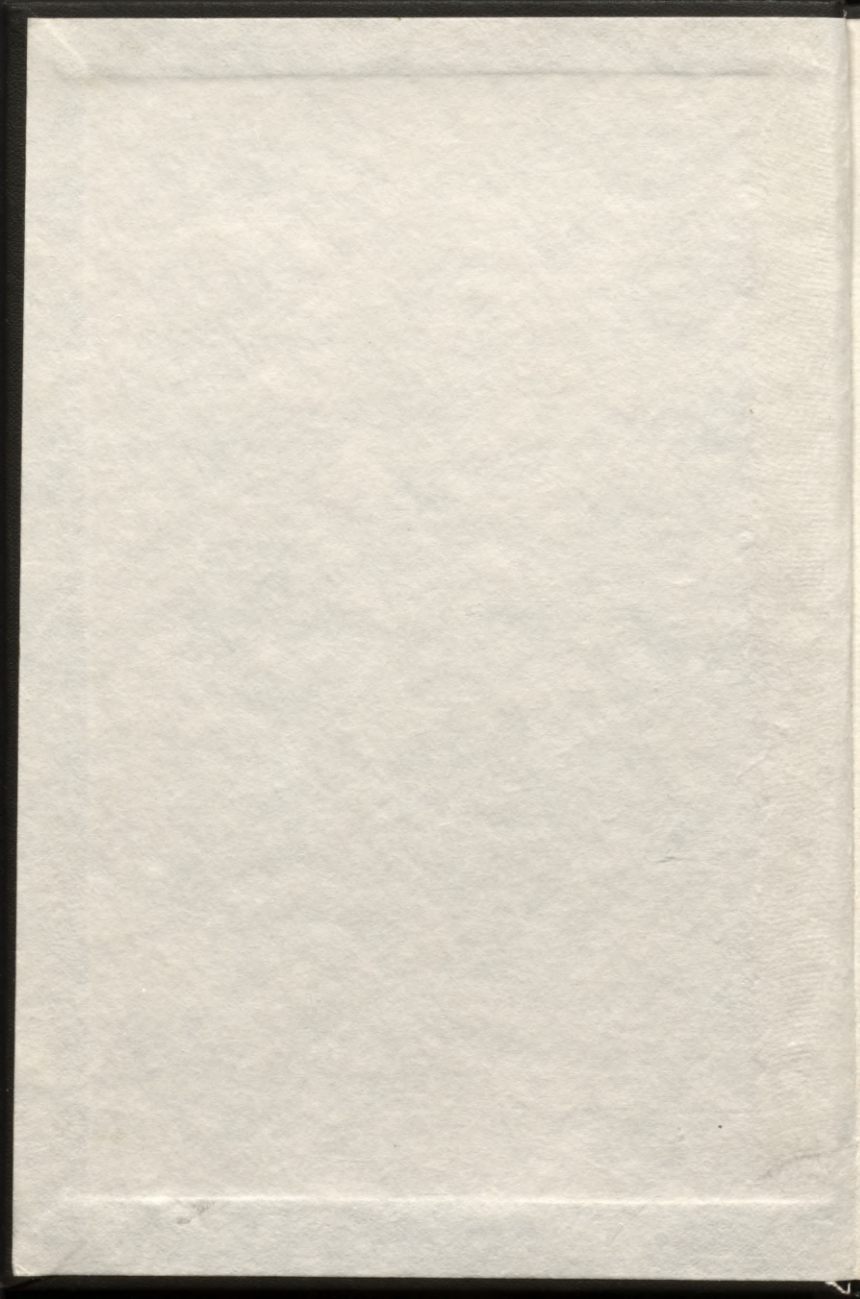
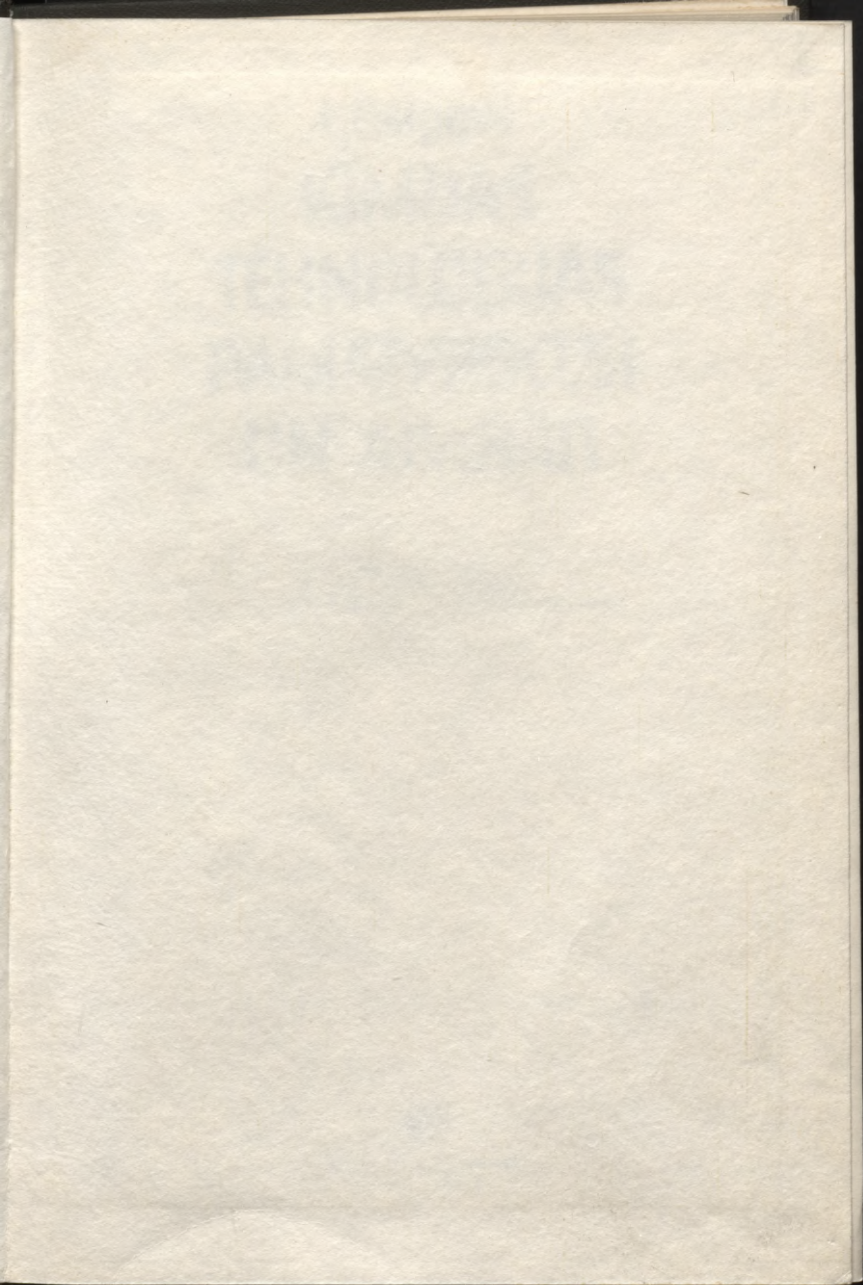


92-4

L 41

L.Osipovs
KĪMIJAS
TEHNOLOĢIJAS
PAMATPROCESI
UN APARĀTI





4315

92-4
L 41

L
66

L.Osipovs
**ĶĪMIJAS
TEHNOLOĢIJAS
PAMATPROCESI
UN APARĀTI**

Mācību grāmata
Latvijas Republikas augstskolu
ķīmijas un inženiertehnologu specialitāšu studentiem



RĪGA «ZVAIGZNE» 1991

35z7
Os 396

LATVIJAS VALSTS
BIBLIOTĒKA

92-

4.525

0306114512

Osipovs Leonīds Aleksandra d.

**ĶĪMIJAS TEHNOLOĢIJAS PAMATPROCESI
UN APARĀTI**

Redaktore I. Bēra. Māksl. redaktore A. Lubgāne.
Tehn. redaktore A. Svilpe. Korektore R. Zveja. Vāku zīm. O. Bērziņš.

Izdevniecība «Zvaigzne», 226013, Rīgā, K. Valdemāra ielā 105. Reģistr.
apliec. Nr. 2-0300. Izdevn. Nr. 8045/FMK-421. 42,5 uzsk. iespiedl.,
45,78 izdevn. l. Metiens 1000 eks. Iespiests tipogrāfijā «Rota», 226011, Rīgā,
Blaumaņa ielā 38/40. Pasūt. Nr. 714. Cena 1 rbļ. 80 kap.

Recenzenti: E. Jurevics, M. Lielgalvis

ISBN 5-405-00371-9

© L. Osipovs, 1991

SATURS

Priekšvārds	7
1. Ķīmijas tehnoloģijas procesu pamatlūkumi un aparātu aprēķinu vispārīgie principi	9
1.1. Ķīmijas tehnoloģijas pamatprocesu klasifikācija	9
1.2. Pārneses teorija nepārtrauktai videi	11
1.3. Procesu un aparātu matemātisko aprakstu sastādīšanas, analīzes un aprēķinu pamatprincipi	11
1.4. Lidzības teorija un fizikālās modelēšanas principi	16
1.5. Matemātiskā modelēšana	27
I. Hidromehāniskie procesi un aparāti	32
2. Hidraulikas pamati	32
2.1. Hidrostatika	32
2.2. Hidrodinamika	41
2.3. Hidrauliskās pretestības	61
2.4. Šķidrumu iztece	74
2.5. Bernulli vienādojuma praktiskā izmantošana	80
2.6. Ķermeņa pārvietošanās šķidrumā (gāzē)	81
2.7. Suspendedā graudainā slāņa hidrodinamika	89
2.8. Divfāžu plūsmu gāze (tvaiks)—šķidrums un šķidrums—šķidrums hidrodinamika	92
2.9. Slāņaina šķidruma plūsma	101
2.10. Plūsmu struktūras un to uzturēšanās laiks aparātos	104
3. Šķidrumu pārvietošana. Sūkņi	114
3.1. Virzulsūkņi	114
3.2. Centrbēdzes sūkņi	128
3.3. Speciālie sūkņi	140
4. Gāzu saspiešana	147
4.1. Virzūlkompresori	147
4.2. Rotācijas kompresori un gāzpūtēji	157
4.3. Turbogāzpūtēji un turbokompresori	158
4.4. Kompresoru staciju iekārtojums	161
4.5. Vakuumsūkņi	162
4.6. Ventilatori	166
5. Neviendabīgo sistēmu sadalīšanas hidromehāniskās metodes	170
A. Gāzveida neviendabīgo sistēmu sadalīšana. Dispersās sistēmas ar gāzveida vidi	170
5.1. Sausā gāzveida neviendabīgo sistēmu sadalīšana	172
5.1.1. Mehāniskā gāzu attīrīšana	172
5.1.2. Elektriskā gāzu attīrīšana	181
5.2. Slapjā gāzveida neviendabīgo sistēmu sadalīšana	185
5.2.1. Iekārtas slapjai gāzu attīrīšanai	185
B. Šķidru neviendabīgo sistēmu sadalīšana. Dispersās sistēmas ar šķidru vidi	189
5.3. Nostādināšana	190
5.3.1. Nostādinātāju konstruktīvie izveidojumi	190
5.3.2. Nostādinātāju ražīgums un izmēri	192
5.4. Filtrēšana	194
5.4.1. Filtrēšanas procesa raksturojums	194
5.4.2. Periodiskas darbības filtri	202
5.4.3. Nepārtrauktas darbības filtri	213
5.4.4. Nepārtrauktas darbības spiedfiltri	217
5.4.5. Filtru izvēle un to salīdzinājums	218

5.4.6. Filtru ražīgumu ietekmējošie faktori	218
5.4.7. Nogulšņu mazgāšana	220
5.5. Centrifugēšana	220
5.5.1. Centrifūgu klasifikācija un izvēle	220
5.5.2. Normālas centrifūgas	222
5.5.3. Supercentrifūgas	228
5.5.4. Centrifūgu ražīgums	230
5.5.5. Centrifūgu jaudas noteikšana	233
5.5.6. Hidrocikloni	235
6. Maisīšana	237
6.1. Maisīšana šķidrā vidē	237
6.2. Mehānisko maisītāju darbināšanas jauda	244
6.3. Pneimatiskā maisīšana	248
6.4. Maisīšana plūsmā	250
6.5. Cirkulācijas maisīšana	251
II. Siltuma procesi	252
7. Siltuma apmaiņa	252
7.1. Siltuma vadīšana	252
7.1.1. Siltuma vadīšana stacionārā režīmā	254
7.1.2. Siltuma vadīšana nestacionārā režīmā	258
7.2. Siltuma starošana	261
7.3. Siltuma apmaiņa konvekcijā (siltuma atdeve)	266
7.4. Siltumatdeves koeficienta noteikšana	271
7.4.1. Siltuma atdeve brīvā konvekcijā	271
7.4.2. Siltuma atdeve piespiedu konvekcijā	272
7.4.3. Siltuma atdeve, šķidrumam verdot	279
7.4.4. Siltuma atdeve, tvaikam kondensējoties	281
7.5. Siltuma pāreja (pārnese) nemainīgā temperatūrā	287
7.6. Siltuma pāreja mainīgā temperatūrā	292
8. Sildīšana, dzesēšana un kondensēšana	302
8.1. Sildīšana	302
8.1.1. Siltuma avoti un sildīšanas veidi	302
8.1.2. Sildīšana ar ūdens tvaiku	303
8.1.3. Siltumapmaiņtāji	305
8.1.4. Sildīšana ar dūmgāzēm	325
8.1.5. Sildīšana ar speciāliem siltumnesējiem	335
8.1.6. Sildīšana ar elektrisko strāvu	340
8.2. Dzesēšana	342
8.2.1. Dzesēšanas veidi	343
8.3. Kondensēšana	345
8.3.1. Tvaika kondensatori	345
9. Ietvaice	355
9.1. Virsmas ietvaicētāji	356
9.1.1. Vienpakāpes ietvaice	356
9.1.2. Vairākpakāpju ietvaice	359
9.1.3. Vairākpakāpju ietvaices iekārtas tehnisko rādītāju aprēķins	366
9.1.4. Ietvaices iekārta ar siltumsūkni	380
9.1.5. Virsmas ietvaicētāju veidi	383
9.2. Adiabātiskā ietvaice	389
9.3. Kontakta ietvaicētāji	390
9.3.1. Ietvaicētājs ar iegremdētiem degļiem	391
III. Masas apmaiņas procesi un aparāti	392
10. Masas apmaiņas teorija	392
10.1. Masas apmaiņas procesu statika	393
10.1.1. Fāžu sastāva izteikšanas veidi	393
10.1.2. Fāžu līdzsvars	395
10.1.3. Darba taisnes vienādojums un materiālā bilance	396
10.2. Masas apmaiņas procesu kinētika	399
10.2.1. Konvektīvā difūzija	399
10.2.2. Molekulārā difūzija	400
10.2.3. Masas pārejas procesu diferenciālvienādojums	401
10.2.4. Masas pārejas teorētiskie modeļi	405
10.2.5. Masas atdeves procesu vienādojums	407

	10.2.6. Masas pāreja (pārnese)	410
	10.2.7. Masas apmaiņas aparātu aprēķinu pamati	419
	10.2.8. Masas pāreja sistēmās ar cietu fāzi	427
11.	Absorbcija	431
	11.1. Sorbcijas procesu vispārīgs raksturojums	431
	11.2. Absorbcijas materiālā bilance un īpatnējais absorbenta patēriņš	433
	11.3. Neizotermiskā absorbcija	435
	11.4. Absorberu veidi un konstrukcija	436
	11.4.1. Virsmas absorberi	436
	11.4.2. Pildījuma veidi	439
	11.4.3. Barbotāžas absorberi	449
	11.4.4. Barbotāžas absorberu aprēķins	455
	11.4.5. Absorberi ar peldošu pildījumu	463
	11.4.6. Absorberi ar maisītājiem	464
	11.4.7. Izsmidzināšanas absorberi	465
	11.5. Dažādas konstrukcijas absorberu salīdzinošs raksturojums un to lietošana	466
	11.6. Absorbcijas iekārtu tehnoloģiskās shēmas	467
	11.7. Desorbcija un tās realizācijas veidi	469
	11.8. Daudzkomponentu gāzu maisījumu absorbcija	472
	11.9. Absorbcija ķīmisku reakciju rezultātā (hemosorbcija)	474
12.	Šķidrumu pārtvaice	476
	12.1. Šķidro sistēmu fāžu līdzsvars	476
	12.2. Siltuma (entalpijas) diagramma	485
	12.3. Destilācija	486
	12.4. Rektifikācija	490
	12.5. Pārtvaices iekārtu pamataparātūra	494
	12.6. Darba koncentrāciju līknes vienādojumi	495
	12.7. Rektifikācijas kolonnas pamatizmēru noteikšana	499
	12.7.1. Šķīvu rektifikācijas kolonnu pamatizmēru noteikšana	499
	12.7.2. Pamatizmēru noteikšana rektifikācijas kolonnām ar pildījumu	511
	12.8. Rektifikācijas kolonnas siltuma bilance	514
	12.9. Bināro maisījumu periodiskā rektifikācija	516
	12.10. Speciālās pārtvaices metodes	518
	12.11. Gāzu maisījumu sadalīšana, lietojot dziļo dzesēšanu	522
13.	Ekstrakcija	525
	13.1. Procesa vispārīgs raksturojums un lietošana	525
	13.2. Šķidumu ekstrakcija	526
	13.3. Ekstrakcijas metodes	532
	13.4. Ekstraktor veidi sistēmām šķidrums—šķidrums	542
14.	Adsorbcija	548
	14.1. Adsorbcijas procesa raksturojums un lietošana	548
	14.2. Adsorbenti	549
	14.3. Adsorbcijas procesa materiālā bilance	555
	14.4. Desorbcija	557
	14.5. Adsorberi un adsorbcijas iekārtu tehnoloģiskās shēmas	558
	14.6. Adsorberu aprēķinu metodes	562
15.	Jonu apmaiņa	570
	15.1. Jonu apmaiņas procesa raksturojums un lietošana	570
	15.2. Jonu apmaiņas materiāli, to klasifikācija un īpašības	570
	15.3. Jonu apmaiņas procesu teorētiskie pamati	572
	15.4. Jonu apmaiņas iekārtu tehnoloģiskās shēmas	575
16.	Zāvēšana	578
	16.1. Zāvēšanas procesa vispārīgs raksturojums	578
	16.2. Zāvēšanas statika	581
	16.2.1. Mitruma apmaiņa starp materiālu un apkārtējo vidi	581
	16.2.2. Zāvēšanas procesa materiālā bilance	592
	16.2.3. Zāvēšanai nepieciešamā siltuma noteikšana	595
	16.2.4. Zāvēšanas varianti	601
	16.3. Zāvēšanas kinētika	607
	16.4. Zāvētavu veidi	613
	16.4.1. Konvektīvās zāvētavas	614
	16.4.2. Kontakta zāvētavas	623

16.4.3.	Periodiskās darbības žāvētavas	625
16.4.4.	Vakuumžāvētavas	626
16.5.	Speciālie žāvēšanas paņēmieni	628
17.	Cietu vielu ekstrahēšana un šķīdināšana	632
17.1.	Procesa vispārīgs raksturojums un lietošana	632
17.2.	Ekstrahenta izvēle	632
17.3.	Ekstrakcijas procesa virzošais spēks	634
17.4.	Ekstrakcijas kinētika	634
17.5.	Ekstrakcijas iekārtu tehnoloģiskās shēmas	636
17.6.	Ekstraktori cietu vielu ekstrahēšanai	638
17.7.	Ekstrakcijas procesa intensificēšana	644
18.	Kristalizācija no šķīdumiem un kausējumiem	645
18.1.	Kristalizācijas procesa vispārīgs raksturojums	645
18.2.	Kristalizācijas statika	646
18.3.	Kristalizācijas metodes	646
18.4.	Kristalizācijas procesa materiālā bilance un siltuma bilance	647
18.5.	Kristalizācijas kinētikas pamati	649
18.6.	Kristalizatoru veidi un lietošana	651
19.	Membrānu procesi	657
19.1.	Membrānu procesu klasifikācija	657
19.2.	Membrānu veidi un to raksturojums	659
19.3.	Membrānu procesi zinātnē un tehnikā	661
19.4.	Membrānu procesu mehānisms	661
19.5.	Membrānu procesu kinētika	663
19.6.	Membrānu procesu un aparātu aprēķinu metodika	663
19.7.	Membrānu aparāti	667
20.	Ķīmijas tehnoloģijas attīstības tendences	671
	Literatūra	674
	Alfabētiskais rādītājs	676

PRIEKŠVĀRDS

Grāmatā iztirzāts «Ķīmijas tehnoloģijas pamatprocesu un aparātu» kurss, kuru apgūst visu specialitāšu ķīmijas tehnoloģijas studenti. Mācību viela grāmatā iekārtota trīs daļās.

Grāmatas pirmajā daļā «Hidromehāniskie procesi un aparāti» plaši aplūkoti hidraulikas pamati, šķidrumu pārvietošana, gāzu saspiešana, lielu vēribu pievēršot hidromehānikas teorijai. Pamatojoties uz to, sīki iztirzāta cauruļu sistēmu projektēšana. Samērā detalizēti aplūkota dažādu sūkņu, kompresoru, gāzpūtēju, ventilatoru un citu aparātu uzbūve un darbības principi, aprēķinu metodika, kā arī to raksturojums.

Šajā grāmatas daļā apskatīta arī nevienmērīga gāzveida sistēmu un šķidro sistēmu sadalīšana: sausā un slapjā gāzveida nevienmērīga sistēmu sadalīšana, šķidro nevienmērīga sistēmu sadalīšana nostādinot, filtrējot, centrifugējot, kā arī raksturoti šajos procesos izmantojamie aparāti. Bez tam aplūkota arī vielu maisīšana un tajā izmantojamo maisītāju veidi.

Grāmatas otrā daļa veltīta siltuma procesiem. Tajā aprakstīti ar siltuma vadišanu, starošanu, atdevi un pāreju saistītie teorētiskie jautājumi, kā arī šo procesu praktiskā izmantošana. Sīki iztirzāta sildīšana un siltumapmaiņas aparāti sildīšanai ar ūdens tvaiku, dūmgāzēm un speciālajiem siltumnesējiem. Aplūkota arī dzesēšana, kondensēšana un ietvaice, kā arī šiem procesiem izmantojamie aparāti.

Grāmatas trešajā daļā apskatīti masas apmaiņas procesi, ievadot to ar plašu teorētiskajiem jautājumiem veltītu nodaļu. Tālāk aprakstīti konkrēti masas apmaiņas procesi: absorbcija, adsorbcija, pārtvaice, šķidrums ekstrakcija, jonu apmaiņa, žāvēšana, cietu vielu ekstrakcija un šķīdināšana, kristalizācija no šķīdumiem un kausējumiem un membrānu procesi.

Analizējot procesu norisi, autors centies parādīt šo procesu analogiju, kas izpaužas tādējādi, ka tos apraksta līdzīgas formulas.

Ķīmijas tehnoloģijas procesu un aparātu pilnveidošana, optimālo konstrukciju un režīmu noteikšana un pētīšana pamatojas uz fizikālo un matemātisko modelēšanu. Viegli iztirzājumā tam pievērsta īpaša uzmanība.

Lai izveidotu procesu un aparātu matemātiskos modeļus, jāizprot procesu norises un aparātu darbības mehānisms un jāprot to matemātiski izteikt. Grāmatā tas īpaši uzsvērts. Šādas pieejas rezultātā iegūst sarežģītas formulas, pēc kurām, izmantojot elektroniskās skaitļošanas mašīnas, var iegūt ļoti precīzus aprēķinu rezultātus.

— Aparātu un iekārtu shēmas attēlotas tā, lai lasītājs varētu gūt pilnīgu priekšstatu par to darbību.

