie paliek virs sieta. Lietojot dažāda izmēra sietu komplektu, vienlaikus iegūst vairākas klases, katrā no tām graudu izmērs ir noteikta diapazona robežās. Ražošanā sijāšanu klasifikācijai izmanto birstošiem materiāliem, kuru graudu izmērs ir robežās no 200 μm līdz 1 mm. Sijājot laboratorijas apstākļos, var sadalīt maisījumus, kuru graudu izmērs ir lielāks par 0,04 milimetriem.

Pētāmā materiāla graudu lieluma noteikšanu, sijājot to caur standartizētu sietu komplektu, sauc par sietu analīzi (9.1. att.).



9.1. att. Sietu analīze: (a) dažādi sieti ar frakcijām; (b) sieti darba kārtībā.

Sietu analīzei izmanto standartizētu sietu skalu ar kvadrātveida acīm, kuru lielumu nosaka minimālais attālums starp stieplēm, ko mēra milimetros vai mikronos. Saskaņā ar DIN ISO 3310 (GOST 6613-86) standartu normām sieta numurs atbilst nominālam kvadrātveida acs malas izmēram milimetros. ASV un Anglijā sietus raksturo arī ar skaitli “meš”, kas atbilst kvadrātveida acu skaitam vienā collā (25,4 mm) sieta. Piemēram, sieta Nr. 170 (170 meš) ir 170 acis vienā collā.

Sijāšanas procesā dispersā daļiņa tiek salīdzināta ar sieta acs izmēru. Daļiņas, kas ir lielāks par šo izmēru, paliek uz sieta, tas ir tā sauktais augšējais produkts. Mazāka izmēra daļiņas izkrīt cauri sietam uz nākamo sietu, tas ir apakšējais produkts. Katram nākamajam sietam ir mazāks acu izmērs, uz tā atkārtoti notiek pētāmā materiāla dalījums augšējā un apakšējā produktā.

Caur pēdējo sietu izbirušo produktu savāc sietu šķīvī. Starpību starp augšējā sietā, caur kuru produkts ir izbiris, acs izmēriem un apakšējā sietā, uz kura produkts ir palicis, izmēriem sauc par dispersā materiāla lieluma klasi, bet attiecīgo birstošo materiālu par frakciju. Atlikums uz sietā atbilst noteiktai lieluma klasei vai frakcijai.

Pēc sadalīšanas katru frakciju nosver. Iegūtos rezultātus izsaka procentos no iesvara, tos ieteicams attēlot noteiktas formas tabulās un grafiskā veidā (9.1. att. un 9.2. tabula). Frakcijas A procentuālo saturu nosaka pēc šāda vienādojuma:

$$A = \frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n} \cdot 100 \%, \quad (9.6.)$$

kur a_1, a_2, \dots, a_n – frakciju masa.

Daļiņu vidējo izmēru var noteikt kā vidējo aritmētisko no augšējā un apakšējā sietā izmēriem.

9.2. tabula

Sietu analīzes piemērs un rezultātu novērtējums

Nr.	Sietā acs izmērs, μm	Frakcijas lielums, μm	Daļiņas vidējais lielums, $d_{\text{vid}}, \mu\text{m}$	Atlikums uz sietā, g	Atlikuma daļa A, %	Atlikuma summa, %
1	630	630...	–	0	0	0
2	500	500–630	565	61	6,2	6,2
3	400	400–500	450	11,2	11,3	17,5
4	315	315–400	357	14,8	15,0	32,5
5	200	200–315	257	20,3	20,5	53,0
6	140	140–200	150	25,2	25,5	78,5
7	100	100–140	120	16,2	16,4	94,9
8	63	63–100	82	5,1	5,1	100
			Kopā	98,9		

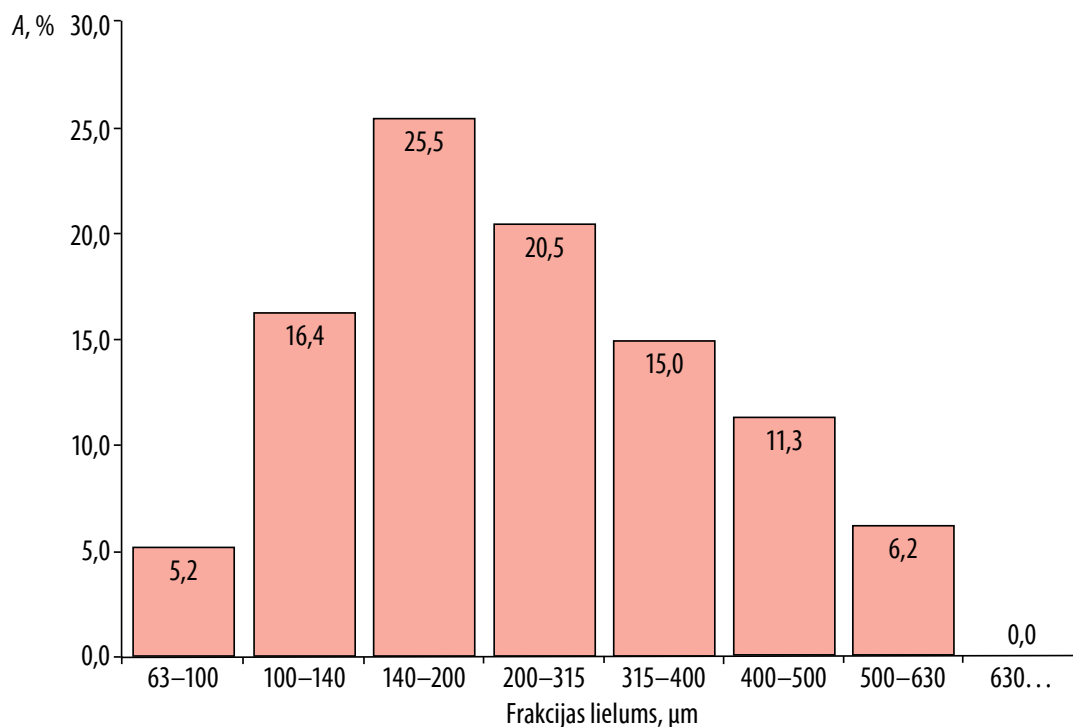
Sietu analīzes piemērs un iegūto rezultātu izvērtējums parādīts tabulā (9.2. tabula). Ja katras frakcijas atlikuma daļas A (%) atliek diagrammas veidā, iegūst birstošā materiāla sadalījumu pēc daļiņu lieluma (9.2. att.).

Piemērs: Daļiņas ar izmēru no 300 līdz 400 μm beramā materiāla masā ir 15 %. Visvairāk sastopamas daļiņas ar izmēru no 140 līdz 200 μm (25 %).

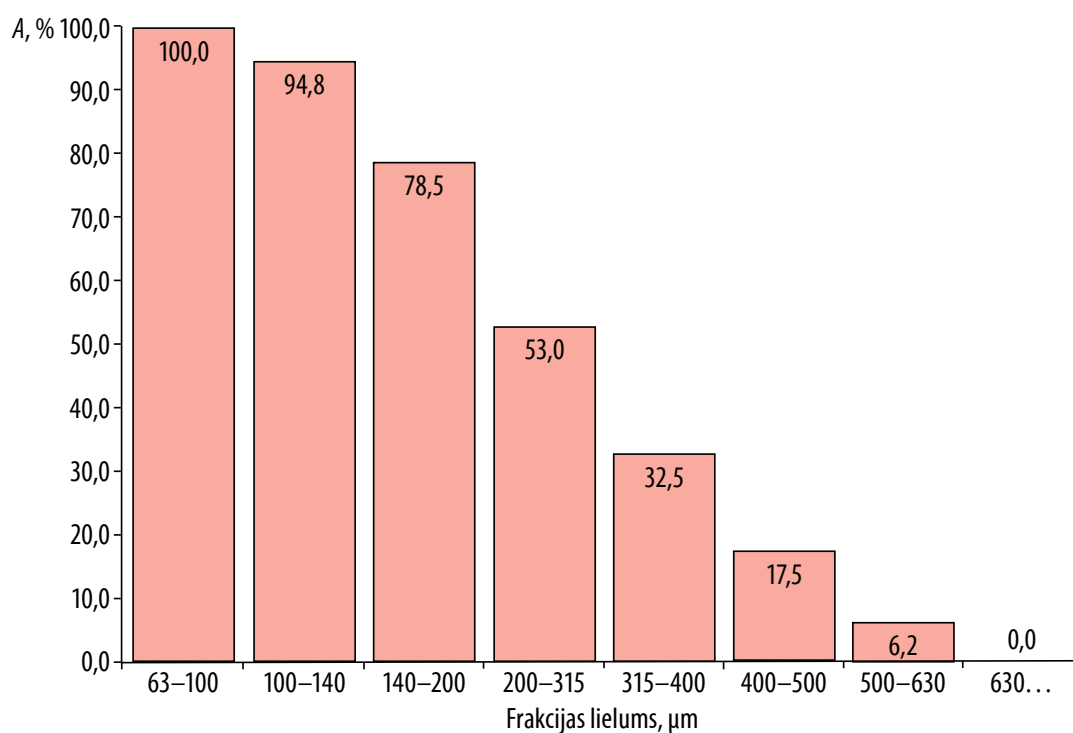
Ja, sākot no sietā ar lielāko acs izmēru, summē atlikuma daļu procentuālo sastāvu, iegūst visu atlikumu summu sietu analīzē, kas kopā ir 100 % (9.2. tabula, pēdējā kolonna). Ja šo rādītāju attēlo kā funkciju no attiecīgo frakciju lieluma, iegūst atlikuma summas diagrammu (9.3. att.). Pēc tās var noteikt, cik

liela birstošā materiāla masas daļa ir lielāka par noteikta izmēra graudiem.

Piemērs: Konkrētajā materiāla bērumā (9.3. att.) 53 % no kopējās masas ir ar graudu izmēru lielāku par 200 μm .



9.2. att. Daļiņu lieluma sadalījuma diagramma.



9.3. att. Atlikuma summas diagramma.

9.4. Eksperimentālo datu iegūšana un apstrāde

1. Aprēķina smalcināmā materiāla sākotnēju vidējo izmēru, d_s .

Brīvi izvēlas 10 drupināmā materiāla gabalus un nosaka to:

- 1) garākā “diametra” jeb garuma vidējo vērtību;
- 2) īsākā “diametra” jeb platuma vidējo vērtību;
- 3) absolūto vidējo diametru, d_s .

9.3. tabula

Smalcināmā materiāla izmēru tabulas piemērs

Nr.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	Vid.	d_s
d_{gar} , mm	23	19	11	14	11	20	15	20	16	17	16,6	13,5
d_{pl} , mm	10	11	9	8	7	8	12	15	10	13	10,3	

2. Aprēķina sasmalcinātā materiāla vidējo izmēru (9.7.):

$$d_b = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_i}}, \quad (9.7.)$$

kur d_b – sasmalcinātā materiāla vidējais izmērs;

x_i – i -tās frakcijas masas daļa;

d_i – vidējais i -tās frakcijas siets (izmērs).

3. Aprēķina smalcināšanas pakāpi i .

4. Aprēķina materiāla beramo blīvumu (9.8.):

$$\rho_{ber} = \frac{m_{ber}}{V_{ber}}. \quad (9.8.)$$

5. Aprēķina drupinātāja teorētisko ražību (9.9.):

$$Q_t = k_p D_n c e n \pi, \quad (9.9.)$$

kur Q_t – teorētiskā drupinātāja ražība;

k_p – sasmalcināmā materiālā irdenuma koeficients ($k_p = 0,7$);

D_n – smalcināšanas konusa pamatnes diametrs;

c – paralēlās drupināšanas zonas garums kamerā;

e – izejas spraugas platums;

n – konusa rotācijas ātrums;

π – konstante (3,14).

6. Aprēķina reālo drupinātāja ražību (cm^3/s un kg/h) (9.10.):

$$Q_r = \frac{V_{ber}}{\tau_s} = \frac{m_{ber}}{\rho_{ber} \cdot \tau_s}. \quad (9.10.)$$

7. Aprēķina teorētisko jaudu, kas tiek patērēta drupinot materiālu (9.11.):

$$N_T = 12,6D_n^2n, \quad (9.11.)$$

kur N_T – teorētiskā jauda (W);

n – konusa frekvence (s^{-1});

D_n – smalcināšanas konusa pamatnes diametrs (cm).

8. Aprēķina reālo jaudu, N_r , kas patērēta drupinot materiālu (9.12.):

$$N_r = N_{tg} - N_{dg}, \quad (9.12.)$$

kur N_r – reālā jauda;

N_{tg} – tukšgaitā patērētā jauda;

N_{dg} – darba gaitas jauda.

N_{tg} un N_{dg} tiek aprēķinātas šādi (9.13.) un (9.14.):

$$N_{tg} = I_{tg}U_{tg}, \quad (9.13.)$$

$$N_{dg} = I_{dg}U_{dg}, \quad (9.14.)$$

kur I_{tg} – strāvas patēriņš tukšgaitā;

I_{dg} – strāvas patēriņš darba gaitā;

U_{tg} – sprieguma patēriņš tukšgaitā;

U_{dg} – sprieguma patēriņš darba gaitā.