Mācību grāmatas ierobežotā apjoma dēļ nav iespējams studentus detalizēti iepazīstināt ar visiem ķīmijas tehnoloģijas procesiem un aparātiem. Papildu zināšanas un prasmes studenti iegūs laboratorijas darbos un praktiskās nodarbībās, kurām mācību kursa apguves laikā atvēlēta vairāk nekā puse no kopējā paredzēto stundu skaita.

Darbu ar speciālo literatūru un katalogiem studenti apgūs, izstrādājot kursa projektus un zinātniskos darbus.

Grāmatu varēs izmantot arī dažādu nozaru ķīmijas tehnologi, kuri strādā ražošanas uzņēmumos, projektēšanas iestādēs un zinātniskās pētniecības institūtos.

1. ĶĪMIJAS TEHNOĻĪJAS PROCESU PAMATLIKUMI UN APARĀTU APRĒĶINU VISPĀRĪGIE PRINCIPI

1.1. ĶĪMIJAS TEHNOĻĪJAS PAMATPROCESU KLASIFIKĀCIJA

Izejvielu vai pusfabrikātu apstrādes norises rūpniecībā sauc par *tehnoloģiskiem procesiem*.

Jebkurš tehnoloģiskais process saistīts ar noteiktu vielu un enerģijas patēriņu, kā arī ar konkrētiem aparātiem (mašīnām), kuros procesa norises laikā uztur nepieciešamo darba režīmu (temperatūru, spiedienu, koncentrāciju u. c.).

Ķīmijas tehnoloģijai raksturīgos procesus iespējams klasificēt pēc vairākām pazīmēm. Kursā «Ķīmijas tehnoloģijas pamatprocesi un aparāti» tehnoloģiskos procesus parasti iedala atbilstoši pamatlikumiem, kuriem tie pakļauti.

Hidromehāniskie procesi pakļauti hidrodinamikas pamatlikumiem. Pie šiem procesiem pieder, piemēram, šķidrumu pārvietošana, nostādināšana, filtrēšana u. c. Hidromehāniskos procesus virza spiedienu starpība, centrālās spēks.

Siltuma procesi saistīti ar temperatūras maiņu vidēs, kas piedalās procesā. Šādi procesi ir, piemēram, sildīšana, dzesēšana, ietvaicēšana u. c. Siltuma procesus virza temperatūru starpība.

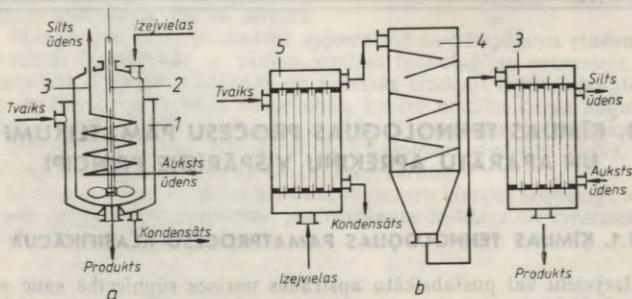
Masas apmaiņas (difūzijas) procesi saistīti ar masas apmaiņu starp fāzēm. Pie šiem procesiem pieder, piemēram, sorbcija (absorbēšana u. c. Siltuma procesus virza temperatūru starpība. Sorbcija (absorbēšana u. c. Siltuma procesus virza temperatūru starpība. Sorbcija (absorbēšana u. c. Siltuma procesus virza temperatūru starpība.

Mehāniskie procesi pamatojas uz to, ka apstrādājamais materiāls tiek pakļauts mehāniskā spēka iedarbībai, piemēram, smalcināšana, sijāšana, cietu vielu transportēšana, presēšana u. c. Šos procesus virza mehāniskais spiediena spēks un centrālās spēks.

Ķīmiskie procesi saistīti ar apstrādājamā materiāla ķīmiskās uzbūves maiņu, piemēram, hlorēšana, sulfurēšana, nitrēšana, neitralizēšana u. c. Ķīmiskos procesus virza ķīmiskā tieksme, temperatūra, spiediens, koncentrācija.

Kursā «Ķīmijas tehnoloģijas pamatprocesi un aparāti» iztirzātas pirmās trīs procesu grupas. Mehāniskos un ķīmiskos procesus apskata atsevišķos ķīmijas tehnoloģijasursos.

Procesus klasificē arī *periodiskos* un *nepārtrauktos procesos*. Periodiskā procesā tā atsevišķas stadijas notiek vienā aparātā dažādos laikos. Nepārtrauktā procesā tā atsevišķas stadijas realizē vienlaikus dažādos aparātos.



1.1. att. Aparāts *a* periodiska procesa un iekārta *b* nepārtraukta procesa realizēšanai.

Aplūkosim, piemēram, procesu, kura pamatā šādas stadijas: izejvielu ievadišana, sildīšana, maisīšana, dzesēšana un gatavā produkta izvadišana.

1.1. attēlā *a* parādīts aparāts periodiska procesa realizēšanai. Izejvielas ievada aparātā. Pēc tam, tvaika apvalkā *1* ievadot tvaiku, izejvielas uzsilda. Maisītājs *2* tās samaisa. Noteiktu laiku izejvielas silda attiecīgā temperatūrā. Tad iegūto produktu dzesē, dzesinātājā *3* ievadot aukstu ūdeni. Procesa beigās iegūto produktu izvada no aparāta. Visas šīs stadijas realizē vienā aparātā.

Lai šo procesu veiktu nepārtraukti, lieto iekārtu (1.1. att. *b*), kas sastāv no sildītāja *5*, kurā ievada izejvielas. Tālāk karstās izejvielas plūst reaktorā *4* no plaukta uz plauktu un samaisās. Reakcijas produktu aizvada uz dzesinātāju *3*. Izejvielas ievada un produktu izvada nepārtraukti. Šīs stadijas realizē trīs aparātos.

Nepārtrauktiem procesiem salīdzinājumā ar periodiskiem procesiem ir šādas priekšrocības: uzlabojas produktu kvalitāte, aparāti ir vienkāršāki, darba apstākļi parocīgāki, procesi viegli automatizējami. Tādēļ tajos gadījumos, kad nepieciešams liels ražīgums un nav bieži jāmaina darba režīms, izdevīgāki ir nepārtrauktie procesi.

Procesu vēl iedala arī *stacionāros procesos* un *nestacionāros procesos*. *Stacionāros procesos* tos raksturojošie parametri laikā nemainās, piemēram, procesu raksturo temperatūra t , plūsmas ātrums ω un koncentrācija C . Stacionāram procesam spēkā šāda sakarība: $t=f(x, y, z)$, $\omega=f(x, y, z)$ un $C=f(x, y, z)$. Stacionārā procesā to raksturojošie lielumi atkarīgi tikai no vietas aparātā.

Nestacionārie procesi mainās telpā un laikā τ pēc šādas sakarības: $t=f(x, y, z, \tau)$, $\omega=f(x, y, z, \tau)$ un $C=f(x, y, z, \tau)$.

Nestacionārie procesi ir periodiskie procesi. Ķīmijas tehnoloģijā pārsvarā ir stacionārie — nepārtrauktie procesi. Nepārtrauktos procesos ir nestacionāri posmi — uzsākot un nobeidzot procesu.

1.2. PĀRNESES TEORIJA NEPĀRTAUKTAI VIDEI

Tehnoloģiskajā procesā piedalās noteikta materiālu masa, un tā mērķis ir mainīt šo materiālu īpašības noteiktā virzienā. Materiālu īpašību maiņu panāk, realizējot enerģijas un masas pārnesei starp tehnoloģiskās sistēmas atsevišķām daļām.

Enerģijas un masas pārnese notiek molekulārās pārnese un konvekcijas rezultātā. Pārnesi mikrodaļiņu (elektronu, jonu, molekulu) kustības rezultātā sauc par *molekulāro pārnesei*. Molekulārā pārnese cietos ķermeņos notiek daļiņu svārstību vai brīvu elektronu pārvietošanās veidā, bet gāzēs (šķidrums) — mikrodaļiņu un molekulu haotiskas kustības veidā. Enerģijas un masas pārvietošanos telpā sauc par *konvekciju*.

Kad šķidruma (gāzes) plūsma sasniedz noteiktu ātrumu, rodas *turbulentā* (virpuļveida) *plūsma*. Turbulentā plūsmā starp šķidruma (gāzes) mikrodaļiņām un molekulām notiek intensīva sajaukšanās, kas paātrina procesa norisi.

Ja enerģijas un masas pārnese notiek divās fāzēs (piemēram, gāzveida un šķidrā fāze, cietā un šķidrā (gāzveida) fāze), tad starp fāzēm ir *fāžu saskares virsma*. Šādos gadījumos pārnese saistīta ar enerģijas vai masas pārvietošanos cauri fāžu saskares virsmai. Uz fāžu saskares virsmas veidojas *fāžu robežkārtā*, kurā kustība ir molekulāra, turpretī pārējā fāžu masā (kodolā) tā saistīta ar konvekciju. Robežkārtā pārnese starp fāzēm tiek bremsēta, jo tā notiek molekulārā veidā (lēni).

Aparātus konstruē un darbina tā, lai robežkārtu pilnīgi likvidētu (piemēram, vides maisa) vai samazinātu robežkārtas biezumu (palielina fāžu plūsmu ātrumus).

1.3. PROCESU UN APARĀTU MATEMĀTISKO APRAKSTU SASTĀDĪŠANAS, ANALĪZES UN APRĒĶINU PAMATPRINCIPI

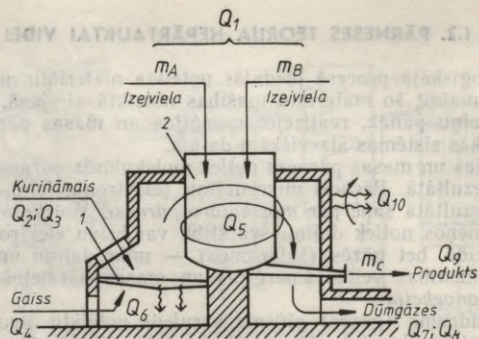
Procesu materiālā bilance un enerģijas bilance. Tehnoloģisko procesu iespējams pareizi organizēt un pārraudzīt, ja zināma tā materiālā bilance un enerģijas bilance.

Materiālā bilance. Sākot iekārtas (aparāta), ceha vai rūpnīcas projektēšanu, vispirms sastāda materiālo bilanci. Dažās ķīmijas tehnoloģijas nozarēs (organiskajā sintēzē) materiālu vērtība var sastādīt 80...90% no kopējiem izdevumiem.

Materiālās bilances pamatā ir masas nezūdamības likums. Izvēloties iekārtu (projektējot), materiālo bilanci sastāda, ņemot par pamatu procesa viena cikla ražīgumu vai ražīgumu diennaktī.

Ja, piemēram, jāsastāda materiālā bilance reaktoram 2 (1.2. att.), kurā ievada m_A un m_B kg izejvielu un reakcijas rezultātā radušos m_C kg produkta izvada no reaktora, tad materiālā bilance vienādojuma veidā reālam procesam rakstāma šādi:

$$m_A + m_B = m_C + m_{zud},$$



1.2. att. Shēma materiālās bilances un siltuma bilances sastādīšanai.

kur m_{zud} — zudumi, kas rodas procesa laikā, daļai materiālu izvai-kojot, paliekot pie reaktora vai cauruļu sienām, noplūstot caur neblī-vām vietām u. tml.

Materiālās bilances rādītājus parasti sakopo tabulā, kurā ir divas daļas — sistēmā ievadītā materiālu masa (vienādojuma kreisā puse) un izvadītā materiālu masa (vienādojuma labā puse). Materiālo bi-lanci pieņemts attēlot arī grafiski noteiktā mērogā.

Materiālās bilances datus izlieto aparātu aprēķiniem un to izvēlei, enerģijas bilances sastādīšanai un citiem tehnoloģiskajiem un eko-nomiskajiem aprēķiniem, kā arī tehnoloģiskā procesa pareizai orga-nizēšanai.

Enerģijas bilance. Jebkuram tehnoloģiskam procesam ir nepiecie-šama enerģija. Enerģijas bilance rāda, kā enerģija sadalās, realizē-jot procesus. Tās dati nepieciešami, lai organizētu pareizu enerģijas izlietošanu.

Projektēšanas stadijā enerģijas bilanci sastāda, lai pareizi izrau-dzītos enerģijas ģeneratoru (tvaika katlu, turbīnu u. c.). Uzskatā-mības labad enerģijas bilanci, tāpat kā materiālo bilanci, var sastā-dīt tabulas vai grafika veidā.

Galvenie enerģijas veidi ķīmiskās rūpniecības nozarēs ir *siltuma enerģija*, *mehāniskā enerģija* un *elektroenerģija*. Siltuma enerģija bieži vien dominē, tādēļ no enerģijas bilancēm aplūkosim, kā sastāda siltuma bilanci.

1.2. attēlā shematiski parādītajam reaktoram ar dūmgāzu apsildi siltuma bilances vienādojums ir šāds:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 = Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} + Q_{11} \text{ jeb}$$

$$\sum_1^5 Q = \sum_6^{11} Q.$$

Vienādojuma kreisā pusē rāda sistēmā (reaktora iekārtā) ievadīto siltumu: ar izejvielu masu Q_1 ; ar kurināmā fizikālo siltumu Q_2 ; ar kurināmā sadegšanas siltumu Q_3 ; ar gaisu Q_4 un reakcijas siltumu Q_5 (ja process ir eksotermisks). Vienādojuma labajā pusē sumēts no sistēmas aizvadītais siltums: ar mehāniskiem kurināmā zudumiem (daļa kurināmā izbirst caur ārdiem I nesadegot) Q_6 ; ar dūmgāzēm Q_7 ; ar pilnīgi nesadedzinātu kurināmo Q_8 (dūmgāzēs paliel CO); siltuma zudumi ar izvadīto produktu Q_9 ; siltuma zudumi apkārtējā vidē Q_{10} un pārējie siltuma zudumi Q_{11} , kas raksturīgi reāliem procesiem (siltuma noplūde caur pamatu, ar pelniem u. c.).

Impulsa, siltuma un koncentrācijas diferenciālvienādojumi un analogija starp tiem. Analogiski ir procesi un objekti, kurus var aprakstīt ar *analogiskiem vienādojumiem*. *Analogiski vienādojumi ir tie, kas gan satur dažādus fizikālus lielumus, bet visi operatori (algebriskās darbību zīmes, funkciju simboli, integrēšanas un diferenciēšanas simboli utt.) tajos sakrīt un ir vienā un tajā pašā secībā.*

Matemātikā neoperē ar fizikāliem lielumiem, bet ar skaitliskām vērtībām. Ja vienādojumi, kas apraksta dažādus fizikālus objektus, ir analogi, tad ir vienāds skaitlisko vērtību sadalījums telpā un laikā, kaut arī šīs vērtības atbilst dažādiem fizikāliem lielumiem.

Analogijas gadījumā var izveidot modeli, kas līdzīgs oriģinālam, kaut arī fizikālā būtība parādībām modelī un oriģinālā ir dažāda. Piemēram, ķīmijas tehnoloģijas procesu klasifikācija pamatojas uz lineāro diferenciālvienādojumu analogiju, kuri apraksta vienkāršākos (lineāros) pārnese procesus: kustības daudzuma (impulsa) pārnese $\tau = -\mu dw/dx$ (pēc *Ņūtona likuma*); siltuma vadīšanu $q = -\lambda dt/dx$ (pēc *Furjē likuma*); masas molekulāro difūziju $j = -D dC/dx$ (pēc *Fika likuma*).

Analogiski pēc *Oma likuma* elektriskās strāvas stiprums proporcionāls sprieguma gradientam:

$$i = -1/RdU/dx.$$

No minētajiem diferenciālvienādojumiem redzams, ka kustības daudzuma, siltuma, masas un elektriskās strāvas pārnese ir analogi. Tādēļ kustības daudzuma, siltuma un masas pārnese procesus var modelēt ar elektrisko strāvu. Uz minēto procesu analogiju pamatojas analogo skaitļošanas mašīnu darbība.

Līdzsvara stāvoklis un pārnese procesu virziens. Praktiskie ķīmijas tehnoloģijas procesi un aparātu aprēķini sākas ar procesa statikas likumu analīzi. Statikas likumu analīze saistīta ar sistēmas līdzsvaru. Līdzsvarā esoša sistēma nemaina savu stāvokli laikā.

Lai mainītos sistēmas līdzsvars, tai jāpieliek ārējs spēks. Ārējā spēka iedarbību uz līdzsvarā esošo sistēmu nosaka divi termodinamiskie nosacījumi — Lešateljē princips un Gībsa likums.

Lešateljē princips paredz, ka *sistēmā, kas ārējas iedarbības (temperatūras, spiediena vai koncentrācijas maiņas) rezultātā izveista no līdzsvara stāvokļa, rodas pret darbība, kurā šo iedarbību samazina*. Pamatojoties uz Lešateljē principu, var noteikt, kādi parametri jāmaina, lai izmainītu sistēmas stāvokli ražošanai vēlamā virzienā.

Gibsa fāžu likums norāda sakarību starp sistēmas komponentu skaitu K , fāžu skaitu L un to brīvības pakāpēm B :

$$B = K - L + 2.$$

Pēc fāžu likuma var noteikt mainīgo parametru skaitu, kuri nosaka sistēmas līdzsvaru un kuru vērtības var brīvi izvēlēties.

Procesu virzošie spēki un to kinētiskie vienādojumi. Lai izdarītu procesa analīzi un vajadzīgos aprēķinus, līdz ar materiālo bilanci un enerģijas bilanci jāzina arī procesa norises ātrums.

Tehnikā cenšas sasniegt pēc iespējas lielāku procesa norises ātrumu, jo tādejādi paaugstina iekārtas izmantošanas intensitāti, t. i., iegūstamā produkta masu kilogramos, tilpumu kubikmetros vai gabalu skaitu no iekārtas darba tilpuma vienības vai laukuma vienības laika vienībā. Jo intensīvāk iespējams izmantot iekārtu, jo zemāka ir produkta pašizmaksa. Paaugstinot iekārtas izmantošanas intensitāti, palielinās tās ražīgums. Inženieri un konstruktori cenšas uzlabot iekārtas, lai palielinātu to izmantošanas intensitāti.

Analoģija starp kustības daudzuma, siltuma un masas pārnesi novērojama arī, salīdzinot šo procesu kinētiskos vienādojumus. Kinētiskie vienādojumi parāda procesu intensificēšanas iespējas.

Hidromehānisko procesu kinētiskais vienādojums:

$$(dV/d\tau)/S = k' \Delta p = \Delta p/R_h,$$

kur V — šķidrums (gāzes) tilpums, m^3 ; τ — procesa norises laiks, s ; S — plūsmas šķērsgriezuma laukums, m^2 ; k' — vides caurlaidības koeficients; Δp — spiedienu starpība plūsmas sākumā un beigās, Pa ; $R_h = 1/k'$ — hidrauliskā pretestība.

Siltuma apmaiņas procesu kinētiskais vienādojums:

$$(dQ/d\tau)/S' = k'' \Delta t = \Delta t/R_s,$$

kur Q — siltuma daudzums, J ; τ — procesa norises laiks, s ; S' — sildvirsmas laukums, m^2 ; k'' — siltuma pārejas koeficients; Δt — temperatūru starpība starp vidēm, $^{\circ}C$; $R_s = 1/k''$ — termiskā pretestība.

Masas apmaiņas procesu kinētiskais vienādojums:

$$(dM/d\tau)/S'' = k''' \Delta C = \Delta C/R_m,$$

kur M — vielas masa, kg ; τ — procesa norises laiks, s ; S'' — fāžu saskares virsmas laukums, m^2 ; k''' — masas pārneses koeficients; ΔC — koncentrāciju starpība, mol ; $R_m = 1/k'''$ — pretestība masas pārejai.

Minēto procesu kinētiskie vienādojumi izsakāmi ar *kopēju vienādojumu*:

$$M/(S\tau) = k\Delta = \Delta/R. \quad (1.1.)$$

kur M — procesa rezultāts, piemēram, pārnestais siltuma daudzums, masa; S — procesa darbīgās virsmas laukums (šķērsgriezuma laukums, sildvirsmas, fāžu saskares virsma); τ — procesa norises laiks;

k — procesa ātruma koeficients; Δ — procesa virzošais spēks (spiedienu, temperatūru, koncentrāciju starpība); R — procesa pretestība.

Sakarība $M/(S\tau)$ raksturo procesa intensitāti.

Procesa intensitātē ir tieši proporcionāla procesa virzošajam spēkam Δ un apgriezti proporcionāla pretestībai R . No vienādojuma (I.1) redzams, ka procesa ātrumu var palielināt, palielinot procesa virzošo spēku Δ vai samazinot pretestību R .

Kinētiskie vienādojumi ir daudz sarežģītāki, ja vienlaikus norisinās vairāki procesi, piemēram, hidromehāniskie procesi un siltuma procesi, masas apmaiņas procesi un siltuma procesi u. c. Šādus procesus intensificē, stimulējot galveno procesu.

Aprēķinu mērķi un uzdevumi. Ķīmijas procesu un aparātu aprēķinu izdara, lai noteiktu pārstrādājamā materiāla plūsmas veidu, masu vai tilpumu, patērējamo enerģiju. Svarīgi izdarīt procesa kinētikas likumu analīzi. Šī analīze rada iespēju procesus modelēt un noteikt to optimālos realizēšanas apstākļus.

Ķīmijas tehnoloģijas procesu un aparātu pētīšanas metodes. Straujais ķīmijas tehnoloģijas progress izskaidrojams ar teorijas un eksperimenta ciešu vienotību. Pētīšanas procesā līdz ar faktu noskaidrošanu izzina arī to saistību ar citām parādībām.

Tehnoloģisko procesu vispusīgas pētīšanas metodika ietver *statiskos pētījumus* (robežu nosacījumu noteikšana), *kinētiskos pētījumus* (virzošā spēka rakstura noskaidrošana) un *dinamiskos pētījumus* (parametru maiņa laikā virzošā spēka ietekmē).

Ķīmijas tehnoloģijas procesiem kopēja ir to *sarežģītā struktūra*, kuras dēļ tos sauc par *ķīmijas tehnoloģijas sistēmām*.

Ķīmijas tehnoloģijas sistēmas ietver sevī fizikālķīmisko procesu kopumu un līdzekļus to realizēšanai, lai ražotu produkciju vajadzīgajā daudzumā un kvalitātē. Ķīmijas tehnoloģijas sistēmas sastāv no elementiem (atsevišķām daļām), kuros realizē tehnoloģiskos procesus vajadzīgās produkcijas iegūšanai.

Ķīmijas tehnoloģijas sistēmu hierarhijai ir sarežģīta struktūra. Iespējama šāda *hierarhijas struktūra*: nozare vai ķīmijas kombināts; tehnoloģiskā līnija (rūpniecība kopa, kuras saista kopēja ražošana); ķīmiskā rūpniecība; cehs: pamatprocesi (*sistēmas elements*).

Jēdzieni *sistēma* un *elements* ir relatīvi, t. i., ja vienā sistēmā ir kāds elements un šo elementu var sadalīt sastāvdaļās, tad tas reizē ir arī sistēma, bet zemāka ranga. Ja par sistēmu uzskata aparātu, tad par elementiem uzskatāmi tā atsevišķie mezgli (piemēram, absorbera šķīvis), ja par sistēmu uzskata cehu, tad elementi ir atsevišķie aparāti. Aplūkojot kā sistēmu rūpniecību, elementi ir cehi.

Starp sistēmas elementiem vienmēr pastāv funkcionāla savstarpējā saistība tehnoloģisko plūsmu veidā. Tehnoloģiskā plūsma ir enerģijas un masas pārvietošanās telpā.

Atsevišķa procesa hierarhijā elementi ir parādības, kas norisinās mikrolīmeņos un makrolīmeņos vai arī jaukti.