9. Aprēķina īpatnējo enerģijas patēriņu N_{ip} (9.15.):

$$N_{ip} = \frac{N_r}{Q_r}. \quad (9.15.)$$

10. Aprēķina drupinātāja efektivitāti E (9.16.):

$$E = \frac{Q_r}{N_r}. \quad (9.16.)$$

11. Analizē rezultātus un izdara secinājumus.

9.5. Darba uzdevumi

- ♦ Iepazīties ar dzirnavu konstrukciju.
- ♦ Novērtēt dzirnavu darbības efektivitāti pie trīs dažādām smalcināšanas pakāpēm.
- ♦ Grafiski attēlot dotā materiāla granulometrisko sastāvu pēc malšanas.
- ♦ Noteikt smalcināšanas procesam nepieciešamo enerģiju un citus lielumus, kas minēti eksperimentālo datu apstrādes sadaļā.

9.6. Iekārtas apraksts

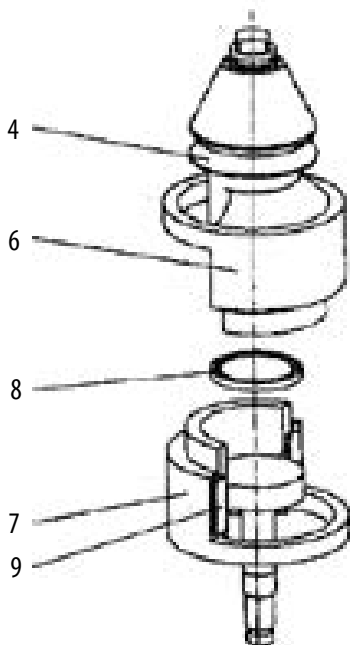
Vibrējošas koniskās dzirnavas paredzētas dažādas stiprības un cietības trauslu materiālu drupināšanai un malšanai. Dzirnavu galvenās sastāvdaļas attēlotas 9.4.att. un 9.5.att.: pamatne (1), amortizējoši balsti (2), cilindrisks korpuss (3) konuss (4) un iepildīšanas kauss (5), dzenošais disbalanss un elektromotors (17). Korpuss (3) ir divi savstarpēji vienā asī novietoti cilindri: iekšējais un ārējais. Tie ir savstarpēji saistīti ar apakšējo atloku (jeb flanci) un slīpu kanālu (13), pa kuru sasmalcinātais materiāls virzās uz izkraušanas atveri (10) korpusa apakšējā atlokā (jeb flancī). Pamatnes un iekšējā cilindra veidotajā dobumā izvietots dzenošais (7) un dzītais (6) disbalanss. Kauss (5) ar apakšējo daļu ir ieskrūvēts ārējā korpusa (3) atbalsta vītņē. Augšējā kausa daļa ir izveidota iekraušanas piltuves veidā, bet apakšējā iekšējā – konusa veidā. Kauss (5) ar sprosta skrūvēm (11) ir savienots ar atbalsta vāku (12), kuru pagriežot kauss pa korpusa vītņi izskrūvējas (un ieskrūvējas), kā rezultātā var mainīt attālumu starp kausa konisko daļu (5) un konusu (4). Izvēlētais kausa attālums fiksējas ar sprosta skrūvēm (11). Apakšējā koniskā kausa daļu un konusu no nodilšanas pasargā ieliktni (14), kas izgatavoti no mangāna tērauda. Uz konusa (4) vertikālās vārpstas ir uzmontēts dzenamais disbalanss (6), kas ar pēdu novietots uz dzenošā disbalansa (7) un sfēriskā atbalsta – pēdas gultņa (8) (9.4. att. un 9.5. att.).

9.

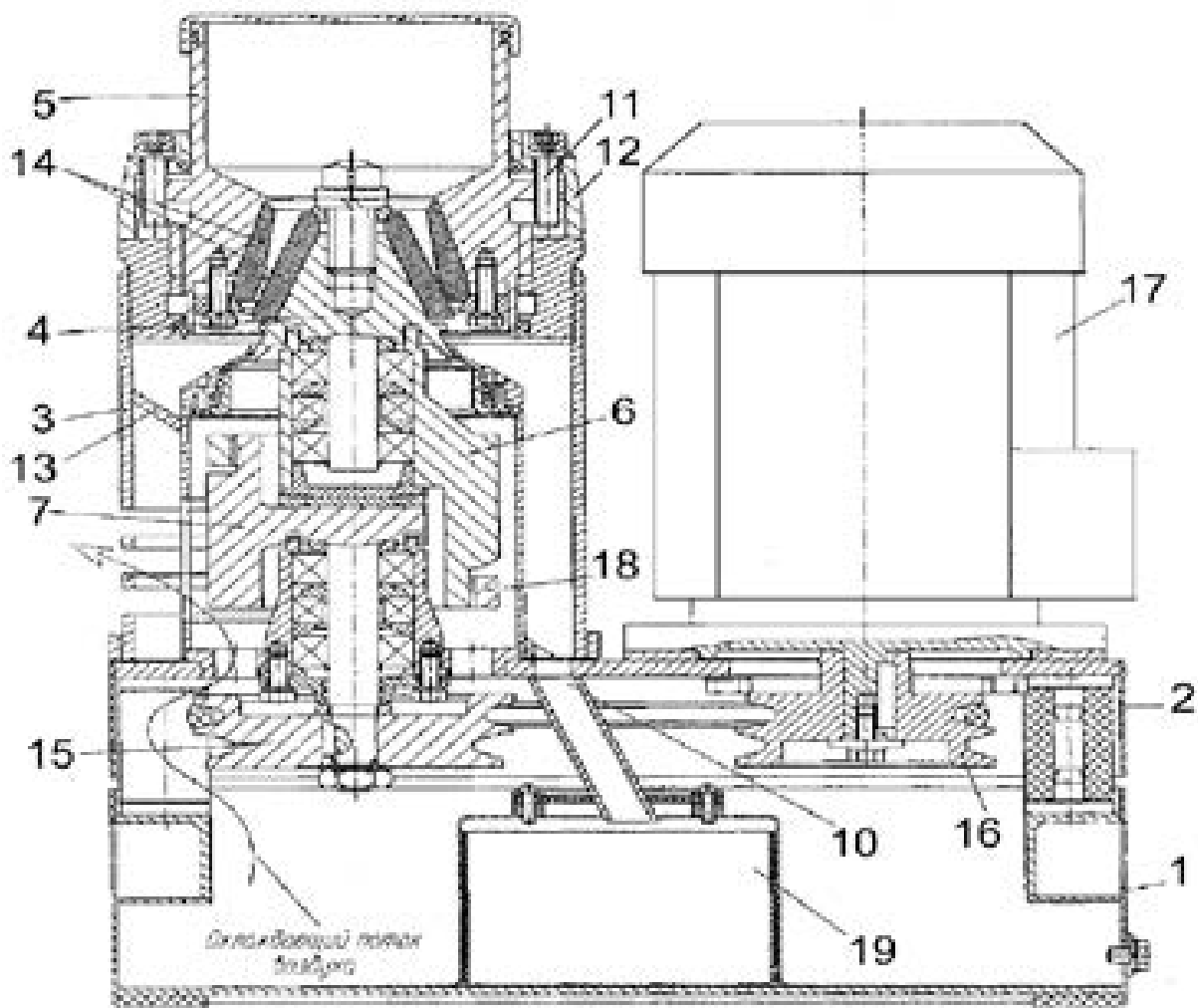
Uz dzenošā disbalansa (7) vārpstas apakšējās daļas nostiprināts dzenamais skriemelis (15) ar trīs ķīļrievām un savienots ar ķīļsiksnu, kas savukārt savienota ar elektromotoru (17) un dzenošo skriemeli (16). Disbalansa rotācija tiek nodrošināta ar gumijas aizbīdņu (9) palīdzību. Gredzens (18) ir paredzēts dzenamā disbalansa (6) svārstību amplitūdas ierobežošanai, nosakot smalcināšanas konusa (4) slīpuma leņķi. Produkta izkraušana tvertnē (19) notiek pa izkraušanas atveri (10). Attāluma mērīšanu starp kausu un konusu veic ar korpusa un vāka atzīmju palīdzību.