Analizējot procesus, kas notiek aparātos, visas parādības pieņemts dalīt divos līmeņos: *mikrolīmenī* (procesā mikrokinētika) un *makrolīmenī* (procesā makrokinētika). Mikrokinētikai pieskaitāmi fizikāl-

ķīmiskie efekti, t. i., fizikālo un ķīmisko parādību norises ātrumi molekulu (atomu) līmenī vai nelielā (lokālā) aparāta tilpumā. *Procesa makrokinētika* pēta fizikālķīmisko sistēmu izturēšanos visā aparātā. Tur mikroliemeņa efektiem pāri klājas hidromehāniskās parādības, siltuma un masas pārneses parādības, kuru struktūru nosaka aparāta konstruktīvās īpatnības.

Objekta analīzi veic šādos posmos:

1) pētījuma mērķa un uzdevuma formulēšana;
2) hierarhijas līmeņa noteikšana un elementu izvēle atkarībā no izvīrītā mērķa un procesa izzināšanas pakāpes. Sistēmas sadalīšana pa līmeņiem;

3) sistēmas elementu aprakstīšana matemātisko modeļu veidā;

4) matemātiskā modelēšana (sk. 27. lpp.);

5) pētījuma mērķa sasniegšanas iespēju novērtējums.

1.4. LĪDZĪBAS TEORIJA UN FIZIKĀLĀS MODELĒŠANAS PRINCIPI

Līdzības teorija. Līdzības teorija māca, kā organizējami eksperimenti, apstrādājami iegūtie rezultāti un kā nosakāmas procesa robežas, uz kurām šie rezultāti attiecināmi.

Līdzības teorijai ir liela nozīme ķīmijas tehnoloģijas procesu pētīšanā, kur vēl arvien matemātiskā pieeja mijas ar eksperimentālo. Ķīmijas tehnoloģijas procesu pētīšanas gaitā sastāda diferenciālvienādojumu (vai diferenciālvienādojumus), kas attiecas uz bezgalīgi mazu (elementāru) tilpumu un laiku (sk. 33. lpp.).

Diferenciālvienādojumi, kuros nav ievērotas konkrēta procesa īpatnības, apraksta veselu procesu kopu, kuras robežās darbojas izmantotie fizikas likumi. Konkrētā procesa kvalitatīvai raksturošanai diferenciālvienādojumus jāieslēdz papildu dati. Šādus papildu datus sauc par *viennozīmīgiem nosacījumiem*. Ja diferenciālvienādojumu risināšanā ievēro viennozīmīgos nosacījumus, process konkretizējas.

Līdzības teorija māca, kā izvēlēties viennozīmīgos nosacījumus, lai iegūtos rezultātus varētu vispārināt — attiecināt uz veselu līdzīgu procesu grupu. Tādējādi mēģinājuma datus, kas iegūti modelim, var attiecināt uz rūpniecisko objektu.

Viennozīmīgie nosacījumi ietver *sistēmas ģeometrisko līdzību, laika līdzību, procesu raksturojošo lielumu līdzību, sākuma nosacījumu un robežu nosacījumu līdzību*.

Ģeometriskā līdzība. Lai rūpnieciskā iekārtā un modelī notiekošās parādības būtu līdzīgas, vispirms jāievēro ģeometriskā līdzība.

Ģeometrisko līdzību var izteikt divējādi: ar *līdzības invariantiem* un ar *līdzības konstantēm*.

Ja divas sistēmas ir ģeometriski līdzīgas, tad vienas sistēmas divu lielumu attiecība ir vienāda ar otras sistēmas atbilstošo lielumu attiecību. Piemēram, ja 1.3. attēlā cilindrs *a* (rūpnieciskā iekārta) ģeometriski līdzīgs cilindram *b* (modelim), tad

$$\frac{H}{D} = \frac{h}{d} = inv = idem = i_1.$$

Sādi izteiktu līdzību sauc par līdzības invariantu un apzīmē ar simbolu $i_i = inv$ (invariants, nemainīgs) vai $i_i = idem$ (vienāds, viens un tas pats).

Ja attiecību izsaka starp vieniem un tiem pašiem lielumiem (H pret h ; D pret d u. c.), tad geometrisko līdzību izsaka ar *līdzības konstanti* C , t. i., geometriski līdzīgās sistēmās jābūt ievērotam nosacījumam

$$\frac{H}{h} = \frac{D}{d} = C_l.$$

Līdzības konstantes indekss l norāda, ka šī konstante attiecas uz ģeometriskajiem izmēriem.

Aplūkojot norises dažādās aparāta vietās, līdzības konstante C paliek nemainīgs lielums, bet invariants mainās. Turpretī, aizstājot vienu modeli ar otru, kam ir citi izmēri, līdzības konstante mainās, bet invariants paliek nemainīgs. *Invariantus sauc arī par simpleksiem.*

Laika līdzība. Ja attiecības starp salīdzināmo procesu norises laika intervāliem ir vienādas, tad procesos ievērota laika līdzība jeb tie ir *homohroni*.

Laika līdzība pastāv, ja

$$\tau'_1/\tau''_1 = \tau'_2/\tau''_2 = \tau'_3/\tau''_3 = \dots = C_\tau,$$

kur $\tau'_1, \tau'_2, \tau'_3 \dots$ — laika intervāli rūpnieciskā iekārtā; $\tau''_1, \tau''_2, \tau''_3$ — laika intervāli modeli; C_τ — *laika līdzības konstante*.

Ja $C_\tau = 1$, tad šādi procesi ir *sinhroni*.

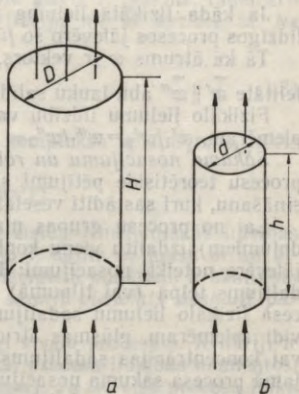
Fizikālo lielumu līdzība. Modelējot procesus, jāievēro arī procesus raksturojošo fizikālo lielumu līdzība, piemēram, pētot hidrodinamiskās parādības, jāievēro plūsmas ātruma w , blīvuma ρ un dinamiskās viskozitātes μ līdzība, t. i.,

$$w'_1/w''_1 = w'_2/w''_2 = \dots = C_w$$

$$\rho'_1/\rho''_1 = \rho'_2/\rho''_2 = \dots = C_\rho$$

$$\mu'_1/\mu''_1 = \mu'_2/\mu''_2 = \dots = C_\mu,$$

kur $w'_1, w'_2, \rho'_1, \rho'_2, \mu'_1, \mu'_2$ — ātrumi, blīvumi un dinamiskās viskozitātes rūpnieciskā iekārtā; $w''_1, w''_2, \rho''_1, \rho''_2, \mu''_1, \mu''_2$ — ātrumi, blīvumi un dinamiskās viskozitātes rūpnieciskajai iekārtai līdzīgajā modeli; C_w, C_ρ, C_μ — ātruma, blīvuma, dinamiskās viskozitātes līdzības konstantes.



1.3. att. Ģeometriskās līdzības shēma.

Ja kāda fizikālā lieluma vērtība ir mainīga visā tilpumā, tad līdzīgos procesos jāievēro šo *fizikālo lielumu lauka līdzība*¹.

Tā kā ātrums w ir vektors, tad vienlaikus jāievēro vektoru paralelītāte $\vec{w}' \parallel \vec{w}''$ abu lauku salīdzināmo punktu katrā pāri.

Fizikālo lielumu līdzību var izteikt arī ar līdzības invariantiem, piemēram, $w'_1/w'_2 = w''_1/w''_2 = \dots = i_w$.

Sākuma nosacījumu un robežu nosacījumu līdzība. Tehnoloģisko procesu teorētiskie pētījumi saistīti ar diferenciālvienādojumu atrisināšanu, kuri sastādīti veselai parādību grupai.

Lai no procesu grupas matemātiskā apraksta (diferenciālvienādojumiem) izdalītu vienu konkrētu procesu, diferenciālvienādojumus jāievēro noteikti nosacījumi: 1) pētāmā procesa fizikālo lielumu sadalījums telpā (vai tilpumā) sākuma momentā un 2) pētāmā procesa fizikālo lielumu sadalījums uz sistēmas robežām ar apkārtējo vidi (piemēram, plūsmas ātrums pie caurules sienām, temperatūras vai koncentrācijas sadalījums uz ķermeņa virsmas). Tie ir aplūkojamā procesa sākuma nosacījumi un robežu nosacījumi.

Līdzības teorēmas. Ir trīs līdzības teorēmas, kas noskaidro, 1) kādi lielumi mēģinājumos nosakāmi; 2) kādā veidā jānoformē mēģinājumu rezultāti; 3) kādas parādības uzskatāmas par līdzīgām un uz kādiem praktiskiem gadījumiem attiecināmi mēģinājumu rezultāti.

Pirmā līdzības teorēma (Nūtona teorēma). *Parādības raksturojošie kritēriji līdzības gadījumos ir skaitliski vienādi.*

Mehāniskos procesos darba pārvēršanu kinētiskajā enerģijā izsaka matemātiska sakarība $Fl = m\omega^2/2$, kur F — spēks, l — ceļš, m — masa, ω — ātrums.

Ja salīdzina divas mehāniskā ziņā līdzīgas sistēmas, tad pirmo sistēmu raksturo sakarība $F_1l_1 = m_1\omega_1^2/2$ un otro sistēmu — $F_2l_2 = m_2\omega_2^2/2$. No šiem vienādojumiem iegūst, ka

$$F_1l_1/(m_1\omega_1^2) = 1/2 \text{ un } F_2l_2/(m_2\omega_2^2) = 1/2 \text{ vai} \\ \frac{F_1l_1}{m_1\omega_1^2} = \frac{F_2l_2}{m_2\omega_2^2} \quad (1.2)$$

Līdz ar to redzams, ka mehāniskā ziņā līdzīgām sistēmām jābūt ievērotam nosacījumam

$$\frac{Fl}{m\omega^2} = idem = inv.$$

Atšķirībā no invariantajiem simpleksiem (H/D , ω_1/ω_2) šos līdzības invariantus sauc par *kompleksiem* — tie izteikti ar dažādiem fizikāliem lielumiem (F , l , m , ω). Invariantu kompleksus līdzības teorijā sauc arī par *līdzības kritērijiem*. Parasti tos apzīmē ar tā zinātnieka uzvārda pirmajiem burtiem, ar kura darbiem tie saistīti.

¹ Fizikālo lielumu lauks ir fizikālā lieluma momentāno vērtību izkliede pa visu tilpumu vai telpu, kurā notiek process.

Mehānikā daudz nozīmīgu atklājumu guvis I. Ņūtons, tādēļ kritēriju $Fl/(m\omega^2)$ sauc par Ņūtona kritēriju un to apzīmē ar Ne (*Newton*):

$$\frac{Fl}{m\omega^2} \equiv Ne. \quad (1.3)$$

Zīme \equiv norāda, ka uzrakstīts Ņūtona kompleksa apzīmējums, nevis tā funkcija no lielumiem F, l, m, ω :

$$Ne \neq \varphi(Fl/(m\omega^2)).$$

No izteiksmes (1.3) izriet, ka divu sistēmu mehāniskās līdzības gadījumā spēks F , kas reizināts ar ceļu l , dalīts ar masu m un ātruma ω kvadrātu, jebkuriem diviem attiecīgiem punktiem ir skaitliski vienāds. Ņūtona kritēriju jeb *Ņūtona skaitli pieņemts uzskatīt par dinamiskās līdzības kritēriju*.

Jāatceras, ka kritēriji nav nemainīgi visam procesam. Kritēriji ir skaitliski vienādi attiecīgos punktos tikai procesa līdzības momentos, tādēļ raksta, ka kritēriji ir identiski (*idem*). Ja tie visā procesa laikā paliktu nemainīgi, tad pareizāks būtu apzīmējums *const*.

Pirmā līdzības teorēma norāda arī uz to, kādi lielumi jānosaka mēģinājumos — jānosaka visi tie lielumi, kas ietverti procesu raksturojošos kritērijos.

No formulas (1.2) izriet, ka

$$\frac{\left(\frac{F_1}{F_2}\right)\left(\frac{l_1}{l_2}\right)}{\left(\frac{m_1}{m_2}\right)\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2} = 1.$$

Iekavās dotās attiecības ir līdzības konstantes:

$$\frac{F_1}{F_2} = C_F; \quad \frac{l_1}{l_2} = C_l; \quad \frac{m_1}{m_2} = C_m \quad \text{un} \quad \frac{\omega_1}{\omega_2} = C_\omega.$$

Sistēmu mehāniskās līdzības gadījumā jābūt ievērotai attiecībai

$$\frac{C_F C_l}{C_m C_\omega^2} = 1 \quad (1.4)$$

Formulas (1.4) izteiksmi sauc par *līdzības indikatoru*. No šīs formulas izprotams šāds pirmās līdzības teorēmas formulējums (pēc M. Kirpičova). *Līdzīgām parādībām līdzības indikatori vienādi ar vienu*.

Līdzības kritēriji ir bezdimensionāli skaitļi, piemēram,

$$Ne = \frac{[F] \cdot [l]}{[m][\omega^2]} = \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2} = 1.$$

Analogiski kā minētajā gadījumā iegūts Ņūtona kritērijs Ne , no vienādojumiem, kas raksturo citu parādību kopu, iegūstami arī citi

kritēriji. Pie tam nav svarīgi, vai sākotnējais vienādojums uzrakstīts algebriskā vai diferenciālā veidā. No sarežģītākiem vienādojumiem iespējams reizē iegūt vairākus kritērijus (sk. Navjē—Stoksa vienādojuma izrisinājumu 70. lpp.).

Līdzības kritēriji nav patvaļīgi izveidoti dažādu fizikālu lielumu kompleksi. Katrs no tiem atspoguļo noteiktu procesa daļu, un tiem ir noteikta fizikāla jēga.

Otrā līdzības teorēma (Federmana—Bekinhēma teorēma). *Parādības raksturojamas kā funkcionāla sakarība starp līdzības kritērijiem.*

Otrā līdzības teorēma rāda, ka mēģinājumu rezultāti jāizsaka kā funkcionāla sakarība starp kritēriju K_1 (kurā ietverts meklējamais lielums) un kritērijiem K_2, K_3, \dots , kuri raksturo procesa dažādās puses:

$$K_1 = f(K_2, K_3, \dots) \quad (1.5)$$

Otrās līdzības teorēmas trūkums ir tas, ka tā neparāda šīs funkcijas konkrēto veidu; tā parāda, starp kādiem kritērijiem jāmeklē sakarība, apkopojot mēģinājuma rezultātus.

Funkcijas konkrētais veids (vienādojums (1.5)) parasti izsakāms kā pakāpju funkcija:

$$K_1 = CK_2^m K_3^n, \quad (1.6)$$

vai eksponenciālā veidā (procesu kinētika):

$$K_1 = K_0 \exp(-\tau/\Theta) \quad (\text{dilstošs process});$$

$$K_1 = K_0 [1 - \exp(-\tau/\Theta)] \quad (\text{augošs process})$$

kur C, m, n — konstantes, kas iegūtas no eksperimentu grafikiem; K_0 — kritērija K_1 sākuma vērtība, ja $\tau=0$ (vai $\tau=\infty$); τ — laiks no procesa sākuma; Θ — procesa laika konstante, kas atkarīga no procesa realizēšanas apstākļiem.

Šādā veidā iegūtās formulas atšķiras no parastajām — empīriskajām formulām ar lielākām lietošanas iespējām, jo kritēriālie vienādojumi atspoguļo procesa dažādās puses. Tomēr jāpiezīmē, ka formulā (1.6) parādītā sakarība teorētiski nav pamatota (izņemot atsevišķus gadījumus), tādēļ formulas, kas iegūtas šādā veidā, lietojamas kritēriju K_2 un K_3 robežās.

Kritēriju skaitu, kas raksturo procesu (vienādojums (1.5)), iegūst pēc π teorēmas (Bekinhēma—Eigensona teorēmas) atkarībā no fizikālo lielumu skaita, kuri ietilpst procesu raksturojošos vienādojumos, un no to pamatvienībām.

Ja parādību raksturo n fizikālie lielumi un šos lielumus izsaka ar m pamatvienībām, tad ir tikai

$$\pi = n - m \quad (1.7)$$

bezdimensionālu grupu ar $K = z - m$ kompleksiem un $S = n - z$ simpleksiem, kur z — fizikālo lielumu skaits, kuriem ir dažādas vienības.

Piemēram, mehāniskos procesos sakarību starp darbu un kinētisko enerģiju izsaka vienādojums $Fl = m\omega^2/2$ (sk. 18. lpp.). So procesu raksturo fizikālie lielumi: spēks F , N ; ceļš l , m ; masa m , kg ; ātrums ω , m/s . Tātad $n=4$, $z=4$. Minēto fizikālo lielumu vienības komplektējas no vienībām kilograms, metrs un sekunde, tātad $m=3$. Pamatojoties uz π teorēmu, bezdimensionālo grupu skaits $\pi=4-3=1$, kompleksu skaits $K=4-3=1$, simpleksu skaits $S=4-4=0$.

Nosakot kritēriju skaitu un to veidu, kritērijs K_1 , kas ietver meklējamo lielumu, izsakāms kā funkcija no pārējiem kritērijiem $K_2, K_3 \dots$ (vienādojums (1.5)).

Kā jau minēts, procesu raksturojošus kritērijus iegūst, atrisinot pēc līdzības teorijas metodēm attiecīgos diferenciālvienādojumus (sk. 70. lpp.) vai algebriskās izteiksmes. Tas ir ļoti svarīgi, jo iespējams iegūt līdzības kritērijus no sastādītiem, bet neatrisināmiem procesu diferenciālvienādojumiem.

Piemēram, šķidrums plūsmas zaudētais spiediens berzes pārvarēšanai pēc Darsī—Veisbaha formulas (sk. vienādojumu (2.47) izsakāms šādi:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho \omega^2}{2} \quad \text{jeb} \quad \frac{\Delta p}{\rho \omega^2} = \frac{1}{2} \lambda \frac{l}{d}.$$

Saskaņā ar π teorēmu $n=5$, $m=3$, $z=4$, tātad $\pi=5-3=2$, $K=4-3=1$ un $S=5-4=1$.

Attiecība $\frac{l}{d} = G$ (ģeometriskais simplekss), bet $\lambda = f(Re)$ (sk. 63. lpp.).

Līdzības teorijā attiecību $\frac{\Delta p}{\rho \omega^2}$ sauc par *Eilera kritēriju* Eu . Tātad līdzīgās plūsmās spēkā ir šāda sakarība:

$$Eu = f(Re, G). \quad (1.8)$$

Trešā līdzības teorēma (Kirpičova—Guhmana teorēma). *Līdzīgi ir tādi procesi (parādības vai sistēmas), kuriem matemātiskās izteiksmes (diferenciālvienādojumi) ir vienādas un viennozīmīgie nosacījumi ir līdzīgi.*

Kritērijus, kuros ietilpst fizikālais lielums, kas nav ietverts viennozīmīgajos nosacījumos, sauc par *nosakāmiem kritērijiem*. Nosakāmais kritērijs ir tas kritērijs, kurā ietilpst nosakāmais lielums, piemēram, kritērijs K_1 vienādojumā (1.5). Pārējos kritērijus, kuros ietilpst viennozīmīgajos nosacījumos esošie fizikālie lielumi, sauc par *noteicošiem kritērijiem* (kritēriji $K_2, K_3 \dots$ vienādojumā (1.5)).

Plašāk lietojamie līdzības kritēriji. Līdzības teorijā tehnoloģisko procesu vispusīgai attēlošanai lieto īpašus līdzības kritērijus.

Hidraulisko un aerodinamisko procesu raksturošanai lieto *Reinoldsa, Eilera, Frūda, Galileja, Arhimēda un Grashofa* kritērijus. Daudzus no minētajiem kritērijiem iegūst, pārveidojot Ņūtona kritēriju.

Reinoldsa kritērijs Re . Šis kritērijs ir noteicošais kritērijs ne tikai hidrodinamikas un aerodinamikas vienādojumos, bet arī siltuma un masas apmaiņas (difūzijas) vienādojumos. *Tas raksturo viskoza šķidrums plūsmu un parāda attiecību starp inerces spēku un berzes spēku.*

Reinoldsa kritēriju iegūst, Ņūtona kritērija izteiksmē spēka F vietā liekot berzes spēku (sk. vienādojumu (2.16)). Ja slāņu virsmu apzīmē ar $S=l^2$, ātruma gradientu — ar $d\omega/dl$ un Ņūtona kritērijā masu izsaka kā $m=\rho l^3$, tad

$$Ne = \frac{\mu l^2 \frac{d\omega}{dl} l}{\rho l^3 \omega^2}.$$

Pēc saisināšanas

$$Ne dl = \frac{\mu}{\rho} \frac{d\omega}{\omega^2} \quad \text{vai} \quad Ne \int_0^l dl = \frac{\mu}{\rho} \int \frac{d\omega}{\omega^2}.$$

Integrējot (atmetot integrēšanas konstanti) iegūst

$$Ne = \frac{\mu}{\rho \omega l}. \quad (1.9)$$

Lai iegūtu veselus skaitļus, šo izteiksmi lieto apgrieztā veidā. Ja formulu lieto cauruļu aprēķināšanai, tad l vietā ievieto diametru d . Tā pārveidojot, iegūst Reinoldsa kritēriju parastā veidā:

$$Re = \frac{\omega d \rho}{\mu} = \frac{\omega d}{\nu} = \frac{\omega l}{\nu}, \quad (1.10)$$

kur ω — šķidrums daļiņu ātrums; ν — vides kinemātiskais viskozitātes koeficients, $\frac{\mu}{\rho}$; μ — vides dinamiskais viskozitātes koeficients.

Eilera kritērijs Eu . Eilera kritērijs izsaka attiecību starp statisko un dinamisko spiedienu. Tas sastopams vienādojumos, kas raksturo plūsmas spiediena zudumus. Eilera kritēriju iegūst no Ņūtona kritērija, ievietojot tajā $F = \Delta p l^2$ un $m = \rho l^3$, tad

$$Ne = \frac{\Delta p l^2 l}{l^3 \rho \omega^2} \quad \text{vai} \quad Eu = \frac{\Delta p}{\rho \omega^2}, \quad (1.11)$$

kur Δp — spiedienu starpība divos plūsmas punktos.

Frūda kritērijs Fr . Frūda kritērijs raksturo to procesu līdzību, kuri notiek smaguma spēka ietekmē. Ar to izsaka inerces spēka attiecību pret smaguma spēku. Šo kritēriju lieto ciklonu, centriģu un maisītāju aprēķinos.

Frūda kritēriju iegūst, izmantojot apgrieztu Ņūtona kritēriju un spēka F vietā ievietojot smaguma spēku, t. i., $F = mg$, tad

$$Ne = \frac{m \omega^2}{m g l} \quad \text{vai} \quad Fr = \frac{\omega^2}{g l}. \quad (1.12)$$

Jebkura kritēriju savstarpējā kombinācija (reizinājums, dalījums u. c.) ir jauns līdzības kritērijs.

Galileja kritērijs *Ga*. Galileja kritērijs raksturo plūsmas iekšējo berzes spēku attiecību pret smaguma spēku. To iegūst, kombinējot Frūda kritēriju ar Reinoldsa kritēriju:

$$\frac{(Re)^2}{Fr} = \frac{gl}{\omega^2} \left(\frac{\omega l}{v} \right)^2 = \frac{gl^3}{v} = Ga. \quad (1.13)$$

Arhimēda kritērijs *Ar*. Arhimēda kritērijs raksturo ārējo berzes spēku savstarpējo iedarbību ar konvekcijas spēkiem, kas rodas vides dažāda blīvuma dēļ.

Arhimēda kritēriju iegūst, Galileja kritēriju pareizinot ar lielumu

$$\frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0}. \quad Ar = Ga \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0} = \frac{gl^3}{v^2} \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0} \quad (1.14)$$

kur ρ_0 un ρ — vides blīvums divos sistēmas punktos; g — brīvās krišanas paātrinājums.

Grashofa kritērijs *Gr*. Grashofa kritērijs raksturo iekšējo berzes spēku un konvekcijas spēku savstarpējo ietekmi, kas rodas tāpēc, ka atsevišķos neizotermiskos plūsmas punktos ir blīvumu starpība.

Vides blīvums atkarībā no temperatūras mainās šādi:

$$\rho = \rho_0(1 - \beta_t \Delta t), \quad (1.15)$$

kur β_t — termiskās izplešanās koeficients; Δt — temperatūru starpība, kurai atbilst blīvumu starpība $\rho_0 - \rho$.

Arhimēda kritērijā ievietojot ρ vietā tā izteiksmi (sk. vienādojumu (1.15)), iegūst Grashofa kritēriju

$$Gr = \frac{gl^3 \beta_t \Delta t}{v^2} \quad (1.16)$$

Siltuma procesu raksturošanai lieto Nuselta, Bio, Furjē, Prantla, Peklē, Kutateladzes un citus kritērijus.

Nuselta kritērijs *Nu*. Nuselta kritērijs raksturo konvekcijas siltuma atdevi uz robežas starp plūsmu un virsmu:

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (1.17)$$

kur α — siltuma atdeves koeficients; λ — vides siltumvadītspējas koeficients; l — iekārtas noteicošais izmērs, caurulēm — diametrs.

Bio kritērijs *Bi*. Bio kritērijs parāda attiecību starp siltuma atdeves intensitāti α un sienas siltumvadītspēju λ_s/l_s nestacionārām siltuma plūsmām (sk. 260. lpp.):

$$Bi = \frac{\alpha l_s}{\lambda_s} \quad (1.18)$$

Furjē kritērijs Fo . Furjē kritēriju lieto nestacionāru siltuma apmaiņas procesu raksturošanai laika momentos, kad iestājas līdzība. Furjē kritēriju izsaka šādi:

$$Fo = \frac{\lambda \tau}{c \rho l^2} \quad (1.19)$$

kur λ — siltumvadītspējas koeficients; τ — ārējo apstākļu maiņas laiks; ρ — vides blīvums; c — vides īpatnējā siltumietilpība; l — iekārtas noteicošais izmērs.

Prantla kritērijs Pr . Šo kritēriju lieto kā noteicošo kritēriju konvekcijas vienādojumos:

$$Pr = \frac{v c \rho}{\lambda} = \frac{c \mu}{\lambda}, \quad (1.20)$$

Peklē kritērijs Pe . *Peklē kritērijs vienlaikus raksturo procesa hidrodinamiskos nosacījumus un apkārtējās vides siltuma īpašības.*

$$Pe = Pr \cdot Re = \frac{c \mu}{\lambda} \cdot \frac{\omega l}{\nu} = \frac{\omega l c \rho}{\lambda}, \quad (1.21)$$

kur ν — kinemātiskais viskozitātes koeficients; ρ — vides blīvums; λ — siltumvadītspējas koeficients; μ — dinamiskais viskozitātes koeficients; c — vides īpatnējā siltumietilpība.

Kutateladzies kritērijs Ku . *Kutateladzies kritērijs raksturo siltuma apmaiņu fāžu pārvērtībās:*

$$Ku = \frac{r}{c \Delta t}, \quad (1.22)$$

kur r — agregātstāvokļa maiņas siltums; c — vides īpatnējā siltumietilpība; Δt — temperatūru starpība starp piesātināto stāvokli un pārkarsējumu.

Starp difūzijas procesiem un siltuma procesiem pastāv analogija. Difūzijas procesus raksturojošie kritēriji līdzīgi siltuma procesu kritērijiem. Difūzijas kritērijos siltuma apmaiņas koeficienta vietā ir masas apmaiņas koeficients β , bet siltumvadītspējas un temperatūras vadītspējas koeficientu vietā — difūzijas koeficients D .

Šo procesu analogija atspoguļojas arī attiecīgajos kritērijos, piemēram, Nuselta, Furjē un Prantla kritēriji difūzijas procesiem ir šādi:

$$Nu_d = \frac{\beta l}{D}; \quad Fo_d = \frac{D \tau}{c \rho l^2}; \quad Pr_d = \frac{c \mu}{D}.$$

Dimensiju analīzes metode. Līdzības teoriju var lietot tad, ja iespējams sastādīt diferenciālvienādojumus un precizēt viennozīmīgos nosacījumus. Pētot sarežģītus procesus, bieži vien neizdodas sastādīt diferenciālvienādojumus, kas raksturotu procesu. Šādos gadījumos, lai iegūtu kritēriālos vienādojumus, lieto dimensiju analīzes.

metodi. Šo metodi var lietot tikai tad, ja iepriekšēju eksperimentālo pētījumu gaitā noskaidrots, kādi fizikālie lielumi un parametri ietekmē procesa gaitu.

Lai izprastu dimensiju analīzes metodes būtību, noskaidrosim, kāda sakarība pastāv starp fizikāliem lielumiem un ar kādiem kritērijiem var izteikt lamināru izotermisku šķidruma plūsmu taisnā caurulē.

Nezinot likumu, kādam pakļauta šķidruma plūsma caurulēs, pēc vairākiem izdarītiem eksperimentiem un iegūtās pieredzes var secināt, ka spiediena zudums Δp caurulē starp ieplūdi un izplūdi atkarīgs no plūsmas ātruma w , šķidruma blīvuma ρ , dinamiskās viskozitātes μ , caurules diametra d un garuma l . Tātad

$$\Delta p = f(w, \rho, \mu, d, l). \quad (1.23)$$

Šo funkciju var izteikt kā pakāpju vienādojumu:

$$\Delta p = w^{a_1} \rho^{a_2} \mu^{a_3} d^{a_4} l^{a_5}. \quad (1.24)$$

Funkciju (1.23) un vienādojumu (1.24) rakstot kā bezdimensionālu kompleksu, iegūst

$$K = \varphi(\Delta p, w, \rho, \mu, d, l) \text{ vai} \\ K = C \Delta p^a w^b \rho^c \mu^e d^j l^h. \quad (1.25)$$

Vienādojumā (1.25) ietilpstošo lielumu dimensijas izsaka ar M , L un Θ (masa, garums, laiks) šādi:

$$|\Delta p| = |M| |L|^{-1} |\Theta|^{-2}; \quad |w| = |L| |\Theta|^{-1}; \quad |\rho| = |M| |L|^{-3}; \\ |\mu| = |M| |L|^{-1} |\Theta|^{-1}; \quad |d| = |L|; \quad |l| = |L|.$$

Mainīgo dimensiju pakāpes, kas ietilpst vienādojumā (1.25), rakstāmas dimensiju matricas veidā šādi:

	$ \Delta p $	$ w $	$ \rho $	$ \mu $	$ d $	$ l $	
$ M $	1	0	1	1	0	0	
$ L $	-1	1	-3	-1	1	1	(1.26)
$ \Theta $	-2	-1	0	-1	0	0	

Pēc π teorēmas (sk. vienādojumu (1.7)) aplūkojamā gadījumā, kad fizikālo lielumu skaits $n=6$ un pamatdimensiju (M , L , Θ) skaits $m=3$, procesu raksturojošo bezdimensionālo grupu skaits

$$\pi = n - m = 6 - 3 = 3.$$

Kompleksu skaits $K = z - m = 5 - 3 = 2$ un simpleksu skaits $S = n - z = 6 - 5 = 1$.

Pēc matricas (1.26) elementiem aprēķina pakāpes a , b , c , e , f un h , sastādot lineāru vienādojumu sistēmu:

$$\begin{aligned} M & a + c + e = 0 \\ L & -a + b - 3c - e + f + h = 0 \\ \Theta & -2a - b - e = 0. \end{aligned} \quad (1.27)$$

So trīs vienādojumu sistēmu, kurā ir seši nezināmie, risina šādi:

1) sāk no $\Delta\rho$, kas ir meklējamais lielums, un pieņem, ka $\alpha=1$, $e=0$ un $k=0$. No vienādojumu sistēmas (1.27) iegūst $c=-1$, $b=-2$ un $f=0$;

2) ja $a=0$, $e=1$ un $k=0$, tad $c=1$, $b=-1$ un $f=-1$;

3) ja $a=0$, $e=0$ un $k=1$, tad $c=0$, $b=0$ un $f=-1$.

Izmantojot iegūtās pakāpju vērtības, var uzrakstīt šādu atrisinājuma matricu:

$$\begin{array}{c|cccccc} & |\Delta\rho| & |\omega| & |\rho| & |\mu| & |d| & |l| \\ \hline & a & b & c & e & f & k \\ \hline \pi_1 & 1 & -2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ \pi_2 & 0 & -1 & -1 & 1 & -1 & 0 \\ \pi_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{array} \quad (1.28)$$

No matricas (1.28) iegūst trīs bezdimensionālas grupas

$$\pi_1 = \frac{\Delta\rho}{\rho\omega^2}; \quad \pi_2 = \frac{\mu}{\omega d\rho}; \quad \pi_3 = \frac{l}{d}.$$

Iegūtie bezdimensionālie kompleksi ir Eilera kritērijs Eu , apgriezts Reynoldsa kritērijs $1/Re$ un ģeometriskais simplekss G . Eilera kritērijā ietilpst meklējamais lielums $\Delta\rho$, tādēļ tas ir nosakāmais kritērijs, pārējie kritēriji ir noteicošie kritēriji.

Ievērojot otro līdzības teorēmu, var rakstīt (sk. vienādojumu (1.8)):

$$Eu = f(Re, G).$$

So funkciju izsaka kā pakāpju funkciju (sk. vienādojumu (1.6)) un iegūst

$$Eu = C Re^{-m} G^n, \quad (1.29)$$

kur C , m un n iegūst no eksperimenta rezultātiem. Laminārai šķidruma (gāzes) plūsmā $C=32$, $m=-1$, $n=1$ (sk. 72. lpp.).

Dimensiju analīzes metodes trūkumi:

1) ja nelieto procesa viennozīmīgos nosacījumus, kritērijus grūti iedalīt nosakāmos un noteicošos kritērijos;

2) ja process eksperimentāli nav pietiekami izpētīts, tad var gadīties, ka kāds no svarīgiem fizikāliem lielumiem tiek ignorēts vai arī tiek izmantots mazsvarīgs parametrs.

Fizikālā modelēšana. Fizikālā modelēšana ir pētišanas metode, kur, izmantojot modeli, realizē un pēta procesus, kas analogiski ar procesiem reālos rūpniecības aparātos. Fizikālās modelēšanas pamatā ir trešā līdzības teorēma.

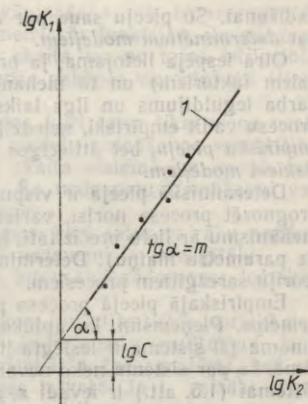
Pētījumi attiecībā uz modeļiem no rūpniecības apstākļiem var atšķirties ar lietojamo vidi, temperatūru, spiedienu u. c. Iegūtos rezultātus apstrādā un izsaka pēc otrās līdzības teorēmas līdzības kritēriju veidā.

Procesu raksturojošos līdzības kritērijus iegūst no procesu aprakstošiem vienādojumiem (algebriskiem vienādojumiem vai diferenciālvienādojumiem) vai arī pēc dimensiju analīzes metodes (ja neizdodas sastādīt procesa pamatvienādojumus).

Sarežģītiem procesiem, ja noteicošo kritēriju skaits lielāks par 2...3, pilnīgu līdzību neizdodas sasniegt. Sarežģīto ķīmisko procesu pētišanā līdzības teorija nav lietojama.

Modelēšana ievērojami vienkāršojas, ja noteiktā režīmā kāds no fizikālajiem lielumiem (kritērijiem) necīgi ietekmē procesu, — tad to var neievērot.

Fizikālajā modelēšanā eksperimenta rezultātus izsaka vispārināta kritēriju vienādojuma veidā (sk. vienādojumu (1.6)). Piemēram, ja procesa funkcionālā sakarība ir $K_1 = f(K_2)$, tad to var iedomāties kā pakāpju funkciju, t. i., $K_1 = CK_2^m$, kur C un m ir nezināmi. Logaritmējot šo vienādojumu, iegūst $\lg K_1 = \lg C + m \lg K_2$. Tas ir taisnes vienādojums logaritmiskās koordinātās $\lg K_1$, $\lg K_2$. Šajās koordinātās atliek mēģinājuma rezultātā iegūtos datus (1.4. att.). Novelk taisni l , tad $\operatorname{tg} \alpha = m$, bet $\lg C$ ir nogrieznis uz ordinātas.



1.4. att. Sakarība $\lg K_1 = f(\lg K_2)$.

1.5. MATEMĀTISKĀ MODELĒŠANA

Par kāda procesa matemātisko modeli sauc šā procesa aprakstu ar matemātiskiem lielumiem un sakarībām. Matemātiskā modelēšana ir tāda pētišanas metode, kurā procesa vietā tiek pētiots tā matemātiskais modelis. Sajā darbā bieži tiek izmantoti elektroniskie skaitļotāji.

Matemātiskā modelēšana ietver trīs posmus:

- 1) procesa matemātiskā modeļa sastādīšana;
- 2) matemātiskā modeļa atrisināšanas algoritma sastādīšana;
- 3) modeļa un pētāmā objekta adekvātuma pārbaude.

Matemātiskās modelēšanas metodes, lietojot ESM, rada iespēju ar nelieliem materiāliem izdevumiem pētīt dažādus procesa variantus, tā īpašības, atklāt tā uzlabošanas iespējas un noteikt procesa vadišanas optimālo variantu.

Matemātiskā modelēšana sākas ar matemātiskā modeļa sastādīšanu. Sastādot matemātisko modeli, var izmantot divas iespējas.

Pirmā iespēja pamatojas uz procesa mehānisma izpēti, kuras rezultātā rodas teorija, ko izmanto tālākai procesa analīzei un

vadišanai. So pieeju sauc par *determinisku pieeju*, bet modeļus — par *determinētiem modeļiem*.

Otrā iespēja lietojama, ja process ir sarežģīts (atkarīgs no daudziem faktoriem) un tā mehānisma atšifrēšanai nepieciešams liels darba ieguldījums un ilgs laiks. Šādā gadījumā vēlams iemācīties procesu vadīt empīriski, neiedziļinoties teorijā. Tādu pieeju sauc par *empīrisku pieeju*, bet attiecīgos matemātiskos modeļus — par *empīriskiem modeļiem*.

Determiniskā pieeja ir vispusīga, pēc iegūtajiem rezultātiem var prognozēt procesa norisi, variantus (piemēram, zinot kāda procesa mehānismu ar lielu precizitāti, iespējams paredzēt, kā process reaģēs uz parametru maiņu). Determiniskās pieejas trūkumi — grūti radīt teoriju sarežģītiem procesiem.

Empīriskajā pieejā procesa pētišanas pamatā ir «melnās kastes» princips. Pieņemsim, ka aplūkojamās sistēmas iekšējā saistība nav zināma (ši sistēma ir ieslēgta it kā «melnā kastē»). Tas nebūt nenozīmē, ka par sistēmu neko nevar uzzināt un ka to nevar vadīt. Tādai sistēmai (1.5. att.) ir ievadi x, z un izvadi y , kurus iespējams lietot sistēmas analīzei un vadišanai. Šajā nolūkā jāmaina ievadu vērtības (ierosme — $x_1, x_2, \dots; z_1, z_2, \dots$) un jānoskaidro, kā tādā gadījumā mainās izvadparametri (atsauce — y_1, y_2, \dots).

Šādu sakarību noskaidrošana nav nekas cits kā eksperiments. Katrs eksperiments ir kādu ievadāmo kontrolējamo parametru (ierosmes) maiņa realizējamā procesā un mūs interesējošās atsaucis mērīšana. Eksperimentā iegūst sistēmas atsauci uz konkrēto ierosmi (sk. 104. lpp.).

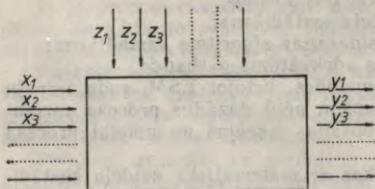
Izdarot atkārtotus eksperimentus un analizējot to rezultātus, var iegūt empīrisku vienādojumu (atsauces funkciju) vai vienādojumu sistēmu, kas izsaka atsaucis atkarību no ierosmēm. Šie vienādojumi arī ir sistēmas empīriskie matemātiskie modeļi. Šos modeļus lieto procesa analizēšanai, vadišanai un optimālu režīmu noteikšanai.

Empīriskās pieejas priekšrocība ir tās vienkāršība, bet tās trūkums — šaura iespēja ekstrapolēt, t. i., prognozēt procesa norisi ārpus tām robežām, kurās mainīti lielumi eksperimenta laikā.

Modelēšanas praksē ļoti svarīga ir pāreja no modeļa uz rūpniecisko objektu. Tad jāparedz, kā mainīsies procesa (aparāta) parametri, ja no maza modeļa pāries uz lielu oriģinālu. Strādājot ar determinētiem modeļiem, šādas pārejas sekas ir drošāk paredzamas.

Procesu matemātiskie modeļi, kas iegūti pēc determiniskās pieejas, pēc savas struktūras ir ļoti dažādi. Tipiskie determinētie modeļi ir iedalāmi:

1) *algebriskos vienādojumos*, kuros ar mainīgiem lielumiem notiek saskaitīšana,



1.5. att. «Melnās kastes» principiālā shēma:
 x — kontrolējamie ievadi; z — nekontrolējamie ievadi; y — izvadi.

atņemšana, reizināšana, dalīšana, kāpināšana, un *transcendentos vienādojumus*, kuros ietilpst trigonometriskās funkcijas. Risināšanas grūtības atkarīgas no vienādojumu skaita un no tajos ietilpstošo funkciju veida. Vieglāk risināmi pirmās pakāpes vienādojumi (lineārie), sarežģītāk — transcendentie;

2) *parastos diferenciālvienādojumus*, kuri satur tikai viena neatkarīgā mainīgā lieluma funkciju. So modeļu risināšanas sarežģītība atkarīga no diferenciālvienādojumu skaita sistēmā un no tā, vai vienādojumi ir lineāri vai nelineāri. So uzdevumu risināšanai var izmantot analogās skaitļošanas mašīnas;

3) *parciālos diferenciālvienādojumus*, kuri satur vairāku neatkarīgo mainīgo lielumu funkcijas. Šādi uzdevumi ir sarežģītāki.

Modeļi var saturēt arī, piemēram, integrālvienādojumus, loģiskās operācijas u. c.

Empīriskas pieejas gadījumā atsaucēs funkcijas veids iepriekš nav zināms, tas ir jāizvēlas atkarībā no eksperimentu rezultātiem. Ja y atkarīgs tikai no x un atkarība ir vienkārša (pēc grafika), tad atsaucēs funkciju var noteikt pēc līknes izskata. Ja ir vairāki argumenti vai grafiks ir sarežģīts, tad rodas grūtības.

Eksperimentālos modeļus bieži izsaka regresijas vienādojumu veidā.

Ja atsaucē y (sk. 1.5. att.) atkarīga no kontrolējamām ierosmēm (x_1, x_2, \dots, x_n) un nekontrolējamām ierosmēm (z_1, z_2, \dots, z_n) pēc sakarības

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n, z_1, z_2, \dots, z_n)$$

un ja nekontrolējamās ierosmes neievērojami maz ietekmē y , tad piedējā vienādojuma labās puses funkciju var sadalīt divās funkcijās:

$$y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) + \psi(z_1, z_2, \dots, z_n).$$

Funkciju $\varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ (jeb īsāk $\varphi(x_i)$) uzskata par empīriskā modeļa pamatu, bet funkciju $\psi(z_1, z_2, \dots, z_n)$ (jeb īsāk $\psi(z_i)$) — par kļūdu.

Lielāko daļu funkciju, ar ko sastopas tehnoloģiskos procesos, iespējams izvirzīt Teilora rindā, tāpēc funkciju $\varphi(x_i)$ sākumā ierobežo ar rindas pirmajiem locekļiem. Iegūtais polinoms aptuveni izsaka nezināmo funkciju $\varphi(x_i)$. Tuvinājuma kvalitāti nosaka Teilora rindas atlikušā daļa, kuru esam ignorējuši. Polinoma koeficientus aprēķina pēc vismazāko kvadrātu metodes.

Empīriskās (arī determiniskās) pieejas gadījumos jāpārbauda iegūto vienādojumu adekvātums pētāmajam procesam, t. i., cik precīzi tie apraksta attiecīgo procesu.

Adekvātuma pārbaudes princips ir tāds, ka salīdzina aprēķinu rezultātu izklieri ar eksperimenta kļūdu, kas iegūta, salīdzinot paralēlus eksperimentus. Ja izklieri praktiski sakrīt ar eksperimenta kļūdu, tad modelis ir adekvāts.

Empīriskā modeļa iegūšanai eksperimenta rezultāti jāizsaka iespējamā vienkāršākā veidā. Vispirms pārbauda polinomus (1. pakāpes, 2. pakāpes utt.). Ja kļūda ir liela, tad izvēlas cita veida funkcijas.

Pieņemsim, piemēram, ka y atkarīgs no trim mainīgiem lielumiem x_1 , x_2 un x_3 . Ja eksperimentos konstatēts, ka y vērtības mainās nedaudz, tad var pārbaudīt hipotēzi $y=b_0$ (kur b_0 — empiriski noteikts lielums). Ja pārbaude parāda, ka y atšķirība no b_0 ir kļūdu robežās, tad hipotēzi

$$y=b_0 \quad (1.30)$$

var uzskatīt var pamatotu.

Ja turpretī eksperimentu un aprēķinu rezultātā iegūtās y atšķirības nevar izskaidrot ar kļūdu, tad vienādojums (1.30) (modelis) nav adekvāts procesam. Tad var pārbaudīt nākamo lineāro tuvinājumu:

$$y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3$$

(koeficienti b_0 , b_1 , b_2 , b_3 jānosaka empīriski).

Ja arī šis vienādojums nav adekvāts procesam, tad rezultātus apstrādā kā otrās pakāpes polinomu:

$$y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3+b_{11}x_1^2+b_{22}x_2^2+b_{33}x_3^2+ \\ +b_{12}x_1x_2+b_{13}x_1x_3+b_{23}x_2x_3.$$

Ja arī šis vienādojums nav adekvāts procesam, tad pārbauda kā trešās pakāpes polinomu utt. Augot polinomu pakāpei, precizitāte pieaug, bet vienlaikus palielinās nepieciešamais eksperimentu skaits.

Dažreiz polinomu vietā lieto cita veida funkcijas, piemēram, $y=Cx^m x_2^n x_3^k$ (sk. vienādojumu (1.6)). Koeficientu C un pakāpes m , n , k nosaka eksperimentāli (sk. 27. lpp.).

Vienkāršos matemātiskos modeļus var risināt analītiski. Sarežģītus modeļus risina ar skaitļošanas mašīnām.

Ja lieto ESM, tad, pamatojoties uz procesa modeli (matemātisko aprakstu), sastāda algoritmu (blokskāmu), kas nepieciešama programmas izstrādāšanai.

Darbu ar matemātisko modeli, izmantojot ESM, sauc par matemātisko modelēšanu atšķirībā no fizikālās modelēšanas, kad modelis un oriģināls ir fiziski identiski.

Pretstatīt vienu modelēšanas metodi otrai ir nepareizi. Tehnisko procesu aprēķinos izmantojamās abas metodes un lietojama tā, kura attiecīgajā pētīšanas posmā ir efektīvāka.

Jēdziens par ķīmijas tehnoloģijas procesu optimizāciju. Inženiera uzdevums vienmēr ir bijis ar minimālu darba patēriņu sasniegt vislabākos rezultātus. Šādu rezultātu sasniegšana agrāk parasti pamatojās uz speciālista pieredzi, intuīciju.

Izveidojoties kibernetikai — zinātnei par sarežģītu sistēmu vadīšanu un sākoties skaitļošanas mašīnu lietošanai projektēšanā, vadīšanā, kā arī ekonomikā, radās jauns zinātnisks virziens — *tehnoloģisko procesu optimizācija*.