Smalcināšanas kamerai, ko veido konusa un kausa virsmas, ir divas smalcināšanas zonas: augšējā ķīļveida un apakšējā paralēla. Līdz dzirnavu ieslēgšanai izkraušanas sprauga ir vienāda ar S , turklāt disbalansu asis sakrīt un attālums starp disbalansu un ierobežojošo gredzenu (18) ir maksimāls (9.4. att. un 9.5. att.).

Elektromotors griež dzenošo disbalansu, kurš ar ķīļsiksniem rotācijas kustību pievada dzenamajam disbalansam. Rezultātā attālums starp ieliktniem no vienas puses samazinās līdz S_1 , bet no otras – palielinās līdz S_2 . Spraugas lielums Δ ir atkarīgs no smalcināmā materiālā slāņa biezuma S_1 un var būt vienāds ar $0 \dots 2\Delta$.



9.4. att. Dzenošā un dzenamā disbalansa mezgla uzbūve.



9.5. att. Vibrējošu konisko dzirnavu uzbūve (iekārtas kinemātiskā shēma).

Smalcināmais materiāls no iekraušanas piltuves nonāk smalcināšanas kamerā. Materiāla daļiņas iekļējas starp ieliktnu virsmām un smalcināšanas konusa iedarbē tiek pakļautas spiedes un bīdes deformācijām. Rezultātā notiek materiāla pirmssmalcināšana. Tālāk materiāla daļiņas nonāk paralēlajā smalcināšanas kameras zonā, kur notiek smalcināšana līdz noteiktajam izmēram. Materiāla pārvietošanās smalcināšanas kamerā un produkta izkraušana vibrācijas iedarbē notiek nepārtraukti.

9.7. Darba gaita

1. Noregulē attālumu starp dzirnavu konusu virsmām. Attāluma regulēšana tiek veikta pie *izslēgtām dzirnavām* šādā secībā:
 - ♦ atbrīvo skrūves;
 - ♦ ar vāka rokturu palīdzību ieregulē kausu (5). Vāka atzīme, kas atrodas iepretī korpusa atzīmei, ir atskaites punkts;
 - ♦ atskrūvē kausu līdz nepieciešamajam attālumam starp konusu virsmām, kausa pagriešana par vienu atzīmi izmaina attālumu par 0,25 mm, bet pilns apgriezums par 6 mm. *Maksimālā pieļaujamā atstarpe starp konusiem ir 1,25 kausa apgriezumi no nulles pozīcijas jeb aptuveni 7 mm.*
2. Pievelk kausa skrūves.
3. Pārbauda, vai uztveršanas tvertne ir iztukšota.
4. Sagatavo trīs paraugus ar zināmu masu (apmēram 250 g).
5. Ieslēdz iekārtu un nosaka vibrējošā konusa apgriezienu skaitu minūtē.
6. Nolasa ampērmetra un voltmetra rādījumu iekārtas brīvgaistā.
7. Pie ieslēgtām dzirnavām to kausā *nelielās porcijās* ievieto nosvērto paraugu. Malšanas laikā nolasa ampērmetra un voltmetra rādījumu.
8. Izmantojot sietus, nosaka materiāla izmēru sadalījumu.
9. Maina dzirnavu darbības režīmu, izmainot konusa (kausa) apgriezienu skaitu un atkārti darbības 2–7.
10. Rezultātus apkopo, kā parādīts tabulā (9.2. tabula).
 - ♦ Ieteicams lietot gumijas cimds, darba virsvalku un respiratoru. Obligāti lietot aizsargbrilles!
 - ♦ Aizliegts regulēt kausa (5) novietojumu dzirnavu darbības laikā!
 - ♦ Nebērt smalcināmo materiālu izslēgtā iekārtā! Bēršanas laikā jāizvairās no nesasmalcināmu materiālu iekļūšanas dzirnavās.
 - ♦ Drupināšanas mērījumus sāk brīdī, kad materiāls tiek iebērts smalcināšanas kamerā, un beidz, kad izbirst piedējās produkta daļiņas.

9.8. Kontroljautājumi

- ◆ Aprakstiet konusveida dzirnavu priekšrocības, trūkumus un piemērotāko lietošanas jomu.
- ◆ Izskaidrojiet vibrējošo konusveida dzirnavu uzbūvi un to darbības principu.
- ◆ Kāpēc konusa dzirnavu konstrukcijā nav masīva spararata?
- ◆ Izskaidrojiet vibrācijas nozīmi dzirnavu darbībā.
- ◆ Norādiet konusveida dzirnavu satveršanas leņķa noteikšanas nosacījumus.
- ◆ Ko ietekmē smalcināšanas konusa svārstību amplitūda?
- ◆ Kādi drupināšanas un smalcināšanas veidi tiek izmantoti koniskajās dzirnavās?
- ◆ Aprakstiet konusveida dzirnavu svarīgākos ekspluatācijas noteikumus.
- ◆ Izskaidrojiet irdenuma koeficienta jēgu un tā ietekmi uz drupinātāja ražību.
- ◆ Norādiet, kādas ir drupinātāja drošas ekspluatācijas pamatprasības.

Vispārīgie drošības tehnikas un kārtības noteikumi ķīmijas tehnoloģijas laboratorijā

1. Pie darbiem laboratorijā pielaiž tikai tās personas, kuras ir iepazinušās un izpratušas šo darba aizsardzības instrukciju, parakstījušās studentu instruktāžas žurnālā, saņēmušās mācību personāla nepieciešamos norādījumus un atļauju darbam.
2. Laboratorijā nedrīkst strādāt viens pats. Studentiem veikt eksperimentus bez laboranta vai pasniedzēja klātbūtnes laboratorijā ir aizliegts.
3. Nepiederošām personām laboratorijā uzturēties aizliegts.
4. Ikvienam studentam jāzina, kur laboratorijā atrodas pirmās medicīniskās palīdzības komplekts, ugunsdzēsāmie aparāti un kā ar tiem rīkoties.
5. Ikvienam studentam jāzina, kā ugunsgrēka gadījumā evakuēties no telpas un ēkas.
6. Studentus, kuri pārkāpj darba aizsardzības prasības, pie turpmākiem darbiem laboratorijā nepielaiž. Šos studentus no jauna pie laboratorijas darbiem pielaiž ar katedras vai laboratorijas vadītāja atļauju pēc atkārtotas instruktāžas darba aizsardzībā, par ko students parakstās studentu instruktāžas žurnālā.
7. Pirms ieejat laboratorijā, izslēdziet skaņu mobilajam telefonam.
8. Laboratorijā aizliegts uzturēties virsdrēbēs. Valkājiet ērtu apģērbu un stabilus apavus. **Ja tiek pieprasīts, valkājiet ķīmijas laboratorijām paredzētus virsvalkus.** Strādājot laboratorijā, ja jums ir gari mati, tiem jābūt cieši sasietiem aizmugurē un tie nedrīkst aizsegt skatu.
9. Notiekot jebkuram, jūsuprāt pat nenožīmīgam, negadījumam laboratorijā, par to nekavējoties jāziņo laborantam vai pasniedzējam.
10. Laboratorijas telpās aizliegts ēst, dzert, smēķēt [košļāt košļājamo gumiju], kā arī ienest un uzglabāt pārtikas produktus [izņemot dzērienu ar vāciņu].
11. Laboratorijā jāstrādā ļoti uzmanīgi, nesteidzoties un precīzi. Atrodoties laboratorijā, jāuzvedas mierīgi un nosvērti, izvairoties no straujām kustībām.
12. Pirms lieto stikla traukus, rūpīgi jāapskata, vai tie ir tīri un nav bojāti. Nekad nelieto ieplīsušus stikla traukus. Eksperimenti jāveic tīros un drošos traukos.





Pirms darba sākuma

1. Pirms ieejat laboratorijā, izslēdziet skaņu mobilajam telefonam.
2. Pirms laboratorijas darba uzsākšanas rūpīgi jāiepazīstas un jāizprot izmantojamās iekārtas darbības shēma. Ja nav saprotama kādas detaļas vai ventiļa nozīme, vaicāt par to laborantam.
3. Jāiepazīstas ar brīdinājuma zīmēm un frāzēm, kas izvietotas uz iekārtas. Strādājot ar iekārtu, jāievēro iekārtas individuālie drošības norādījumi!
4. Iekārtas drīkst ieslēgt tikai ar pasniedzēja vai laboranta atļauju.

Brīdinājuma zīmes un frāzes uz laboratorijā izvietotajām iekārtām



Brīdinājuma frāzes un zīmes ir izvietotas uz laboratorijas iekārtām, lai lietotāju brīdinātu par potenciālu bīstamību. Drošības frāžu un zīmju skaidrojums apkopots turpmākajāstabulās.

Drošības frāzes un to skaidrojums

Drošības frāze	Skaidrojums
	Norāda situāciju, kas neatbilstošas rīcības gadījumā, var izraisīt nāvi vai nopietnus ievainojumus.
	Norāda situāciju, kas neatbilstošas rīcības gadījumā, var izraisīt nāvi vai nopietnus ievainojumus.
	Norāda situāciju, kas neatbilstošas rīcības gadījumā, var izraisīt nopietnus ievainojumus vai traumas.
	Norāda situāciju, kas neatbilstošas rīcības gadījumā, var izraisīt iekārtas bojājumus vai nepareizu tās darbību.

Drošības zīmes un to skaidrojums

Drošības zīme	Skaidrojums	Rīcība
	Bīstami, elektrība	Iekārta vai tās daļa ir pieslēgta elektrībai, tās atvēršana var izraisīt elektrotraumu.
	Kaitīga vai kairinoša viela	Kaitīga vai kairinoša viela, strādājot ar attiecīgi apzīmētām vielām izvēlieties atbilstošus individuālās aizsardzības līdzekļus.
	Karsta virsma	Iekārta vai tās daļa darbības laikā spēcīgi sakarst. Ja nepieciešama daļu pārvietošana, izmantojiet atbilstošus aizsargcimdus.
	Karsta virsma	Iekārta vai tās daļa darbības laikā spēcīgi sakarst. Ja nepieciešama daļu pārvietošana, izmantojiet atbilstošus aizsargcimdus.
	Karsts tvaiks, pārkarsēts šķidrums	Iekārtas darbības laikā veidojas tvaiks. Ventilū, krānu un iekārtas atvēršana jāveic ar īpašu piesardzību, kā norādīts iekārtas aprakstā.
	Aukstums	Iekārta vai tās daļa darbības laikā spēcīgi atdziest. Ja nepieciešama daļu pārvietošana, izmantojiet atbilstošus aizsargcimdus.
	Roku traumas	Iekārtā ir kustīgas detaļas, kuras var traumēt rokas. Pirms kustīgo daļu nomaiņas pārliecinieties, ka tās ir apstājušās.
	Kodīga viela	Kodīga viela, strādājot ar attiecīgi apzīmētām vielām izvēlieties atbilstošus individuālās aizsardzības līdzekļus. Nodrošiniet drošu tās pārvietošanu un glabāšanu. Izmantojiet traukus un iekārtas, kas paredzētas darbam ar šīm vielām.
	Vispārīga bīstamība	Tikai atbilstoši kvalificēts speciālists drīkst veikt darbības ar iekārtu vai tās daļu.
	Lietot aizsargcimdus	Obligāti jālieto atbilstoši aizsargcimdi.

Drošības zīme	Skaidrojums	Rīcība
	Lietot aizsargbrilles	Obligāti jālieto aizsargbrilles, lai novērstu svešķermeņu iekļūšanu acīs.
	Uzmanību!	Norāda situāciju, kas neatbilstošas rīcības gadījumā var izraisīt iekārtas bojājumus vai nepareizu tās darbību. Strādāt atbilstoši iekārtas aprakstā norādītajā kārtībā.