Tehnoloģisko procesu optimizācija iedalās trīs posmos: 1) uzdevuma formulēšana; 2) optimizēšanas algoritma atrašana (optimālo apstākļu atrašana); 3) optimālo apstākļu ieviešana ražošanā.

Uzdevuma formulēšana ir galvenais un arī grūtākais posms optimizācijā. Slikti formulēts uzdevums, bet atbilstoši šim formulējumam pareizi atrisināts uzdevums var dot absurdu praktisko rezultātu.

Tehnoloģisko procesu uzdevumu formulēšanā jāņem vērā nozares vispārējā attīstība, procesu fizikāli ķīmiskās īpatnības, ekonomiskie apsvērumi, konjunktūra un daudzi citi faktori.

Pirms optimizācijas uzdevuma sastādīšanas jābūt izraudzītam *optimizācijas kritērijam*. Optimizācijas kritērijam jāapmierina trīs prasības: 1) jābūt vienīgajam; 2) jābūt izteiktam skaitliski; 3) uzlabojoties sistēmas darbībai, jāmainās monotoni.

Pati grūtākā prasība ir tā, ka kritērijam jābūt vienīgajam. Optimizācijas kritērijs ir viens no vairākiem procesa rādītājiem. Ražošanā mūs interesē nevis viens, bet vairāki rādītāji, un mēs vēlamies, lai kaut pēc dažiem rādītājiem sistēma būtu vislabākā. Praktiski vienmēr ir vēlams, lai iekārtas ražīgums, produkcijas kvalitāte, peļņa būtu maksimāli, bet pašizmaksa, zudumi, kaitīgie izdalījumi apkārtējā vidē — minimāli. Visus nosauktos rādītājus nevar pieņemt par optimizācijas kritērijiem tāpēc, ka dažādie rādītāji ekstremālās vērtības (minimālās, maksimālās) sasniedz dažādos apstākļos.

Optimizējot lielas vienības (rūpnīcu), labi darbojas *ekonomiskie kritēriji* — rentabilitāte, peļņa, pašizmaksa u. c. Optimizācijas risināšana pēc šiem kritērijiem ir jo sarežģītāka, jo augstāka ir hierarhija (cehs—rūpnīca—apvienība—ministrija). Ekonomiskos kritērijus parasti lieto, sākot ar rūpnīcu un lielākiem objektiem.

Vienkāršākiem gadījumiem (tehnoloģiskā procesa atsevišķiem posmiem, aparātiem u. c.) lieto tehnoloģiskos kritērijus — ražīgumu, cikla ilgumu, produkta kvalitāti utt. Šādu optimizāciju sauc par *lokālo optimizāciju*.

Prasība kritēriju izteikt skaitliski izskaidrojama ar nepieciešamību salīdzināt vairākus variantus. Piemēram, novērtējums «labs», «slikts» ir ar subjektīvu raksturu, un variantu salīdzināšana nav iespējama.

Prasība pēc monotonas kritēriju maiņas arī izskaidrojama ar gala rezultātu salīdzināšanu. Objekta optimizācijas iespējas vērtē pēc principa: «Jo kritērijs lielāks (mazāks), jo labāk». Salīdzinot variantus pēc ekonomiskajiem kritērijiem, jābūt slēdzienam pēc principa, «jo augstāka peļņa, jo labāk» un «jo mazāka pašizmaksa, jo labāk».

Par optimizācijas kritēriju nevar būt parametrs, kas raksturo sistēmu tad, ja tam ir optimāla vērtība. Tas ir *optimizācijas faktors*.

Tehnoloģisko procesu optimizācijai ir nozīme tad, ja rūpnīcā ir augsta mehanizācija, automatizācija un vispārēja ražošanas kultūra.

I. HIDROMEĀNISKIE PROCESI UN APARĀTI

2. HIDRAULIKAS PAMATI

Hidraulika ir zinātne par šķidrumu līdzsvara un kustības likumsakarībām un šo likumsakarību izmantošanu dažādu tehnisku uzdevumu risināšanai. Ar D. Bernulli un L. Eilera darbiem XVIII gadsimtā hidraulika kļuva par mehānikas atzaru un to nosauca par *hidromehāniku* analogiski cietvielu mehānikai.

Ķīmijas tehnoloģijā hidromehānika aplūko šķidru vielu un gāzveida vielu (ja gāzei (tvaikam) ievērojami nemainās blīvums) plūsmas caurulēs un aparātos, kā arī nevienmērīgu sistēmu sadalīšanu: nostādināšanu, filtrēšanu, centrifugēšanu u. c.

Ķīmijā tehnoloģijā hidraulikas zināšanas palīdz izprast norises, kas notiek reaktoros, kolonnu tipa aparātos, žāvētavās, ceļos u. c. Pamatojoties uz šīm zināšanām, iespējams izvēlēties optimālos darba apstākļus un projektēt intensīvas darbības iekārtas.

Šķidrums (gāzēs) molekulas ir ļoti kustīgas, tādēļ šķidrumiem (gāzēm) nav noteiktas ārējās formas un tie ieņem trauka formu. Pieņemts uzskatīt, ka šķidrumi ir blīva viendabīga vide, ignorējot attālumus starp molekulām.

Hidraulikā parādību vienkāršākai matemātiskai raksturošanai pieņem, ka šķidrumi nav saspiežami, to tilpums nav atkarīgs no temperatūras un tie nepretojas stiepes un bīdes spēkiem. Dabā šādi šķidrumi nepastāv, tādēļ tos sauc par *ideāliem šķidrumiem*. Dabā sastopamie *reālie šķidrumi* atšķirībā no ideāliem šķidrumiem pretojas bīdes spēkiem. Šo šķidrumu īpašību raksturo viskozitāte.

Reālie šķidrumi iedalās *istos šķidrumsos* (pilienvēda šķidrumsos) un *gāzveida šķidrumsos* (elastīgos šķidrumsos).

Hidrauliku iedala *hidrostatikā*, kas pēta šķidrumus miera stāvoklī, un *hidrodinamikā*, kas pēta likumus, kādiem pakļauti šķidrumi kustībā.

2.1. HIDROSTATIKA

Hidrostatika apskata šķidrumus miera stāvoklī un līdzsvara stāvoklī. Šādos gadījumos neizpaužas reālo šķidrumu raksturīgā īpašība — berze, jo nav kustības. Secinājumi, kas iegūti attiecībā uz ideāliem šķidrumiem, hidrostatikā lietojami bez labojumiem.

Hidrostatiskais spiediens. Šķidrumos darbojas virsmas spēki (proporcionāli virsmai) un masas spēki (proporcionāli šķidruma masai un paātrinājumam). Šo spēku darbības rezultātā rodas spiediens, kuru sauc par *hidrostatisko spiedienu*. Ja uz laukumu, kas novietots slīpi zem šķidruma līmeņa un vienāds ar S , darbojas spēks P , tad spiediens laukuma dažādos punktos ir dažāds un atkarīgs no iegremdēšanas dziļuma.

Attiecību $\frac{P}{S} = p_{\text{vid}}$ sauc par *vidējo hidrostatisko spiedienu*, un tas atbilst spiedienam laukuma masas centrā.

Samazinot šo laukumu no S līdz ΔS , attiecīgi samazināsies arī spēks P līdz ΔP . Robežu, uz ko tiecas attiecība $\frac{\Delta P}{\Delta S}$, ja $\Delta S \rightarrow 0$, sauc par *hidrostatisko spiedienu punktā* un matemātiski izsaka šādi:

$$\lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S} = \frac{dP}{dS} = p.$$

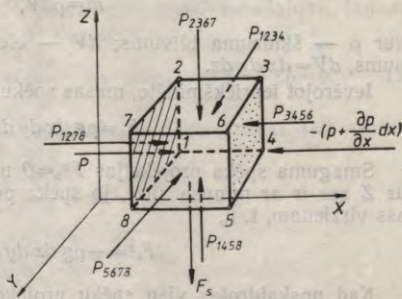
Ja vienlaikus samazinās ΔP un ΔS , tad p ir galīgs lielums.

Hidrostatiskais spiediens jebkurā šķidruma punktā visos virzienos ir vienāds. Piemēram, ja uz punktu darbojas spēks p_1 , tad pretī tam darbojas tāds pats spēks p'_1 , t. i., $p_1 = p'_1$. Tāpat spēkam p_2 darbojas pretī ar to vienāds spēks p'_2 utt. Jābūt ievērotam nosacījumam, ka $p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p'_1 = p'_2 = p'_3 = p'_4$. Pretējā gadījumā punkts neatrodas miera stāvoklī, bet ir kustībā.

Hidrostatiskais spiediens atkarīgs tikai no punkta atrašanās vietas, t. i., $p = f(x, y, z)$.

Eilera diferenciālvienādojumi hidrostatikai. Diferenciālvienādojumus sastāda parādību matemātiskai raksturošanai. Atrisinot diferenciālvienādojumus, iegūst inženieru praksē lietojamās formulas. Diferenciālvienādojumu nozīme kļūst labi izprotama, noskaidrojot, kā iegūst un atrisina Eilera diferenciālvienādojumus. Diferenciālvienādojumu sastādīšanas pamatā ir matemātikas un fizikas pamatlikumu ievērošana.

Zem šķidruma līmeņa izdala elementāru paralēlskaldņu formas šķidruma tilpumu 12345678 un novelk koordinātu asis (2.1. att.). Ja šis šķidruma tilpums atrodas miera stāvoklī, tad ir ievērots statikas pamatlikums: *visu spēku, kas darbojas uz šo elementāro paralēlskaldni,*



2.1. att. Shēma Eilera diferenciālvienādojuma sastādīšanai.

projekciju summai uz jebkuras no koordinātu asīm jābūt vienādai ar nulli. Uz šī elementārā paralēlskaldņa virsmām darbojas hidrostatiskais spiediens p un masas spēks F_s .

Ja pieņem, ka virsotnē 1 darbojas hidrostatiskais spiediens p , tad uz visu skaldni 1278 darbosies hidrostatiskā spiediena spēks P_{1278} . Pieņem, ka hidrostatiskais spiediens uz šķautnes 1-4 (sk. 2.1. att.) attālumā ∂x mainās par ∂p . Tad uz garuma vienību spiediena maiņa ir $\frac{\partial p}{\partial x}$. Šo attiecību sauc par *spiediena gradientu* X ass virzienā.

Šķautnes 1-4 kopējais garums ir dx , tādēļ hidrostatiskā spiediena maiņa uz visu šķautni ir $\frac{\partial p}{\partial x} dx$. Hidrostatiskais spiediens punktā 4 ir $p + \frac{\partial p}{\partial x} dx$. Tā kā hidrostatiskais spiediens punktā 4 vērsts pretēji X ass virzienam, tam jāliek priekšā mīnusa zīme.

Hidrostatiskā spiediena spēks, kas darbojas uz visu skaldni 1278, ir $P_{1278} = p dy dz$. Spēka P_{1278} projekcija uz X ass ir P_{1278}^x . Spēks $P_{1278}^x = P_{1278}^x$.

Hidrostatiskā spiediena spēks uz visu skaldni 3456 ir $P_{3456} = -\left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx\right) dy dz$. Šī spēka projekcija uz X ass ir vienāda ar pašu spēku (pēc analogijas ar spēka projekciju uz skaldnes 1278), t. i., $P_{3456}^x = P_{3456}^x$. Pārējo hidrostatiskā spiediena spēku projekcijas uz X ass vienādas ar nulli.

Uz elementāro paralēlskaldni līdz ar hidrostatisko spiedienu vēl darbojas masas spēks F_s , kas izsakāms šādi:

$$F_s = mg,$$

kur m — paralēlskaldņa masa; g — brīvās krišanas paātrinājums.

No blīvuma definīcijas izriet, ka

$$m = \rho dV,$$

kur ρ — šķidrums blīvums; dV — elementārā paralēlskaldņa tilpums, $dV = dx dy dz$.

Ievērojot iepriekšminēto, masas spēku var izteikt šādi:

$$F_s = \rho g dx dy dz.$$

Smaguma spēka projekcijas $F_s^x = 0$ un $F_s^y = 0$. Projekcija $F_s^z = F_s$ uz Z ass ir ar mīnusa zīmi, jo spēka projekcijas virziens pretējs Z ass virzienam, t. i.,

$$F_s^z = -\rho g dx dy dz.$$

Kad noskaidrotas visu spēku projekcijas uz jebkuru koordinātu asi, tad spēku projekcijas summē un, lai būtu ievērots statikas pamatlikums, šīs summas pielīdzina nullei.

Spēku projekciju summa uz X ass:

$$p \, dy \, dz - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dx \, dz = 0.$$

Analogi iegūst spēku projekciju summu uz Y ass:

$$p \, dx \, dz - \left(p + \frac{\partial p}{\partial y} dy \right) dx \, dz = 0$$

un uz Z ass:

$$p \, dx \, dy - \left(p + \frac{\partial p}{\partial z} dz \right) dx \, dy - \rho g \, dx \, dy \, dz = 0.$$

Atver iekavas, saīsina un, abas puses izdalot ar $dx \, dy \, dz$, t. i., $dx \, dy \, dz = 1$, iegūst

$$\begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial x} &= 0 & \frac{\partial p}{\partial x} &= 0 \\ -\frac{\partial p}{\partial y} &= 0 & \text{vai} & \frac{\partial p}{\partial y} = 0 & (2.1) \\ -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g &= 0 & \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g &= 0. \end{aligned}$$

Iegūtie trīs vienādojumi ir *Eilera diferenciālvienādojumi hidrostatikai*, kas matemātiski izsaka, ka spiediena gradienti $\frac{\partial p}{\partial x}$ un $\frac{\partial p}{\partial y}$ vienādi ar nulli, t. i., aplūkojot miera stāvoklī esošu šķidrums slāni, spiediens nemainās X un Y asu virzienā, bet mainās tikai Z ass virzienā, jo no vienādojumu sistēmas (2.1) trešā vienādojuma iegūst

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g.$$

Ja koordinātu assis nav paralēlas skaldnēm, tad masas spēka projekcija uz X ass ir $F_x^s = X\rho \, dx \, dy \, dz$, uz Y ass $F_y^s = Y\rho \, dx \, dy \, dz$ un uz Z ass $F_z^s = Z\rho \, dx \, dy \, dz$. Eilera diferenciālvienādojumi tad rakstāmi šādi (attiecinot uz $dx \, dy \, dz = 1$):

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + X\rho = 0; \quad -\frac{\partial p}{\partial y} + Y\rho = 0 \quad \text{un} \quad -\frac{\partial p}{\partial z} - Z\rho = 0. \quad (2.2)$$

Trešo Eilera diferenciālvienādojumu hidrostatikai (sk. vienādojumu (2.1)) var izteikt arī šādi:

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g = 0.$$

Tā kā $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$, $\frac{\partial p}{\partial y} = 0$, tad $\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{dp}{dz}$ un

$$\rho \left(\frac{p}{\rho g} + z \right) = 0.$$

Integrējot iegūst

$$\frac{p}{\rho g} + z = \text{const.} \quad (2.3)$$

Vienādojumā (2.3) pirmais loceklis $\frac{p}{\rho g}$ ir izteikts metros. Tā kā šī izteiksme ir iegūta no vienādojuma Z asij, tad tas nozīmē, ka loceklis $\frac{p}{\rho g}$ ir nogrieznis uz Z ass, un to hidraulikā sauc par *pjezometrisku* (statisko) *augstumu*, jo tas nolasāms no pjezometra (stikla caurule, kuras viens gals ievadīts šķidrumā, 2.2 att.).

Vienādojuma (2.3) otrais loceklis z ir nogrieznis uz Z ass, un to sauc par *ģeodēzisko* jeb *ģeometrisku augstumu*.

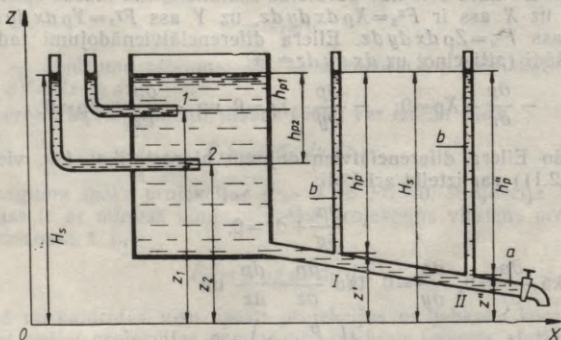
Tādēļ arī summa $\frac{p}{\rho g} + z$ ir nogrieznis uz Z ass, un to sauc par *hidrostatisko augstumu* H_s .

$$\frac{p}{\rho g} + z = H_s = \text{const.} \quad (2.4)$$

Hidrostatiskais augstums rāda, cik liela ir šķidruma kopējā enerģija jebkurā punktā. No tā izriet, ka neatkarīgi no punkta koordinātām šķidruma kopējā enerģija ir konstants lielums un vienāda ar H_s metriem attiecīgā šķidruma staba augstuma. Vienādojums (2.4) iegūts, aplūkojot šķidrumu miera stāvoklī, tādēļ H_s izsaka šķidruma potenciālo enerģiju E_p , t. i.,

$$\frac{p}{\rho g} + z = H_s = E_p.$$

2.2. attēlā redzama tvertne ar slīpu cauruli a . Caurulē iestiprinātas stikla caurulītes b , kuras sauc par *pjezometriem*. Ja šķidruma



2.2. att. Hidrostatiskais augstums.

sistēmā ir miera stāvoklī, šķidruma līmenis pjezometros ir tāds, kā redzams 2.2. attēlā.

Tā kā caurule a novietota slīpi pret horizontu, tad hidrostatiskā augstuma nolasišanai pieņemts brīvi izraudzīts līmenis θ - X . No attēla redzams, ka kopējais enerģijas (potenciālās) daudzums griezumā I vienāds ar enerģijas daudzumu griezumā II , t. i.,

$$h'_p + z' = h''_p + z'' = H_s.$$

Tas attiecas uz jebkuru punktu zem šķidruma līmeņa, piemēram, enerģijas daudzums punktā 1 un punktā 2 ir vienāds:

$$h_{p1} + z_1 = h_{p2} + z_2 = H_s.$$

No tā izriet, ka pjezometriskais augstums var palielināties vai samazināties tikai uz ģeometriskā augstuma rēķina $\left(h_{p1} = \frac{p_1}{\rho g}; h_{p2} = \frac{p_2}{\rho g} \right)$, tādēļ var rakstīt

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 = \text{const} = H_s.$$

Šo vienādojumu sauc par *hidrostatikas pamatvienādojumu*.

Vienādojums (2.4) ir mierā esoša šķidruma enerģijas bilance, kas rāda, ka mierā esošiem šķidrumiem potenciālā enerģija visos šķidruma punktos ir nemainīgs lielums un vienāds ar pjezometriskā augstuma un ģeometriskā augstuma summu.

Trešo Eilera vienādojumu hidrostatikai (sk. vienādojumu (2.1)) iespējams uzrakstīt arī šādi:

$$dp = -\rho g dz.$$

Integrējot šo vienādojumu kā noteikto integrāli robežās p_1, p_2 un z_1, z_2 (2.3. att.), iegūst

$$\int_{p_1}^{p_2} dp = -\rho g \int_{z_1}^{z_2} dz \quad \text{vai} \quad p_2 - p_1 = -\rho g (z_2 - z_1).$$

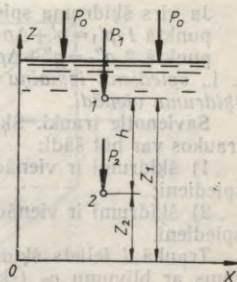
Tā kā $z_2 - z_1 = -h$, tad $p_2 - p_1 = \rho g h$ vai

$$p_2 = p_1 + \rho g h. \quad (2.5)$$

No vienādojuma (2.5) aprēķina spiedienu p_2 jebkurā punktā zem šķidruma līmeņa, ja zināms spiediens p_1 kādā citā punktā.

Paskāla likums. No hidrostatikas pamatvienādojuma izriet, ka spiediens punktā 1 un 2 (2.4. att.) ir šāds:

$$\begin{aligned} \text{punktā } 1 \quad p_1 &= p' + \rho_1 g h_1, \\ \text{punktā } 2 \quad p_2 &= p'' + \rho_2 g h_2. \end{aligned}$$



2.3. att. Shēma Eilera diferenciālvienādojuma integrēšanai.

Ja virs šķidruma spiedienu palielina par Δp , tad spiediens

punktā 1 $p'_1 = p' + \Delta p + \rho_1 g h_1$,

punktā 2 $p''_2 = p'' + \Delta p + \rho_2 g h_2$,

t. i., *spiediena izmaiņa uz mierā esošu šķidrumu izplatās pa visu šķidrumu vienādi.*

Savienotie trauki. Šķidruma līdzsvara gadījumi divos savienotos traukos var būt šādi:

1) šķidrums ir vienādi vai dažādi, un virs to līmeņiem ir dažādi spiedieni;

2) šķidrums ir vienādi vai dažādi, un virs to līmeņiem ir vienādi spiedieni.

Traukā I ieliets šķidrums ar blīvumu ρ_1 , bet traukā II — šķidrums ar blīvumu ρ_2 (sk. 2.4. att.). Ja šķidrums savienotos traukos ir miera stāvoklī, tad spiedienam punktā 1 jābūt vienādam ar spiedienu punktā 2; tie ir punkti, kas atrodas vienā līmenī:

$$p_1 = p' + h_1 \rho_1 g \quad \text{un} \quad p_2 = p'' + h_2 \rho_2 g,$$

miera stāvoklī $p_1 = p_2$, tad

$$p' + h_1 \rho_1 g = p'' + h_2 \rho_2 g \quad \text{jeb} \quad p' - p'' = h_2 \rho_2 g - h_1 \rho_1 g.$$

Ja savienotos traukos ir viendabīgs šķidrums, t. i., $\rho_1 = \rho_2$, bet spiedieni virs līmeņiem ir dažādi, tad

$$p' - p'' = \rho g (h_2 - h_1).$$

Ja savienotos traukos ieliets *dažādi šķidrums*, bet spiedieni virs līmeņiem ir vienādi, t. i., $p' = p''$, tad

$$h_1 \rho_1 g = h_2 \rho_2 g.$$

No tā izriet, ka

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{h_2}{h_1}$$

Ja savienotos traukos spiedieni virs šķidrumu līmeņiem ir vienādi, šķidrumu slāņu augstumi virs saskares vietas ir apgriezti proporcionāli šķidrumu blīvumiem.

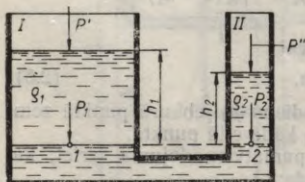
Turpretī, ja savienotos traukos ieliets *viendabīgs šķidrums* un spiedieni virs šķidruma līmeņiem ir vienādi. t. i., ja $\rho_1 = \rho_2$ un $p' = p''$,

tad arī $h_1 = h_2$. Tātad *viendabīga šķidruma līmeņi divos savienotos traukos atrodas vienādā augstumā.*

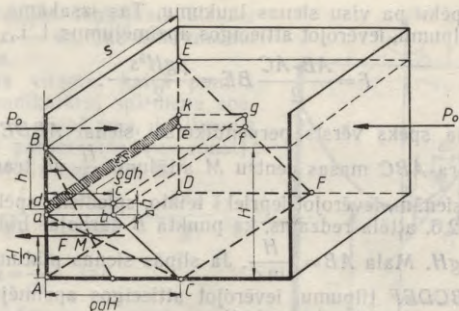
Spiediens uz trauka dibenu un sienām. Spēku, kas darbojas uz horizontālu trauka dibenu, aprēķina pēc formulas

$$F = pS,$$

kur F — spiediena spēks, N; p — hidrostatiskais spiediens uz laukuma vienību, Pa; S — trauka dibena laukums, m^2 .



2.4. att. Šķidruma līdzsvars savienotos traukos.



2.5. att. Spiediena spēks uz vertikālu sienu.

Ja šķidruma augstums ir h , blīvums ρ un spiediens virs šķidruma līmeņa p_0 , tad hidrostatiskais spiediens

$$p = p_0 + \rho g h \quad \text{un} \quad (2.7)$$

$$F = (p_0 + \rho g h) S$$

vai arī (ja p_0 ir atmosfēras spiediens)

$$F = \rho g h S = \rho g V, \quad (2.8)$$

kur V — traukā esošā šķidruma tilpums, m^3 .

Spiediena spēku uz vertikālu taisnstūrveida sienu var iegūt grafiski. 2.5. attēlā no šķidruma virsmas (punkta B) atliek mērogā hidrostatiskā spiediena vektorus, kurš darbojas uz šo sienu. Tā kā uz šķidruma līmeni un uz vertikālo sienu no ārpuses spiež atmosfēras spiediens p_0 , to var neievērot. Tad hidrostatiskais spiediens $p = f(h)$, t. i., $p = \rho g h$.

Punktā B augstums $h=0$, arī $p_B=0$. Vislielākais hidrostatiskais spiediens ir punktā A : $p_A = \rho g H$.

Atliekot no punkta B līdz punktam A hidrostatiskā spiediena vektorus un savienojot to galapunktus ar taisni BC , spiediena vektoru sākumpunkti izveido plakni $BEFC$, kas no šķidruma traukā izdala trijstūra prizmu $ABCDEF$.

Spiediena spēka iegūšanai uz sienas izdala elementāru laukumu ΔS , kura platums s un augstums Δh , kas ir ļoti mazs. Šķidruma spiediena spēks uz šo elementāro virsmu

$$\Delta F = p \Delta S = \rho g h s \Delta h.$$

No 2.5. attēla redzams, ka $\rho g h s$ ir elementārā paralēlskaldņa $abcdefgk$ pamata laukums $abfe$, bet Δh ir šā paralēlskaldņa augstums, tātad $\rho g h s \Delta h$ ir paralēlskaldņa tilpums. Līdzīgi var iegūt

spiediena spēku pa visu sienas laukumu. Tas izsakāms ar prizmas $ABCDEF$ tilpumu, ievērojot attiecīgos apzīmējumus, t. i.,

$$F = \frac{AB \cdot AC}{2} BE = \frac{\rho g H^2 s}{2}. \quad (2.9)$$

Spiediena spēks vērsts perpendikulāri sienai $ABDE$ un virzīts caur trijstūra ABC masas centru M attālumā $\frac{H}{3}$ no trauka dibena.

Slīpām sienām, ievērojot iepriekš teikto, spiediena spēks izsakāms līdzīgi. No 2.6. attēla redzams, ka punktā B darbojas hidrostatiskais spiediens $\rho g H$. Mala $AB = \frac{H}{\sin \alpha}$. Ja slīpās sienas platums s , tad ar prizmas $ABCDEF$ tilpumu, ievērojot attiecīgos apzīmējumus, spiediena spēks uz sienu izsakāms šādi:

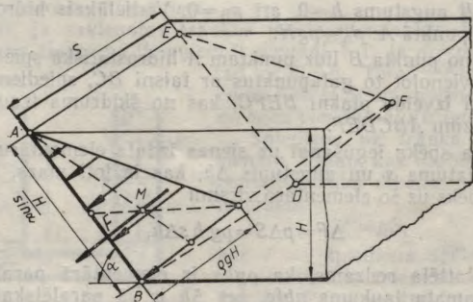
$$F = \frac{AB \cdot BC}{2} s = \frac{\rho g H^2 s}{2 \sin \alpha}. \quad (2.10)$$

Spiediena spēks vērsts perpendikulāri sienai $ABDE$ un virzīts caur trijstūra ABC masas centru M attālumā $\frac{H}{3 \sin \alpha}$ no trauka dibena.

Šķidruma relatīvais miera stāvoklis. Šķidruma līmeņus uzskata par vienāda spiediena virsmām, jo spiediens uz šīm virsmām visos punktos ir vienāds. Šādas virsmas visos punktos ir perpendikulāras spēkiem, kas darbojas uz šķidrumu. Ja darbojas tikai Zemes pievilkšanas spēks, tad līmenis ir horizontāls.

Šķidruma relatīvā miera stāvoklī, t. i., kad šķidrums ir mierā attiecībā pret trauku, kurā tas ieliets, bet trauks pārvietojas horizontāli vai rotē ap savu asi, šķidruma līmenis nav horizontāls.

Ja šķidrums atrodas miera stāvoklī rotejošā cilindrā (centrifūgā, separatorā) (2.7. att.), tad uz katru šķidruma daļiņu darbojas masas spēks $F_s = mg$ un inerces centrālās spēks $I = m\omega^2 x$, kur ω —



2.6. att. Spiediena spēks uz slīpu sienu.

cilindra rotācijas leņķiskais ātrums ($\omega = 2\pi n$); x — daļiņas attālums no rotācijas ass.

Šķidruma virsmai katrā punktā jābūt perpendikulārai spiediena spēkam F , tas ir iespējams, ja līmenis ir rotācijas paraboloids ($\omega = \text{const}$).

No 2.7. attēla redzams, ka

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{I}{F_s} = \frac{m\omega^2 x}{mg} = \frac{\omega^2 x}{g}$$

vai arī $\operatorname{tg} \alpha = \frac{dz}{dx}$, tad

$$\frac{\omega^2 x}{g} = \frac{dz}{dx} \quad \text{un} \quad dz = \frac{\omega^2}{g} x dx.$$

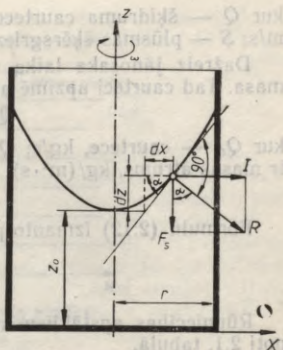
Integrējot iegūst, ka

$$z = \frac{\omega^2 x^2}{2g} + C.$$

Ja $x=0$, tad $C=z_0$, un šķidruma līmeņa virsmas vienādojums iegūst šādu veidu:

$$z - z_0 = \frac{\omega^2 x^2}{2g}. \quad (2.11)$$

Sis vienādojums izsaka rotācijas paraboloidu cilindriskās koordinātās (x, ω, z).



2.7. att. Šķidruma relatīvais miera stāvoklis rotējošā traukā.

2.2. HIDRODINAMIKA

Hidrodinamika aplūko likumus, kādiem pakļauti šķidrumi kustībā. Atšķirībā no hidrostatikas, kur šķidruma stāvokli raksturo spiediens un šķidruma daļiņas novietojums telpā, hidrodinamikā šķidruma stāvokli raksturo spiediens un šķidruma daļiņas ātrums.

Lai vienkāršotu plūsmas kustības likumus, hidrodinamikā plūsmu shematizē, piemēram, šķidruma plūsmu uzskata par nepārtrauktu vidi vai pieņem, ka tā sastāv no atsevišķām elementārām strūkliņām.

Šķidrumu plūsmu rada līmeņu starpība vai sūkņu darbības izraisītā spiedieni starpība.

Caurtece un vidējais ātrums. Šķidruma (gāzes) tilpumu, kas laika vienībā iztek caur plūsmas šķērsgriezumu, sauc par šķidruma (gāzes) caurteci (*ražīgumu, patēriņu*), apzīmē ar Q un izsaka vienībā kubikmetri sekundē (m^3/s).

Starp šķidruma (gāzes) caurteci, plūsmas šķērsgriezuma laukumu un plūsmas ātrumu pastāv šāda sakarība:

$$Q = \omega S, \quad (2.12)$$

kur Q — šķidrums caurtece, m^3/s ; w — plūsmas vidējais ātrums, m/s ; S — plūsmas šķērsriezuma laukums, m^2 .

Dažreiz jānosaka laika vienībā caurplūstošā šķidrums (gāzes) masa. Tad caurteci apzīmē ar Q_m :

$$Q_m = \rho Q = \rho w S,$$

kur Q_m — caurtece, kg/s ; Q — caurtece, m^3/s . Reizinājums $\rho w = W$ ir masas ātrums, $kg/(m^2 \cdot s)$. Tad

$$Q_m = WS.$$

Formulu (2.12) izmanto plūsmas vidējā ātruma noteikšanai:

$$w = \frac{Q}{S}. \quad (2.13)$$

Rūpniecības apstākļiem raksturīgie plūsmu vidējie ātrumi sako-
poti 2.1. tabulā.

Formulu (2.12) var lietot arī apaļu cauruļu (vai aparāta) dia-
metra noteikšanai tādā gadījumā, ja šķidrums plūsma aizpilda visu
caurules vai aparāta šķērsriezumu.

Diametra aprēķināšanai formulu (2.12) pārveido šādi:

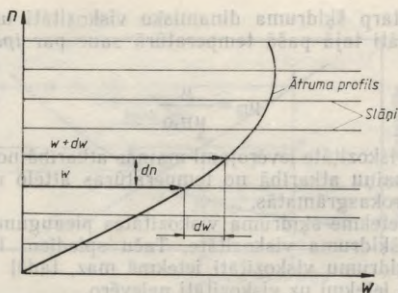
$$S = \frac{\pi d^2}{4} = 0,785 d^2,$$

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi w}} = \sqrt{\frac{Q}{0,785 w}} \approx 1,128 \sqrt{\frac{Q}{w}}. \quad (2.14)$$

2.1. tabula

Šķidrums, gāzu un tvaiku plūsmu vidējie ātrumi

Plūsmas raksturojums	Plūsmas ātrums, m/s
<i>Šķidrums</i> pašplūsmā	
viskozi	0,1...0,5
mazviskozi	0,5...1,0
<i>Šķidrums</i> (mazviskozi) sūknējot	
sūcvadā	0,8...2,0
spiedvadā	1,5...3,0
<i>Gāzes</i>	
dabiskā velkme	2...4 (pat līdz 8)
gaisvados ar nelielu spiedienu (ventilatori)	4...15 (20)
gaisvados ar lielu spiedienu (kompresori)	15...25
<i>Tvaiki</i>	
pārkarsēti	30...50 (80)
piesātināti, ja spiediens	
> 10^5 Pa (>1 at)	15...25
(1...0,5) 10^5 Pa (0,5...1 at)	20...40
(2...5) 10^4 Pa (0,2...0,5 at)	40...60
(0,5...2) 10^4 Pa (0,05...0,2 at)	60...75



2.8. att. Ātruma gradienta grafiks.

Viskozitāte. Šķidruma plūsmas ātrums šķērsriezuma dažādos punktos nav vienāds. Starp šķidruma plūsmas slāņiem rodas ātrumu starpība, kas rada berzi starp tiem. Šādu *iekšējo berzi* sauc par *viskozitāti (stigrību)*. Berzi starp šķidrumu un tō ierobežojošo virsmu (caurules, aparāta sienu) sauc par *ārējo berzi* (to aplūkosim atsevišķi).

Pēc Ņūtona, berzes spēks P , kas rodas, pārvietojoties vienam šķidruma slānim pret otru, ir tieši proporcionāls ātruma gradientam dw/dn (2.8. att.) un saskarē esošo slāņu virsmai S :

$$P = \mu S (dw/dn), \quad (2.15)$$

kur μ — proporcionalitātes koeficients, kas atkarīgs no šķidruma īpašībām, temperatūras un spiediena un ko sauc par *dinamisko viskozitātes koeficientu* jeb par *dinamisko viskozitāti*, jeb vienkārši par viskozitāti.

Dinamiskās viskozitātes vienība ir

$$[\mu] = \frac{[P][dn]}{[S][dw]} = \frac{\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}}{\text{m}^2 \cdot \text{m}} = \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = \text{Pa} \cdot \text{s}.$$

No vienādojuma (2.15) iegūst

$$\frac{P}{S} = \mu \frac{dw}{dn} = \tau_b, \quad (2.16)$$

kur τ_b — bīdes spriegums (iekšējās berzes spriegums).

Lielumu $\frac{1}{\mu}$ sauc par *plūstamību*.

Attiecību starp dinamisko viskozitāti μ un šķidruma blīvumu ρ sauc par *kinemātisko viskozitātes koeficientu* ν jeb par *kinemātisko viskozitāti*:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad (2.17)$$

kur ν — kinemātiskā viskozitāte, m^2/s ; ρ — šķidruma blīvums, kg/m^3 .

Attiecību starp šķidrums dinamisko viskozitāti un ūdens dinamisko viskozitāti tajā pašā temperatūrā sauc par *ipatnējo viskozitāti*:

$$\mu_{ip} = \frac{\mu}{\mu_{H_2O}}. \quad (2.18)$$

Šķidrums viskozitāte ievērojami mainās atkarībā no temperatūras. Viskozitātes maiņu atkarībā no temperatūras attēlo nomogrammās, kas ievietotas rokasgrāmatās.

Spiediena ietekmē šķidrums viskozitātes pieaugums ir jo lielāks, jo lielāka ir šķidrums viskozitāte. Taču spiedieni līdz 19,6 MPa (~200 at) šķidrums viskozitāti ietekmē maz, tādēļ hidraulikā parasti spiediena ietekmi uz viskozitāti neievēro.

Suspensiju viskozitāti aptuveni var noteikt pēc formulas

$$\mu_s = \mu_{sk} (1 + 4,5\varphi), \quad (2.19)$$

kur μ_s — suspensijas viskozitāte; μ_{sk} — šķidrās fāzes viskozitāte; φ — cietās fāzes koncentrācija, kas izteikta kā attiecība starp cietās fāzes tilpumu un visas suspensijas tilpumu.

Gāzu viskozitāti ievērojami ietekmē temperatūra un spiediens.

Arī gāzu viskozitāti atkarībā no temperatūras līdzīgi kā šķidrums viskozitāti ērti noteikt pēc nomogrammas.

Visām gāzēm viskozitāte atkarībā no spiediena nemainīgā temperatūrā mainās pēc vienas un tās pašas sakarības. Gāzes viskozitāte μ_p spiedienā p attiecībā pret viskozitāti tanī pašā temperatūrā, bet normālā spiedienā visām gāzēm izsakāma kā šāda funkcija:

$$\frac{\mu_p}{\mu_1} = f \left(\frac{T}{T_{kr}}, \frac{p}{p_{kr}} \right)$$

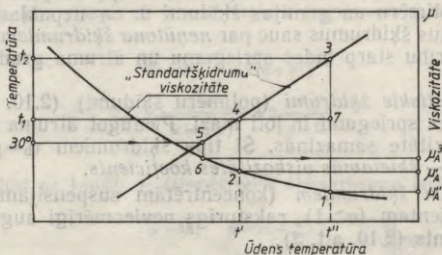
Zinot gāzes kritisko temperatūru T_{kr} , kritisko spiedienu p_{kr} un viskozitāti μ_1 attiecīgā temperatūrā, var noteikt viskozitāti μ_p spiedienā p .

Gāzu maisījumiem kinemātisko viskozitāti v_m aptuveni var aprēķināt pēc šādas formulas:

$$\frac{1}{v_m} = \frac{x_1}{v_1} + \frac{x_2}{v_2} + \frac{x_3}{v_3} + \dots, \quad (2.20)$$

kur v_1, v_2, v_3 utt. — maisījuma komponentu kinemātiskā viskozitāte; x_1, x_2, x_3 utt. — gāzu maisījuma komponentu moldaļas vai tilpumsdaļas.

Ievērojot likumu par ķīmiski tehnisko funkciju linearitāti, šķidrums viskozitāti iespējams noteikt jebkurai temperatūrai, ja zināma šķidrums viskozitāte divās temperatūrās. Šajā nolūkā pētāmā šķidrums viskozitāti salīdzina ar kāda cita šķidrums — «standartšķidrums» viskozitāti, kas zināma plašā temperatūru intervālā. Piemēram, jānosaka viskozitāte kādam šķidrums A , ja zināms, ka temperatūrā t_1 tā viskozitāte ir μ'_A , bet temperatūrā t_2 tā ir μ''_A . Par «standartšķidrums» var izmantot ūdeni.



2.9. att. Šķidruma viskozitātes noteikšana.

Koordinātās ūdens temperatūra un viskozitāte konstruē ūdens (standartšķidruma) viskozitātes līkni (2.9. att.). Tālāk iegūst punktus 1 un 2, kas atbilst šķidruma viskozitātei μ'_A un μ''_A . No punktiem 1 un 2, velkot vertikāles, līdz tās krustojas ar izotermām t_1 un t_2 (kas vilktas no temperatūras ass), iegūst punktus 3 un 4, kurus savienojot iegūst taisni, kas raksturo šķidruma viskozitāti atkarībā no temperatūras.

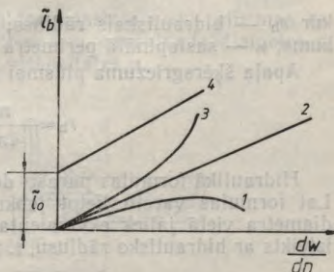
Ja ir jānosaka šķidruma A viskozitāte 30°C temperatūrā, tad novēl horizontālu līniju līdz punktam 5, no tā velk līniju uz leju līdz ūdens viskozitātes līnijai (punkts 6). Punktam 6 atbilstošā ūdens viskozitāte atbilst šķidruma A viskozitātei 30°C temperatūrā.

Anālītiski šo uzdevumu var atrisināt šādi: $\frac{3-7}{7-4} = \text{const}$, t. i.,

$\frac{t_2 - t_1}{t'' - t'} = k$. Ja ir zināma konstantes k skaitliskā vērtība, tad var noteikt šķidruma viskozitāti temperatūrā t_1 . Šķidruma viskozitāte ir tāda pati kā ūdens viskozitāte temperatūrā t' :

$$t' = t'' - \frac{t_2 + t_1}{k} \quad (2.21)$$

Nūtona un neņūtona šķidrumi. Nūtona atklātais berzes likums šķidrumiem (sk. vienādojumu (2.15)) ir spēkā attiecībā uz visām gāzēm un uz šķidrumiem ar mazu molmasu. Šādus šķidrumus sauc par *Nūtona šķidrumiem*. Šiem šķidrumiem sakarību starp bīdes spriegumu τ_b un ātruma gradientu attēlo taisne (2.10. att. 2), jo $\tau_b = \mu (dw/dn)^a$, kur $a = 1$.



2.10. att. Sakarība $\tau_b = f(dw/dn)$ šķidrumiem.

Šķidrums ar lielu molmasu (darva, sveķi, suspensijas, pastas, emulsijas, polimēru un gumijas šķidrums u. c.) nepakļaujas Ņūtona likumam. Tādus šķidrumus sauc par *neņūtona šķidrumiem*. Šiem šķidrumiem sakarību starp bīdes spriegumu un ātruma gradientu attēlo liknes.

Pseudoplastiskie šķidrums (polimēru šķidrums) (2.10. att. 1) sāk plūst, ja bīdes spriegums ir ļoti mazi. Pieaugot ātruma gradientam dw/dn , viskozitāte samazinās. Šī tipa šķidrumiem $\tau_b = \mu_s(dw/dn)^a$, kur $a < 1$, μ_s — *šķietamās viskozitātes koeficients*.

Dilatantiem šķidrumiem (koncentrētām suspensijām), pieaugot ātruma gradientam ($a > 1$), raksturīgs nevienmērīgi augošs viskozitātes koeficients (2.10. att. 3).

Bingemiem (plastiskiem) šķidrumiem (suspensijām, pastām, eļļas krāsām u. c.) plūstamību izraisa noteikts bīdes spriegums τ_0 (2.10. att. 4). Ja $\tau_b > \tau_0$, tad sākas šo šķidrumu plūstamība un tie atgādina Ņūtona šķidrumus. Bingemiem šķidrumiem plūstamības vienādojums ir šāds:

$$\tau_b = \tau_0 + \mu_p \frac{dw}{dn},$$

kur μ_p — *plastiskās viskozitātes koeficients*.

Pie neņūtona šķidrumiem vēl pieder *tiksotropie, reopektiskie* un *viskozi elastīgie šķidrums*, bet tos šajā kursā neaplūkosim.

Neņūtona šķidrumu viskozitāti spiediens ietekmē tāpat kā Ņūtona šķidrumu viskozitāti.

Hidrauliskais rādiuss un ekvivalentais diametrs. Hidraulikā neapaļa šķērsgriezuma plūsmas pieņemts izteikt ar *hidraulisko rādiusu*, t. i., *ar attiecību starp plūsmas šķērsgriezuma laukumu un saslapinātā perimetra garumu*:

$$r_h = \frac{S}{\kappa}, \quad (2.22)$$

kur r_h — hidrauliskais rādiuss; S — plūsmas šķērsgriezuma laukums; κ — saslapinātā perimetra garums.

Apļa šķērsgriezuma plūsmai hidrauliskais rādiuss

$$r_h = \frac{\pi d^2}{4\pi d} = \frac{d}{4}.$$

Hidraulikā formulas parasti dotas apaļa šķērsgriezuma plūsmām. Lai formulas varētu lietot jebkura šķērsgriezuma plūsmām, tajās diametra vietā jāliek ekvivalentais diametrs d_{ekv} jeb diametrs, kas izteikts ar hidraulisko rādiusu, t. i.,

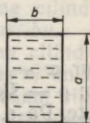
$$d = d_{ekv} = 4r_h \quad \text{jeb} \quad d_{ekv} = \frac{4S}{\kappa}. \quad (2.23)$$

Piemēri.

1. Šķidrums aizpilda cauruli ar taisnstūrveida šķēsgriezuma laukumu:

$$S = ab; \quad \kappa = 2(a+b);$$

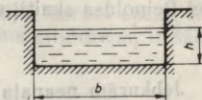
$$d_{ekv} = \frac{4ab}{2(a+b)} = 2 \frac{ab}{a+b}.$$



2. Šķidrums plūst pa kanālu ar taisnstūrveida šķēsgriezuma laukumu:

$$S = bh; \quad \kappa = 2h + b;$$

$$d_{ekv} = \frac{4bh}{2h + b}.$$



3. Šķidrums plūst pa cauruli ar gredzenveida šķēsgriezumu:

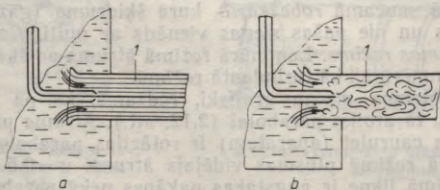
$$S = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2); \quad \kappa = \pi(D + d);$$

$$d_{ekv} = \frac{4\pi(D^2 - d^2)}{4\pi(D + d)} = \frac{(D - d)(D + d)}{D + d} = D - d.$$



Divi plūsmas režīmi. Pētot šķidrumu plūsmu, pazīstamais angļu fiziķis O. Reinoldss 1883. gadā konstatēja, ka eksistē divi dažādi plūsmas režīmi. Tie shematiski parādīti 2.11. attēlā. Ja šķidruma ātrums ir mazs, tad krāsainā strūkļa, kas caurulē 1 izplūst no kapilāra gala, virzās paralēli caurules sienām (2.11. att. a). Šādu šķidruma plūsmu sauc par *lamināru plūsmu*. Palielinot šķidruma ātrumu caurulē 1 un pārsniedzot noteiktu ātruma skaitlisko vērtību, krāsainā strūkļa zaudē savu struktūru un sadalās haotiski pa visu plūsmas šķēsgriezumu (2.11. att. b). Šādu plūsmu sauc par *turbulentu plūsmu*.

Novērojumu rezultātā O. Reinoldss konstatēja, ka plūsmas režīms atkarīgs no plūsmas vidējā ātruma w , cauruļvada diametra d , šķidruma blīvuma ρ un dinamiskās viskozitātes μ .



2.11. att. Plūsmu režīmu shēmas.

Minēto fizikālo lielumu ietekmi uz šķidrums plūsmas režīmu izsaka Reinoldsa kritērijs jeb Reinoldsa skaitlis

$$Re = \frac{\omega d \rho}{\mu} \quad (2.24)$$

kur ω — plūsmas vidējais ātrums, m/s; d — cauruļvada diametrs, m; ρ — šķidrums blīvums, kg/m³; μ — šķidrums dinamiskā viskozitāte, Pa·s.