Darba laikā

1. Studentiem atļauts strādāt tikai viņiem ierādītajā darba vietā.
2. Bez saskaņošanas ar pasniedzēju un tā atļauju studentiem aizliegts laboratorijā veikt jebkurus eksperimentus.
3. Iesākto eksperimentu (ķīmisko procesu vai reakciju) nedrīkst atstāt bez uzraudzības.
4. Stingri aizliegts pārbaudīt ķīmiskās vielas, tās garšojot. Ar jebkuru vielu laboratorijā jāstrādā kā ar indīgu, jo dažas no laboratorijā lietojamajām vielām ir vairāk vai mazāk kaitīgas. Darbojoties ar ķīmikālijām, lietojiet aizsargcimdus un aizsargbrilles.
5. Esiet uzmanīgi, strādājot ar iekārtām, kurās veidojas tvaiks vai spiediens, vai vakuums. Atcerieties, ka jebkurš šķidrums iztvaikojot rada tvaiku, kas savukārt sistēmā rada spiedienu. Retinājums ir tikpat bīstams kā virsspiediens!
6. Ja reaģenta traukam nav etiķetes vai uzraksta, tas nekavējoties jāatdod laborantam. Visi eksperimenti jāveic ar tādiem vielu daudzumu, koncentrāciju, traukiem un tādos apstākļos, kādi norādīti attiecīgā darba aprakstā, ko akceptējis pasniedzējs.
7. Pipetē šķidrumu vai šķidrumu neiesūc ar muti, bet izmanto tam paredzēto iesūkšanas ierīci.
8. Ja, darbu veicot, iekārta saplīst, sāk tecēt vai rodas citi darbības traucējumi, tad par to nekavējoties jāziņo laborantam vai pasniedzējam.
9. Ja saplīst dzīvsudraba termometrs, nekavējoties par to ziņo laborantam, necenties to savākt.
10. Pirms lieto stikla traukus, rūpīgi apskati, vai tie ir tīri un nav bojāti. Nekad nelieto iepļīsušus stikla traukus. Eksperimenti jāveic tīros un drošos traukos.

- 11.** Sajūtot laboratorijā gāzes smaku, nedrīkst ieslēgt un izslēgt apgaismojumu un citas elektroierīces, kā arī aizdedzināt sērskociņus, šķiltavas u.c. Nekavējoties par to jāziņo laborantam vai pasniedzējam, jānovērš gāzes noplūde, jāatver logi un telpa jāvēdina.
- 12.** Nekarsējiet degošus šķidrumus uz atklātas liesmas. Degoša gāzes degļa tuvumā nedrīkst strādāt ar viegli uzliesmojošām vielām – organiskajiem šķīdinātājiem.
- 13.** Uz darba galdiem drīkst atrasties tikai tie reaģenti, trauki, aparatūra utt kas vajadzīgi dotā darba izpildei. Aizliegts turēt uz darba galdiem traukus ar koncentrētām skābēm, sārmēm, ugunsnedrošām vielām.

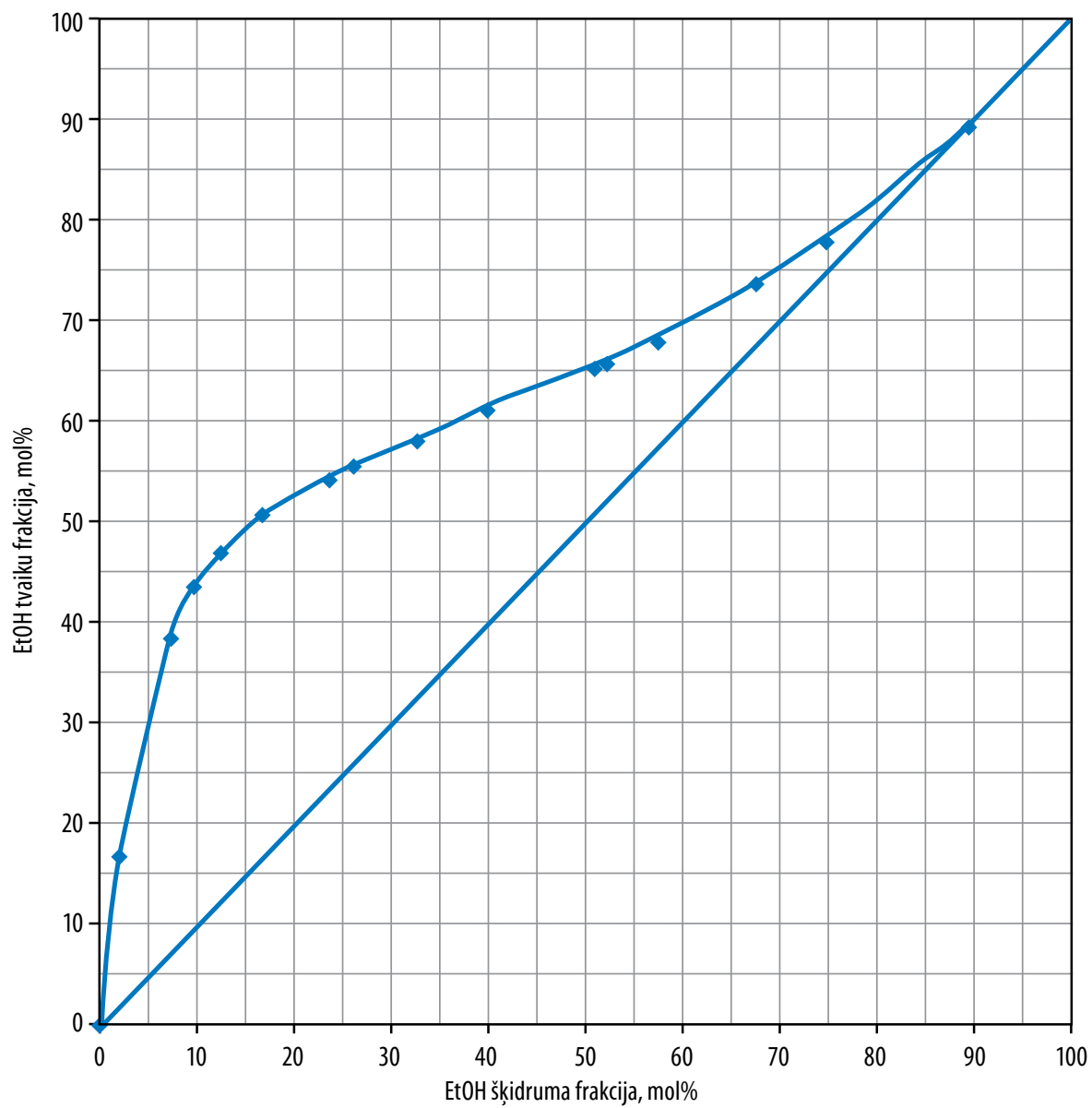
Darbu beidzot

Beidzot laboratorijas darbu, sakārto darba vietu un nomazgā rokas.

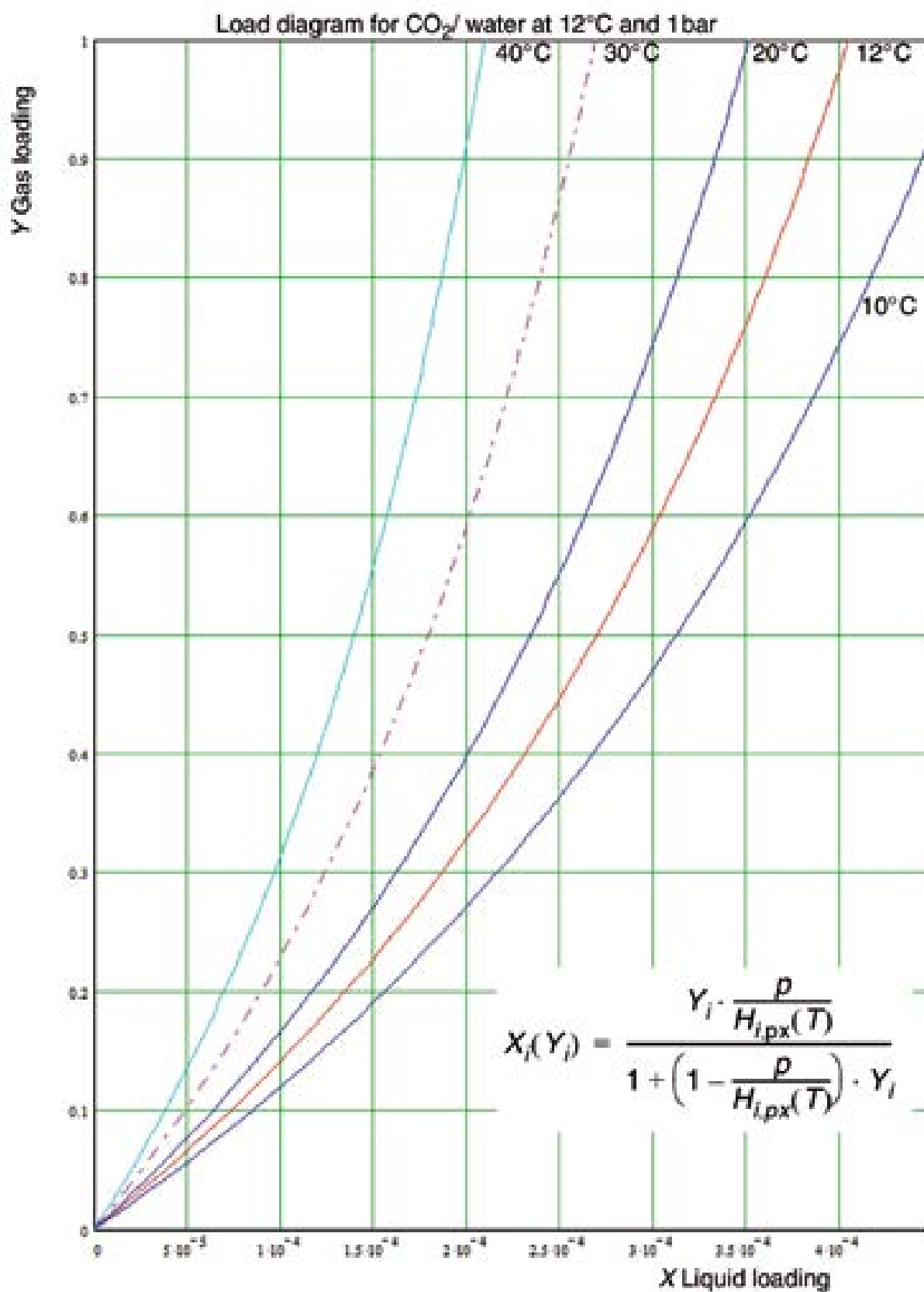
NB! Tava un tavu biedru drošība un veselība ir atkarīga no šo noteikumu zināšanas un ievērošanas.

Pielikums

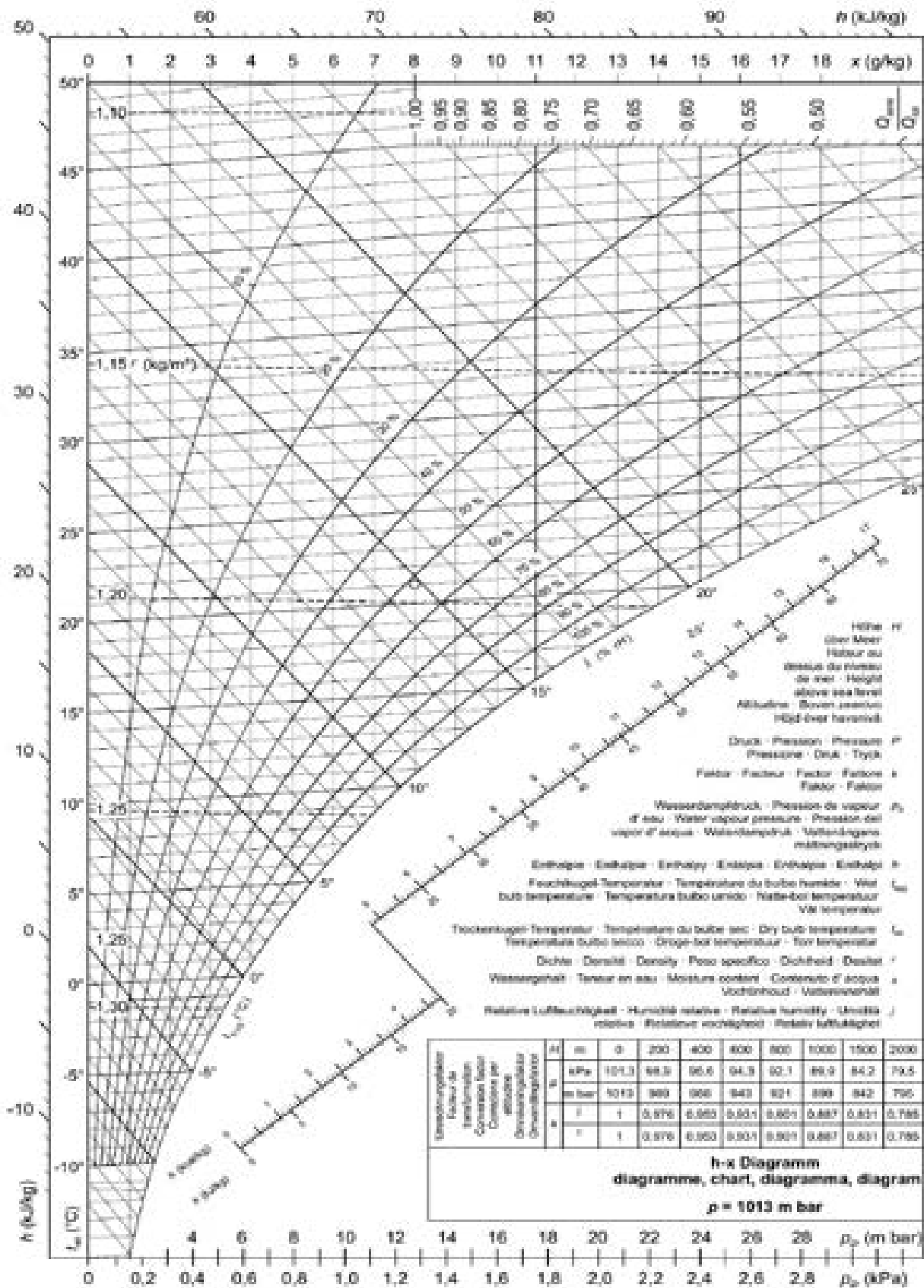
Etanola–ūdens tvaika šķidruma līdzsvara diagramma