Attiecība $\frac{\mu}{\rho} = \nu$, kur ν — šķidrums kinemātiskā viskozitāte. Tādēļ Reinoldsa skaitli var uzrakstīt arī šādi:

$$Re = \frac{\omega d}{\nu} \quad (2.25)$$

Jebkurām neapaļā šķērsgriezuma caurulēm Reinoldsa skaitli aprēķina, diametra d vietā liekot ekvivalento diametru d_{ekv} .

Krasa plūsmas pāreja no laminārā uz turbulento režīmu nav novērojama. Taisnās apaļās caurulēs, lēni mainot plūsmas ātrumu intervālā no $Re=2000$ līdz $Re=10\,000$, iespējams novērot kā vienu, tā otru plūsmas režīmu. Vēlākie pētījumi parādīja, ka šī nenoturīgā josla var būt vēl plašāka.

Aprēķinos pieņem tikai vienu Reinoldsa skaitļa kritisko vērtību: $Re_{kr}=2300$. Ja $Re < 2300$, tad šādu plūsmas režīmu uzskata par lamināru, turpretī, ja $Re > 2300$, tad — par turbulentu.

Taisnām caurulēm $Re_{kr}=2300$, tomēr ne visos gadījumos. Piemēram, šķidrums plūstot cauri graudainam slānim (sorbcijas iekārtās, kolonnās ar pildījumu u. c.), $Re_{kr}=35$; maisīšanas iekārtās $Re_{kr}=50$; cietām daļiņām nogulsņējoties (atputekļošanas iekārtās), $Re_{kr}=2$ utt.

Plūsmas ātrumu, kas atbilst kritiskajam Reinoldsa skaitlim, sauc par *kritisko ātrumu*.

Praksē visbiežāk sastopas ar plūsmas turbulento režīmu. Laminārais režīms novērojams galvenokārt, pārvietojot stipri viskozus šķidrumus, kā arī ūdens plūsmām dzesinātājos, kondensatoros u. c.

Ātrums sadalījums caurules šķērsgriezumā. Šķidrums (gāzes) ātrums visos plūsmas šķērsgriezuma punktos nav vienāds un ir atkarīgs no plūsmas režīma. *Maksimālais ātrums ir caurules centrā.* Virzienā uz caurules sienām ātrums samazinās. Pie pašas sienas berzes dēļ, kura rodas starp plūstošo šķidrumu un caurules sienām, novērojama tā saucamā *robežkārtā*, kurā šķidrums (gāzes) ātrums ir ļoti niecīgs un pie pašas sienas vienāds ar nulli. *Robežkārtā ir laminārs plūsmas režīms.* Laminārā režīmā ātrums pa šķērsgriezumu sadalās nevienmērīgāk kā turbulenta režīmā.

Attēlojot ātruma maiņu grafiski, redzams, ka pa cauruļvada šķērsgriezumu tā atbilst parabolai (2.12. att.). Ātrums profils apaļā šķērsgriezuma caurulei (aparātam) ir rotācijas paraboloids.

Laminārajā režīmā plūsmas vidējais ātrums $\omega = 0,5 \omega_{max}$. Turbulentajā režīmā likne ir augstākas pakāpes nekā parabola un $\omega = (0,8 \dots 0,9) \omega_{max}$.

Caurtece laminārajā režīmā. Laminārajā režīmā, kad šķidrums daļiņas virzās paralēli caurules sienām, plūsmu var iedomāties kā daudzus bezgalīgi plānu, koncentriski novietotu šķidrums cilindru kustību (2.13. att.). Šādu kustību sauc par *teleskopisku kustību*.

Caurteces noteikšanai var izvēlēties jebkuru šķidrums cilindru. Pieņem, ka cilindra garums l , rādiuss r , šķidrums ātrums w un dinamiskā viskozitāte μ . Ja ātruma maiņu starp blakus esošām cilindra virsmām radiālā virzienā apzīmē ar dw , tad ātrums gradients ir $\frac{dw}{dr}$.

Pēc Ņūtona likuma (sk. vienādojumu (2.15)), berzes spēks, kas rodas, ar dažādu ātrumu pārvietojoties šķidrums cilindriem, ir šāds:

$$P_1 = \mu S \frac{dw}{dr} = \mu \cdot 2\pi r l \frac{dw}{dr}$$

Lai pārvarētu berzi, uz cilindra dibenu jārada spēks, kas izsakāms šādi:

$$P_2 = (p_1 - p_2) \pi r^2,$$

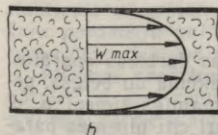
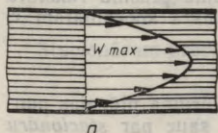
kur p_1 un p_2 ir spiediens cilindra sākumā un beigās.

Spēki P_1 un P_2 ir vienādi, tādēļ

$$2\mu\pi r l \frac{dw}{dr} = (p_1 - p_2) \pi r^2 \text{ jeb } dw = \frac{p_1 - p_2}{2\mu l} r dr.$$

Šķidrums caurtece 1 sekundē elementāram apaļam šķēsgriezumam ir šāda:

$$dQ = \pi r^2 dw \text{ jeb } dQ = \frac{\pi(p_1 - p_2)}{2\mu l} r^3 dr.$$

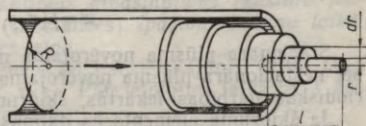


2.12. att. Ātrums vektoru sadalījums cauruļvada šķēsgriezumā:

a — laminārajā režīmā; b — turbulenta režīmā.

Caurtece visam caurules šķēsgriezumam, ja tās rādiuss ir R , izsakāma šādi:

$$\int_0^Q dQ = \frac{\pi(p_1 - p_2)}{2\mu l} \int_0^R r^3 dr,$$



2.13. att. Lamināras plūsmas shematisks attēlojums.

pēc integrēšanas

$$Q = \frac{(\rho_1 - \rho_2) \pi R^4}{8 \mu l}$$

Caurules rādiusu R aizvietojo ar diametru d , iegūst šādu izteiksmi:

$$Q = \frac{(\rho_1 - \rho_2) \pi d^4}{128 \mu l}, \quad (2.26)$$

kur Q — šķidrums caurtece, m^3/s ; $(\rho_1 - \rho_2)$ — spiedienu starpība starp diviem šķērsgriezumiem, Pa ; l — attālums starp šķērsgriezumiem, m ; d — caurules diametrs, m ; μ — šķidrums dinamiskais viskozitātes koeficients, $Pa \cdot s$.

Sienu raupjums (negludums). Plūsmu norobežojošās sienas (virsmas) ir vairāk vai mazāk raupjas. Sienas virsmu pēc raupjuma var iedalīt šādi: 1) *vienmērīgi graudaina*; 2) *vienmērīgi viļņota*; 3) *nevienmērīgi graudaina*; 4) *nevienmērīgi viļņota*.

Raupjumu bieži raksturo ar t. s. *absolūto raupjumu* k , kas ir izcilnišu vidējais augstums milimetros.

Hidraulikā izmanto arī *relatīvo raupjumu* ϵ , ar kuru apzīmē atiecību starp absolūto raupjumu un kādu lineāru izmēru, kas raksturo plūsmas šķērsgriezumu (caurules diametrs d , plūsmas dziļums kanālos u. c.): $\epsilon = k/d$.

Apgriezto lielumu $\frac{d}{k}$ sauc par *relatīvo gludumu*.

Raupjumu izsaka arī citādi, piemēram, ar *raupjuma koeficientiem* n un γ (kurus dažādām virsmām iegūst eksperimentāli) un ar *ekvivalento raupjumu*.

Stacionāra un nestacionāra plūsma. Šķidrums plūsmu raksturo ātrums w . Plūsmas ātrums ir funkcija no punkta koordinātām x , y un z :

$$w = f(x, y, z).$$

Tas nozīmē, ka šķidrums ātrums atsevišķos šķidrums plūsmas punktos laikā nemainās, $\partial w / \partial \tau = 0$. Šādu plūsmu sauc par *stacionāru plūsmu* pretstatā nestacionārai plūsmai, kurai raksturīga ātruma maiņa laikā, t. i., $\partial w / \partial \tau \neq 0$.

$$w = f(x, y, z, \tau).$$

Stacionāra plūsma novērojama nepārtrauktas darbības aparātos, bet nestacionāra plūsma novērojama procesa sākumā un beigās, periodiskas darbības iekārtās, šķidrums iztecē mainīgā līmenī u. c.

Ja šķidrums elementārās daļiņas ātrums (arī citi plūsmas parametri: spiediens, temperatūra, blīvums u. c.), tai pārvietojoties no punkta A attālumā dx (X ass virzienā), mainās par lielumu ∂w , tad ātruma izmaiņa uz garuma vienību ir $\partial w / \partial x$ (izteikta ar parciālo atvasinājumu). Turpretī, ja šķidrums daļiņa pārvietojas no punkta A līdz punktam B (attālumā dx), tad ātruma izmaiņa ir $\partial w / \partial x dx$.

Analogiski ātruma izmaiņa izsakāma arī pārējām koordinātu asīm — $\partial w/\partial y dy$ un $\partial w/\partial z dz$, tad kopējā ātruma izmaiņa

$$dw = \frac{\partial w}{\partial x} dx + \frac{\partial w}{\partial y} dy + \frac{\partial w}{\partial z} dz.$$

Sis vienādojums raksturo *konvektīvo ātruma izmaiņu*.

Nestacionārai plūsmai ātrums (arī citi parametri) laikā mainās. Ja plūsmas ātruma izmaiņa par ∂w kādā šķidrums punktā notiek laikā $\partial \tau$, tad *laika vienībā* ātrums mainīsies par lielumu $\partial w/\partial \tau$. Ātruma izmaiņa bezgalīgi īsā laika sprīdī $d\tau$ ir $\partial w/\partial \tau d\tau$. Šo izteiksmi sauc par *vietējo* jeb *lokālo ātruma izmaiņu*.

Pilnā ātruma w izmaiņa nestacionārai plūsmai ir konvektīvās un lokālās ātruma izmaiņas summa, t. i.,

$$dw = \frac{\partial w}{\partial \tau} d\tau + \frac{\partial w}{\partial x} dx + \frac{\partial w}{\partial y} dy + \frac{\partial w}{\partial z} dz \quad \text{vai}$$

$$\frac{dw}{d\tau} = \frac{\partial w}{\partial \tau} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{dx}{d\tau} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{dy}{d\tau} + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{dz}{d\tau}.$$

Ceļu dalot ar laiku, iegūst ātruma komponenti uz attiecīgās koordinātu ass, t. i.,

$$\frac{dx}{d\tau} = w_x, \quad \frac{dy}{d\tau} = w_y \quad \text{un} \quad \frac{dz}{d\tau} = w_z,$$

kur w_x, w_y, w_z — ātruma w izmaiņas attiecīgo koordinātu asu virzienos.

Tad

$$\frac{dw}{d\tau} = \frac{\partial w}{\partial \tau} + \frac{\partial w}{\partial x} w_x + \frac{\partial w}{\partial y} w_y + \frac{\partial w}{\partial z} w_z. \quad (2.27)$$

Stacionāram procesam $\frac{\partial w}{\partial \tau} = 0$, un

$$\frac{dw}{d\tau} = \frac{\partial w}{\partial x} w_x + \frac{\partial w}{\partial y} w_y + \frac{\partial w}{\partial z} w_z. \quad (2.28)$$

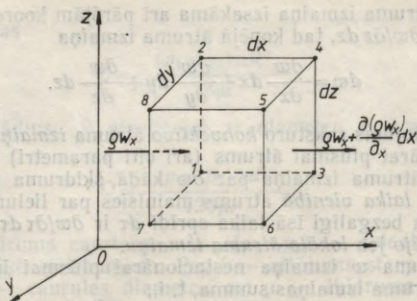
Vienādojumi (2.27) un (2.28) ir dotā parametra (ātruma) *substantīvais atvasinājums*¹. *Substantīvais atvasinājums raksturo jebkura parametra vai materiāla (substances) īpašību izmaiņu laikā, materiālām daļiņām pārvietojoties telpā.*

Plūsmas nepartrauktība. Pieņem, ka paralēlskalldnis (2.14. att.) pārvietojas ar ātrumu $w = f(x, y, z, \tau)$. Pārvietojoties laikā $d\tau$ X ass virzienā, paralēlskalldņa masa mainīsies:

caur skaldni 1-2-7-8 ieplūdis šķidrums masa

$$\rho w_x dy dz d\tau;$$

¹ Substantīvo atvasinājumu $\frac{dw}{d\tau}$ dažreiz apzīmē ar simbolu $\frac{Dw}{D\tau}$.



2.14. att. Plūsmas nepārtrauktības grafisks attēlojums.

caur skaldni 3-4-5-6 izplūdīs šķidruma masa

$$\left(\rho w_x + \frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} dx \right) dy dz d\tau.$$

Paralēlskaldņa masas izmaiņa X ass virzienā tad ir

$$dm_x = \rho w_x dy dz d\tau - \rho w_x dy dz d\tau - \frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} dx dy dz d\tau \quad \text{vai}$$

$$dm_x = - \frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} dx dy dz d\tau.$$

Ievērojot masas izmaiņas arī Y un Z asu virzienā, kopējā šķidruma masas izmaiņa paralēlskaldnī ir

$$\begin{aligned} dm &= dm_x + dm_y + dm_z = \\ &= - \left[\frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z} \right] dx dy dz d\tau. \end{aligned}$$

Masas izmaiņa paralēlskaldnī iespējama tikai tad, ja mainās šķidruma blīvums, t. i., ja

$$dm = \frac{\partial \rho}{\partial \tau} dx dy dz d\tau.$$

No abiem pēdējiem vienādojumiem *saspiežamam šķidrumam* (gāzei) var uzrakstīt nestacionārās plūsmas nepārtrauktības diferenciālvienādojumu:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z} = 0. \quad (2.29)$$

Nesaspiežamiem šķidrumiem $\rho = \text{const}$ un $\partial\rho/\partial\tau = 0$, tādēļ tiem plūsmas nepārtrauktības diferenciālvienādojums ir šāds:

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0. \quad (2.30)$$

Plūsmas nepārtrauktības diferenciālvienādojumu *saspiežama šķidruma (gāzes) nestacionārai plūsmai*, kas vērsta X ass virzienā un plūst caur šķērsriezumu S , var rakstīt šādi:

$$\frac{\partial\rho}{\partial\tau} S + \frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} S = 0,$$

bet *nesaspiežama šķidruma stacionārai plūsmai* ($\rho = \text{const}$):

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} S = 0.$$

Tad

$$w_x S = \text{const}.$$

Sī izteiksme rāda, ka *stacionārai plūsmai jebkurā vietā plūsmas vidējā ātruma reizinājums ar šķērsriezuma laukumu ir nemainīgs lielums.*

2.15. attēlā shematiski parādītajai plūsmai var rakstīt:

$$w_1 S_1 = w_2 S_2.$$

Šo vienādojumu sauc arī par *nemainīga patēriņa vienādojumu*. To var izteikt arī šādi:

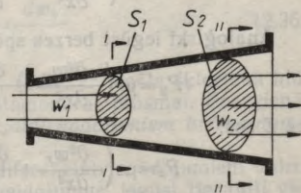
$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{S_2}{S_1} \quad (2.31)$$

t. i., *nepārtrauktai plūsmai tās vidējie ātrumi dažādās plūsmas vietās ir apgriezti proporcionāli plūsmas šķērsriezumiem.*

So attiecību var izteikt arī ar attiecīgiem plūsmas šķērsriezumu diametriem, t. i.,

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

Reāla šķidruma hidrodinamikas diferenciālvienādojumi. Vienādojums (2.1) ir spēkā tad, ja uz paralēlskalni darbojas hidrostatisks spiediens un smaguma spēks. Ja šis paralēlskalnis (sk. 2.1. att.) pārvietojas ar ātrumu w reālā šķidrumā, tad uz to darbojas arī inerces spēks I un berzes spēks P . Tad pēc Dalambēra principa hidrostatisks diferenciālvienādojums



2.15. att. Plūsmas nepārtrauktības shēma.

miem jāpieskaita inerces spēks ar pretēju zīmi un berzes spēks. Tādējādi vienādojums (2.2) kustībā esošam paralēlskaldnim pārveidojams šādi:

$$\begin{aligned} X\rho - \frac{\partial p}{\partial x} - I_x + P_x &= 0 \\ Y\rho - \frac{\partial p}{\partial y} - I_y + P_y &= 0 \\ Z\rho - \frac{\partial p}{\partial z} - I_z + P_z &= 0 \end{aligned} \quad (2.32)$$

Inerces spēks vienāds ar masas un paātrinājuma reizinājumu, t. i., $I = ma$.

Masa $m = \rho V = \rho dx dy dz$; ja $V = 1$, tad $m = \rho$. Paātrinājums izsakāms šādi: $a = \frac{dw}{d\tau}$. Tad inerces spēks $I = \rho \frac{dw}{d\tau}$.

Inerces spēka projekcijas uz koordinātu asīm

$$I_x = \rho \frac{dw_x}{d\tau}; \quad I_y = \rho \frac{dw_y}{d\tau} \quad \text{un} \quad I_z = \rho \frac{dw_z}{d\tau}.$$

Pēc Ņūtona berzes spēks, kas darbojas uz skaldni 1-2-3-4 (sk. 2.1. att.), ir $P_b^x = -\mu dx dz \frac{\partial w_x}{\partial y}$, bet berzes spēks, kas darbojas uz skaldni 5-6-7-8, ir $P_b^{x'} = \mu dx dz \frac{\partial \left(w_x + \frac{\partial w_x}{\partial y} \partial y \right)}{\partial y}$.

Rezultējošais berzes spēks

$$P_b^x + P_b^{x'} = \mu dx dy dz \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2}.$$

Berzes spēku summa visām sešām skaldnēm uz X ass, attiecinot uz $dx dy dz = 1$, ir šāda:

$$P_x = \mu \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right) = \mu \nabla^2 w_x^1.$$

Analogiski iegūst berzes spēku summu uz Y ass:

$$P_y = \mu \left(\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2} \right) = \mu \nabla^2 w_y;$$

uz Z ass:

$$P_z = \mu \left(\frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right) = \mu \nabla^2 w_z;$$

¹ $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ — Laplasa operators.

Vienādojumos (2.32) ievietojot inerces spēka projekcijas un berzes spēka projekcijas un izdalot ar blīvumu ρ , iegūst hidrodinamikas diferenciālvienādojumus reāliem šķidrumiem:

$$\left. \begin{aligned} X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{d\omega_x}{d\tau} + \nu \nabla^2 \omega_x &= 0 \\ Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{d\omega_y}{d\tau} + \nu \nabla^2 \omega_y &= 0 \\ Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{d\omega_z}{d\tau} + \nu \nabla^2 \omega_z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.33)$$

Pēc dažādiem risinājumu veidiem šos vienādojumus ieguvuši franču zinātnieks L. Navjē (1822) un angļu zinātnieks Dž. Stokss (1845). Hidromehānikā tie pazistami kā Navjē—Stoksa vienādojumi. Navjē—Stoksa vienādojumi tagad praktiski atrisināmi tikai vienkāršākos gadījumos, tādēļ hidrodinamikā izmanto galvenokārt ideālo šķidrums hidrodinamikas vienādojumus.

Ideāliem šķidrumiem $\mu=0$, tādēļ, rakstot tiem diferenciālvienādojumus, nav jāņem vērā berzes spēka projekcijas, t. i.,

$$\begin{aligned} X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{d\omega_x}{d\tau} &= 0 \\ Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{d\omega_y}{d\tau} &= 0 \\ Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{d\omega_z}{d\tau} &= 0. \end{aligned}$$

Ja pieņem, ka koordinātu ass paralēlas paralēlskalda skaldnēm, tad $X=0$, $Y=0$ un $Z=-g$. Līdz ar to šos vienādojumus iespējams pārrakstīt šādi:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{d\omega_x}{d\tau} \quad (2.34)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{d\omega_y}{d\tau} \quad (2.35)$$

$$-g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{d\omega_z}{d\tau} \quad (2.36)$$

Iegūtie vienādojumi (2.34), (2.35), (2.36) ir ideāla šķidruma hidrodinamikas diferenciālvienādojumi stacionārai plūsmai. Šos vienādojumus sauc arī par *Eilera diferenciālvienādojumiem hidrodinamikai*.

Bernulli vienādojums. No Eilera diferenciālvienādojumiem hidrodinamikai, izdarot matemātiskus pārveidojumus, iegūst Bernulli vienādojumu. Bernulli vienādojums ir viens no hidrodinamikas pamatvienādojumiem.

Bernulli vienādojuma iegūšanai Eilera diferenciālvienādojumus hidrodinamikai (sk. vienādojumus (2.34), (2.35), (2.36)) attiecīgi reizina ar dx , dy un dz un saskaita:

$$\begin{array}{r|l}
 -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{d w_x}{d \tau} & dx \\
 + \quad -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{d w_y}{d \tau} & dy \\
 -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g = \frac{d w_z}{d \tau} & dz
 \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz \right) - g dz = \\
 & = -\frac{d w_x}{d \tau} dx + \frac{d w_y}{d \tau} dy + \frac{d w_z}{d \tau} dz. \quad (2.37)
 \end{aligned}$$

Iekavās uzrakstītā summa $\frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz$ ir pilns spiediena p diferenciālis $-dp$.

Vienādojuma (2.37) labajā pusē esošo summu var uzrakstīt šādi:

$$\frac{dx}{d\tau} d w_x + \frac{dy}{d\tau} d w_y + \frac{dz}{d\tau} d w_z.$$

No iepriekšteiktā zināms, ka $\frac{dx}{d\tau} = w_x$; $\frac{dy}{d\tau} = w_y$ un $\frac{dz}{d\tau} = w_z$, tad $w_x d w_x + w_y d w_y + w_z d w_z$.

Uzrakstīto summu var pārveidot šādi¹:

$$d \left(\frac{w_x^2}{2} \right) + d \left(\frac{w_y^2}{2} \right) + d \left(\frac{w_z^2}{2} \right) = d \left(\frac{w^2}{2} \right)$$

un vienādojumu (2.37) pārrakstīt tā:

$$\begin{aligned}
 & -\frac{dp}{\rho} - g dz = d \left(\frac{w^2}{2} \right) \quad \text{jeb} \\
 & d \left(\frac{w^2}{2} \right) + \frac{dp}{\rho} + g dz = 0. \quad (2.38)
 \end{aligned}$$

Dalot vienādojuma (2.38) abas puses ar g , iegūst

$$d \left(\frac{w^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z \right) = 0.$$

Pēc integrēšanas

$$\frac{w^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z = \text{const}. \quad (2.39)$$

¹ $w_x d w_x = d \left(\frac{w_x^2}{2} \right)$, jo $d \left(\frac{w_x^2}{2} \right) = \frac{1}{2} d w_x^2 = \frac{1}{2} 2 w_x d w_x = w_x d w_x$.

No hidrostatikas zināms, ka vienādojuma (2.39) otrais loceklis $\frac{p}{\rho g}$ un trešais loceklis z raksturo šķidrums masas vienībai piemītošo potenciālo enerģiju E_p , kas izteikta augstuma veidā.

Pirmais loceklis $\frac{\omega^2}{2g}$ (kā izriet no tā vienībām $\frac{m^2 \cdot s^2}{s^2 \cdot m} = m$) arī apzīmē augstumu. Hidraulikā šo augstumu sauc par *kinētisko (ātruma, dinamisko) augstumu* h_k . Kinētiskais augstums rāda, cik liela kinētiskā enerģija piemīt šķidrums masas vienībai, ja tās ātrums ir ω .