CO₂/ūdens līdzsvara diagramma



Mitra gaisa $h-x$ diagramma



Gaisa fizikālo parametru tabula

Temperatūra, °C	Siltumvadītspēja, mW/(m·K)	Blīvums, kg/m ³	Termiskās izplešanās koeficients, ·10 ⁻³ K ⁻¹	Dinamiskā viskozitāte, ·10 ⁻⁶ N s/m ²	Kinemātiskā viskozitāte, ·10 ⁻⁶ m ² /s	Īpatnējais siltums, J/kg K	Pr
-190	7,82						
-150	11,69	2,866				983	0,725
-100	16,20	2,038				966	0,726
-75	18,34	1,783	5,140	13,18	7,40		
-50	20,41	1,582	4,550	14,56	9,22	999	0,744
-25	22,41	1,422	4,080	15,88	11,18	1005	0,742
-15	23,20	1,367	3,920	16,40	12,01	1005	
-10	23,59	1,341	3,840	16,65	12,43	1006	0,739
-5	23,97	1,316	3,760	16,90	12,85	1006	
0	24,36	1,292	3,690	17,15	13,28	1006	0,736
5	24,74	1,268	3,620	17,40	13,72	1006	0,735
10	25,12	1,246	3,560	17,64	14,16	1006	0,734
15	25,50	1,225	3,500	17,89	14,61	1007	0,732
20	25,87	1,204	3,430	18,13	15,06	1007	0,731
25	26,24	1,184	3,380	18,37	15,52	1007	0,730
30	26,62	1,164	3,320	18,60	15,98	1007	0,728
40	27,35	1,127	3,210	19,07	16,92	1007	0,726
50	28,08	1,093	3,120	19,53	17,88	1007	0,723
60	28,80	1,060	3,020	19,99	18,86	1007	0,720
80	30,23	1,000	2,850	20,88	20,88	1008	0,715
100	31,62	0,947	2,700	21,74	22,97	1008	0,701
125	33,33	0,887	2,510	22,79	25,69	1014	
150	35,00	0,834	2,330	23,80	28,51		0,699
175	36,64	0,787	2,220	24,78	31,44		
200	38,25	0,745	2,100	25,73	34,47		0,698
225	39,83	0,708	2,010	26,66	37,60	1030	
300	44,41	0,617	1,760	29,28	47,54		0,702
412	50,92	0,524	1,520	32,87	63,82	1075	
500	55,79	0,457	1,320	35,47	77,72	1099	
600	61,14	0,404	1,160	38,25	94,62	1121	
700	66,32	0,363	1,030	40,85	112,60		
800	71,35			43,32	131,70	1159	
900	76,26			45,66	151,70		
1000	81,08			47,88	172,70		
1100	85,83			50,01	194,60	1210	

Ieteicamā papildu literatūra

1. Osipovs L. Ķīmijas tehnoloģijas pamatprocesi un aparāti. Rīga: Zvaigzne, 1991. – 680. lpp.
2. Ozoliņš J. Siltuma apmaiņas procesi ķīmijas tehnoloģijā: Mācību līdzeklis. Rīga: RTU Izdevniecība, 2013. – 198. lpp.
3. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологий. Москва: Химия, 1973. –752 с.
4. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии. Учебник для вузов. Изд. 3-е. В 2-х кн.: Часть 1. Москва: Химия, 2002. – 400 с., Часть 2. Москва: Химия, 2002. – 368 с.
5. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. В 2-х книгах. Под ред. В. Г. Айнштейна, Кн. 1 Москва: Университетская книга; Логос, 2006. – 912 с., Кн. 2 Москва: Университетская книга; Логос, 2006. – 872 с.
6. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии – 10-е перераб. и доп. Л.: Химия, 1987. – 576 с.
7. Perry's chemical engineer's handbook. Edited by Don W. Green, Robert H. Perry. 8 th ed. New York: Mc Graw-Hill, 1 vol., 2008. – 2400 p.
8. Soares C. Process Engineering Equipment Handbook. McGraw-Hill: NewYouk, 2002. – 1492 p.
9. Coulson J. M., Richardson J. F. Chemical engineering. 6 th ed. Oxford, Boston Butterworth- Heinemann, vol.1, 2011. – 895 p.
10. Coulson J. M., Richardson J. F. Chemical engineering. 5 th ed. Oxford, Boston Butterworth- Heinemann, vol.2, 2003. –1229 p.
11. Theodore L., Ricci F. Mass Transfer Operations for Practicing Engineer. A John Wiley&Sons, 2010 – 630 p.
12. Mc Cabe W., Smith C. J., Harriott P. Unit Operations of Chemical Engineering, 7 th ed., Mc Graw Hill, Boston, 2005. – 1140 p.
13. Schönbucher A. Thermische Verfahrenstechnik: Grundlagen und Berechnungsmethoden für Ausrüstungen und Prozesse. Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2002. – 1030 s.
14. Schwister K., Leven V. Verfahrenstechnik für Ingenieure: Lehr und Übungsbuch. 2., aktualisierte Auflage. Fachbuchverlag Leipzig, 2014. –389 s.
15. Wagner W. Wärmeübertragung, 6. Auflage. Vogel Buchferlag, 2004. –258 s.
16. Ignatowitz E. Chemietechnik, 8 Auflage. Europa-Lehrmittel, Nourney, 2007. – 607 s.