Kinētisko enerģiju izsaka formula $E_k = mv^2/2$ (to mēra džoulos). No blīvuma definīcijas izriet, ka $m = V\rho$. Ja pieņem, ka tilpums $V = 1$, tad $m = \rho$ un kinētiskās enerģijas formulu var pārveidot šādi: $E_k = \rho\omega^2/2$ (izsaka paskālos). Zinot, ka $h = p/(\rho g)$ (izsaka metros), tad kinētiskās enerģijas formula iegūst šādu veidu: $E_k = \omega^2/2g$ (to izsaka metros), kas atbilst iepriekš minētajam kinētiskajam augstumam. No vienādojuma (2.39) secināms, ka jebkurā plūsmas šķērsriezumā pastāv šāds nosacījums¹:

$$E_k + E_p = \text{const},$$

t. i., *kinētiskās enerģijas* $\left(\frac{\omega^2}{2g}\right)$ un *potenciālās enerģijas* $\left(\frac{p}{\rho g} + z\right)$ summa jebkurā plūsmas vietā ir konstants lielums.

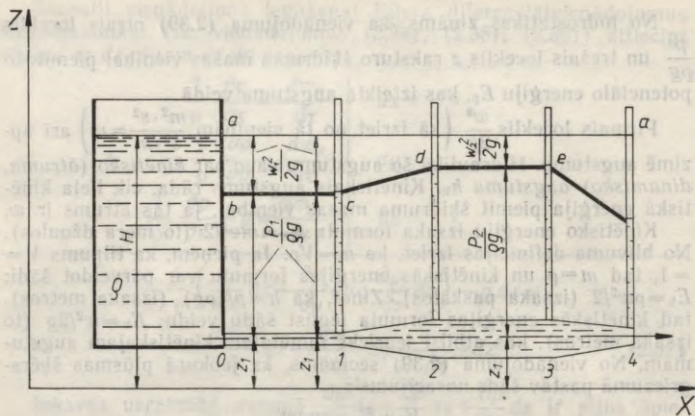
No kinētiskā augstuma izteiksmes redzams, ka plūsmas kinētiskā enerģija tieši proporcionāla tās ātruma kvadrātam $\left(E_k = \frac{\omega^2}{2g}\right)$. Šķidrums plūsmas ātrums var būt mainīgs, līdz ar to mainīsies arī kinētiskā enerģija. Tā kā plūsmas kopējais enerģijas daudzums ir konstants, tad šī maiņa var notikt tikai uz potenciālās enerģijas rēķina.

Kinētiskais augstums $\frac{\omega^2}{2g}$, pjezometriskais augstums $\frac{p}{\rho g}$ un geometriskais augstums z izteikti šķidrums (gāzes) staba metros. Tādēļ arī minēto locekļu summa izsaka augstumu, ko apzīmē ar H un sauc par hidroaustisko augstumu. Sakarā ar to vienādojumu (2.39) var uzrakstīt šādi:

$$\frac{\omega^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z = H = \text{const}. \quad (2.40)$$

Vienādojumu (2.40) sauc par *Bernulli vienādojumu*, un no tā secināms, ka *ideāla šķidrums plūsmai hidroaustiskais augstums H* ,

¹ Bernulli vienādojumu parasti attiecina uz šķidrums elementāru strūkliņu. Pārejot uz šķidrums plūsmu, dažādu strūkliņu dažāda ātruma dēļ (nosakot kinētisko enerģiju) nepieciešams ievērot korekcijas koeficientu α , ko sauc par *Korjolis koeficientu*. Praktiskos aprēķinos pieņem, ka $\alpha = 1$, un uzskata, ka visas plūsmu veidojošās elementārās strūkliņas plūst ar vienādu ātrumu (plūsmas vidējais ātrums ω). Tādēļ dotais Bernulli vienādojums vienkāršības dēļ attiecināms uz visu plūsmu.



2.16. att. Bernulli vienādojuma grafisks attēlojums ideāliem šķidrumiem.

t. i., kinētiskā, pjezometriskā un ģeometriskā augstuma summa, ir nemainīgs lielums jebkuram plūsmas šķērsgriezumam.

Bernulli vienādojums (2.40) iegūts ideālu šķidrumu stacionārai plūsmai, jo vienādojuma iegūšanai izmantoti Eilera diferenciālvienādojumi, kas sastādīti ideāliem šķidrumiem un stacionārai plūsmai.

Bernulli vienādojums izsaka šķidruma plūsmas enerģijas nezūdamības likumu. Hidraulisko augstumu var uzskatīt par šķidruma enerģijas daudzumu, kas attiecināts uz 1 kg vai 1 m³ šķidruma. To apstiprina arī tas, ka

$$[H] = \frac{[\rho]}{[\rho][g]} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^2}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{kg}} \quad \text{vai}$$

$$[\rho] = [\rho][g][H] = \frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{m}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}^2} = \frac{\text{J}}{\text{m}^3},$$

t. i., hidrauliskais augstums, izteikts šķidruma staba metros, atbilst enerģijas daudzumam vienībā kilogramms reiz metrs uz 1 kg šķidruma. Spiediens, kas izteikts paskālos, atbilst enerģijas daudzumam džoulos uz 1 m³ šķidruma.

Bernulli vienādojumu var attēlot grafiski. Sajā nolūkā pieņemsim, ka tvirtnei piestiprināta horizontāla caurule, kurai ir dažādi diametri (2.16. att.). Cauruļvadam posmā 0-1 diametrs ir vienāds, tādēļ šķidruma ātrums ir vienāds ar $w_0 = w_1$ un kinētiskais augstums ir $\frac{w_1^2}{2g}$. Šķidruma līmeņa augstumā novilkta horizontālā līnija *aa* attēlo hidraulisko augstumu *H* jebkuram cauruļvada šķērsgriezumam.

Atliekot uz leju (mērogā) no līnijas aa kinētisko augstumu $\frac{\omega^2_1}{2g}$ (līnija ab), iegūst horizontālu līniju bc (jo kinētiskais augstums posmā $0-1$ ir konstants). Līniju bc sauc par *pjezometrisko līniju*, un tā rāda *potenciālās enerģijas maiņu cauruļvada garengriezumā* (tā rāda arī šķidrums līmeņa augstumu pjezometros).

Posmā $1-2$ šķērsgriezums nepārtraukti palielinās plūsmas virzienā (šādu posmu sauc par *difuzoru*), tādēļ kinētiskais augstums nepārtraukti samazinās (ātrums ω samazinās) no $\frac{\omega^2_1}{2g}$ šķērsgriezumā

1 līdz $\frac{\omega^2_2}{2g}$ šķērsgriezumā 2 . Šī posma pjezometriskā līnija cd ir kāpjosa. Posmā $2-3$ ātrums ω_2 ir konstants, tādēļ arī pjezometriskā līnija paliek horizontāla attālumā $\frac{\omega^2_2}{2g}$ no līnijas aa . Cauruļvada

posmā $3-4$ šķērsgriezuma laukums plūsmas virzienā samazinās (šādu posmu sauc par *konfuzoru*), bet plūsmas ātrums savukārt pieaug.

Jebkuram cauruļvada šķērsgriezumam var uzrakstīt šādu Bernulli vienādojumu:

$$\frac{\omega_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{\omega_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 = H.$$

Ja cauruļvads ir horizontāls un paralēls X asij, tad ģeometriskais augstums z_1 visos cauruļvada šķērsgriezumos ir vienāds. Parasti aprēķinos pieņem, ka X ass sakrīt ar cauruļvada simetrijas asi. Tad z ir vienāds ar nulli.

Tehnikā lieto tikai reālus šķidrumus, kuriem plūstot rodas berze, kas izpaužas kā viskozitāte un šķidrums berze gar cauruļvada sienām. Bez tam novērojami arī citi plūsmas enerģijas zudumi, kas saistīti ar plūsmas virziena un šķērsgriezuma maiņu.

Reāliem šķidrumiem Bernulli vienādojums jāpapildina ar lielumu h_z , kas izsaka *hidrauliskā augstuma zudumu*:

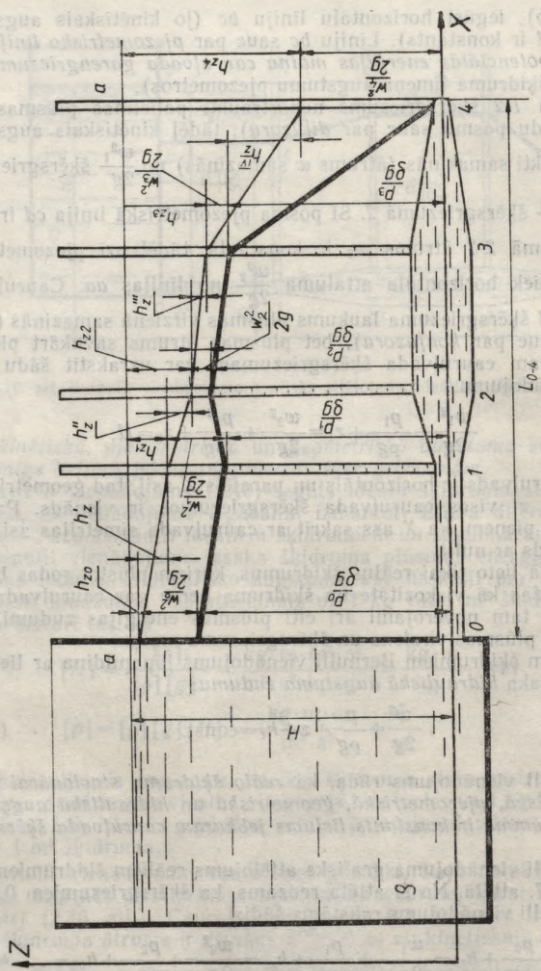
$$\frac{\omega^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z + h_z = \text{const.} \quad (2.41)$$

Bernulli vienādojums rāda, ka *reālo šķidrumu stacionārai plūsmai kinētiskā, pjezometriskā, ģeometriskā un hidrauliskā augstuma zudumu summa ir konstants lielums jebkuram cauruļvada šķērsgriezumam*.

Bernulli vienādojuma grafisks attēlojums reāliem šķidrumiem parādīts 2.17. attēlā. No šī attēla redzams, ka šķērsgriezumiem $0, 1, 2$ utt. Bernulli vienādojums rakstāms šādi:

$$\frac{\omega_0^2}{2g} + \frac{p_0}{\rho g} + h_{z0} = \frac{\omega_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + h_{z1} = \frac{\omega_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + h_{z2} = \dots = H.$$

Tā kā X ass sakrīt ar cauruļvada asi, ģeometriskais augstums z ir vienāds ar nulli.



2.17. att. Bernulli vienādojuma grafišks attēlojums reāliem šķidrumiem.

Hidrauliskā augstuma zudums h_{z0} izsaka augstuma zudumu, kas saistīts ar šķidruma ieplūdi no tvertnes caurulē. Šķērsriezumā 1 hidrauliskā augstuma zudums $h_{z1} = h_{z0} + h'_z$. Nogrieznis h'_z sastāda daļu no hidrauliskā augstuma, kurš izlietots berzes pārvarēšanai taisnajā posmā 0-1. Līdzīga aina redzama visā cauruļvada garumā.

Šķērsriezumā 4 (izplūde) pjezometriskais augstums vienāds ar nulli, bet hidrauliskais augstums vienāds ar kinētiskā un hidrauliskā augstuma zudumu summu, t. i.,

$$H = \frac{w_4^2}{2g} + h_{z4}. \quad (2.42)$$

So hidrauliskā augstuma izteiksmi bieži lieto praksē.

Hidrauliskā augstuma zudumu uz garuma vienību sauc par *hidraulisko kritumu i*:

$$i = \frac{h_{z4}}{L_{0.4}}. \quad (2.43)$$

Sastādot Bernulli vienādojumus praktisku uzdevumu risināšanai, parasti pirmo šķērsriezumu izvēlas tur, kur vienkāršāk noteikt Bernulli vienādojumā esošos fizikālos lielumus, otro — tur, kur atrodas meklējamais lielums. Ja Bernulli vienādojumā ir divi nezināmie, tad kā otro vienādojumu lieto plūsmas nepārtrauktības vienādojumu tiem pašiem šķērsgriezumiem, kādi ņemti, sastādot Bernulli vienādojumu.

2.3. HIDRAULISKĀS PRETESTĪBAS

Šķidrumu (gāzu) plūsmas, virzoties pa caurulēm, kanāliem vai iekārtām, pārvar pretestības, kas rodas, plūsmai saskaroties ar sienām, mainot virzienu vai šķērsriezumu. Tās sauc par *hidrauliskajām pretestībām*. Hidraulisko pretestību pārvarēšanā zūd daļa plūsmas enerģijas, kas aizplūst no sistēmas siltuma enerģijas veidā.

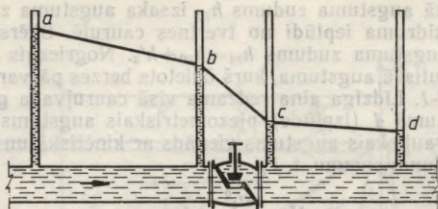
Daļu no hidrauliskā augstuma, ko plūsma zaudē, pārvarot hidrauliskās pretestības, Bernulli vienādojumā sauc par *hidrauliskā augstuma zudumu h_z* (sk. formulu (2.41)).

Vienmērīgai plūsmai hidrauliskā augstuma zudums veidojas no divām daļām: hidrauliskā augstuma zudums berzes pārvarēšanai h_b un hidrauliskā augstuma zudums vietējo pretestību pārvarēšanai h_{vp} ,

$$h_z = h_b + h_{vp}. \quad (2.44)$$

Nestacionārai plūsmai jāievēro arī zudumi inerces pārvarēšanai h_i .

Hidrauliskā augstuma zudums berzes pārvarēšanai. Hidrauliskā augstuma zudums berzes pārvarēšanai sadalās vienmērīgi pa visu caurules garengriezumu (2.18. att., posms *ab*, *cd*). Turpretī vietējās pretestības rada strauju plūsmas enerģijas samazināšanos isā posmā (*bc*).



2.18. att. Hidrauliskā augstuma zudumi.

Hidrauliskā augstuma zudumu berzes pārvarēšanai izsaka kā daļu no kinētiskā augstuma:

$$h_b = \zeta_b \frac{\omega^2}{2g}. \quad (2.45)$$

kur ζ_b — berzes pretestības koeficients.

Berzes pretestības koeficients ζ_b ir tieši proporcionāls caurules garumam l un apgriezti proporcionāls caurules (iekārtas) diametram d :

$$\zeta_b = \lambda \frac{l}{d}, \quad (2.46)$$

kur λ — hidrauliskās pretestības koeficients jeb ārējās berzes koeficients, kas atkarīgs no plūsmas režīma un plūsmu norobežojošās virsmas raupjuma.

Ievietojot vienādojumā (2.45) berzes pretestības koeficienta izteiksmi, iegūst formulu berzes zudumu noteikšanai:

$$h_b = \lambda \frac{l}{d} \frac{\omega^2}{2g}. \quad (2.47)$$

Šī izteiksme pazīstama kā Darsī—Veisbaha formula.

Laminārai plūsmai hidrauliskās pretestības koeficientu λ iespējams aprēķināt, izmantojot šķidrums caurteci, ko var noteikt pēc formulas:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \omega$$

un pēc formulas (2.26)

$$Q = \frac{\pi d^4 (p_1 - p_2)}{128 \mu l}.$$

Tad, pielīdzinot vienu otrai abas pēdējās formulas, var rakstīt:

$$\frac{\pi d^2}{4} \omega = \frac{\pi d^4 (p_1 - p_2)}{128 \mu l}.$$

Pēc saīsināšanas un pārveidošanas iegūst:

$$p_1 - p_2 = \Delta p = \frac{32\mu\omega l}{d^2}.$$

Spiediena zudumu Δp berzes pārvarēšanai var izteikt arī šādi (sk. vienādojumu (2.47)):

$$\Delta p = h_b \rho g = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho \omega^2}{2} \text{ vai } \frac{32\mu\omega l}{d^2} = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho \omega^2}{2}.$$

Pēc pārveidošanas iegūst

$$\lambda = \frac{64\mu}{\omega d \rho} \text{ jeb } \lambda = \frac{64}{\frac{\omega d \rho}{\mu}}.$$

Saucēja izteiksme $\frac{\omega d \rho}{\mu}$ ir Reinoldsa skaitlis Re , tātad

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{A}{Re}. \quad (2.48)$$

Laminārai plūsmai $\lambda = f(Re)$.

Formulas (2.48) skaitītājā esošais skaitlis $A=64$ lietojams apaļām caurulēm. Ja šķērsgriezums ir kvadrāts, tad $A=57$; ja vienādsānu trijstūris, tad $A=53$. Gredzenveida šķērsgriezumam $A=96$; taisnstūrveida šķērsgriezumam ar malām a un b : ja $\frac{a}{b}=0,1$, tad

$A=85$; ja $\frac{a}{b}=0,5$, tad $A=62$.

Turbulentai plūsmai hidrauliskās pretestības koeficienta aprēķināšanai lieto empīriskas formulas, kas iegūtas eksperimentāli.

Pētījumu rezultāti, kas iegūti, strādājot ar parastā raupjuma caurulēm, parādīti 2.19. attēlā, kur redzamas četras joslas.

Pirmā josla sakrīt ar taisni I un aptver lamināro plūsmu. Pētījumi rāda, ka laminārai plūsmai sienīgas raupjums neietekmē hidrauliskās pretestības koeficientu. Šinī joslā λ atkarīgs tikai no Reinoldsa skaitļa:

$$\lambda = f_1(Re) \text{ un } h_b = k_1 \omega.$$

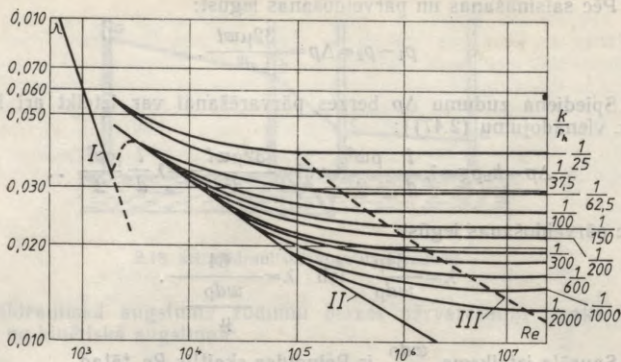
Pirmā josla novērojama, ja $Re \leq 2300$.

Otro joslu norobežo līkne II. Šeit spēkā sakarības:

$$\lambda = f_2(Re) \text{ un } h_b = k_2 \omega^{1,75}.$$

Otrā josla (*gludā berze*) novērojama, ja $2300 < Re < 10 \frac{1}{\varepsilon}$, kur $\varepsilon = k/d$ — caurules relatīvais raupjums (sk. 50. lpp.). Tad λ aprēķināms pēc Blaziusa formulas:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (2.49)$$



2.19. att. Sakarība $\lambda = f\left(Re, \frac{k}{r_h}\right)$ parastā raupjuma caurulēm.

Otrajai joslai laminārās plūsmas robežkārtas biezums (pie sienas) ir lielāks par sienas absolūto raupjumu k , tādēļ sienas nelīdzenumus pilnīgi nosedz laminārā robežkārtā. Šādu stāvokli sauc par *hidrauliski gludu virsmu*. Sienas nelīdzenumi šajā gadījumā neietekmē šķidruma kustību, un plūsmas enerģijas zudumi atkarīgi tikai no šķidruma īpašībām.

Starp līknēm II un III atrodas trešā josla. Šīnī joslā $\lambda = f\left(Re, \frac{k}{d}\right)$; t. i., hidrauliskās pretestības koeficients ir atkarīgs no Reinoldsa skaitļa un relatīvā raupjuma $\frac{k}{d}$. Trešajai joslai laminārās plūsmas robežkārtas biezums mazāks par sienas izcilnišu augstumu k . Šādu stāvokli sauc par *hidrauliski raupju* (negludu) *virsmu*. Šī ir *jauktas berzes josla*.

Sienas izcilniši, kas otrajā joslā vēl ir pārsegti ar laminārās plūsmas robežkārtu, trešajā joslā ievērojami ietekmē hidrauliskās pretestības koeficientu:

$$\lambda = f_3\left(Re, \frac{k}{r_h}\right); \quad h_b = k_3 \omega^{1,75 \dots 2}$$

Trešā josla novērojama, ja $10 \frac{1}{e} < Re < 560 \frac{1}{e}$.

Hidrauliskās pretestības koeficientu λ var aprēķināt pēc formulas:

$$\lambda = 0,11 (e + 68/Re)^{0,25}. \quad (2.50)$$

Ceturtajā joslā $\lambda = f\left(\frac{k}{r_h}\right)$. Šī josla atrodas pa labi no līknes III, un šajā joslā līknes gandrīz paralēlas Re asij. Tas nozīmē, ka λ at-

karīgs no relatīvā raupjuma, bet nav atkarīgs no Reinoldsa skaitļa. Šajā joslā gar caurules sienām vairs nav laminārās plūsmas robežkārtas un visā plūsmā ir turbulents režīms. Vienmērīgai plūsmai ceturtajā joslā pastāv šādas sakarības:

$$\lambda = f_4 \left(\frac{k}{d} \right); \quad h_b = k_4 \omega^2.$$

Hidrauliskā augstuma zudums šajā joslā proporcionāls ātruma kvadrātam. Tādēļ šo joslu sauc arī par *kvadrātiskā ātruma joslu*.

Ceturrtā josla sākas, ja $Re \geq 560 \frac{1}{\epsilon}$. Hidrauliskās berzes koeficientu λ šai joslai var aprēķināt pēc Nikuradzes formulas:

$$\lambda = \frac{1}{\left(1,74 + 2,1g \frac{d}{k} \right)^2} \quad (2.51)$$

vai pēc Sifrinsona formulas:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{k}{d} \right)^{0,25} \quad (2.52)$$

Vietējās pretestības. Vietējā pretestība ir jebkura plūsmas virziena vai šķērsgriezumu maiņa (līkņi, ieplūdne, izplūdne, ventiļi u. c.). Plūsmai pārvarot vietējo pretestību, hidrauliskā augstuma zudumu izsaka kā daļu no kinētiskā augstuma, t. i.,

$$h_{vp} = \zeta_{vp} \frac{\omega^2}{2g}, \quad (2.53)$$

kur ζ_{vp} — *vietējās pretestības koeficients*.

Ja plūsmai jāpārvar vairākas vietējās pretestības, tad tās summējas:

$$h_{vp} = \sum_1^n \zeta_{vp} \frac{\omega^2}{2g}. \quad (2.54)$$

Vietējās pretestības koeficients atkarīgs ne tikai no pretestības veida, bet arī no plūsmas režīma, t. i., no Reinoldsa skaitļa. Maz datu ir par vietējās pretestības koeficientiem laminārajam režīmam. Turbulentajā režīmā vietējās pretestības koeficienta atkarība no Reinoldsa skaitļa ir niecīga, tādēļ uzskata, ka turbulentai plūsmai šie koeficienti atkarīgi tikai no vietējās pretestības veida. Vietējās pretestības koeficientu skaitliskās vērtības iegūst no rokasgrāmatām atkarībā no vietējās pretestības veida.

Hidrauliskā augstuma zudumu vietējo pretestību pārvarēšanai izsaka arī ar t. s. *ekvivalento garumu* l_e . Ar to saprot taisnas

caurules gabalu, kurā zudumi berzes pārvarēšanai vienādi ar hidrauliskā augstuma zudumu vietējo pretestību pārvarēšanai:

$$\zeta_{vp} = \lambda \frac{l_e}{d} = \lambda n. \quad (2.55)$$

Ekvivalento garumu aprēķina, izmantojot 2.2. tabulā ievietotos datus.

Atkarībā no vietējās pretestības un berzes pretestības plūsmas iedala šādi: 1) iztece pa caurumiem un uzgaļiem; 2) plūsma īsās sistēmās ($l < 200$ m); 3) plūsma garās sistēmās ($l > 200$ m).

Iztece pa caurumiem un uzgaļiem saistīta tikai ar vietējām pretestībām. Zudumus berzes pārvarēšanai šajā gadījumā neievēro.

Īsās sistēmās plūsmām jāievēro vietējās pretestības un berzes pretestības. No kopējiem zudumiem zudumi vietējo pretestību dēļ parasti ir lielāki par 10...15%.

Garās sistēmās hidrauliskā augstuma zudumu, kas rodas, pārvarot vietējās pretestības, atsevišķi var arī neapreķināt (ja sistēmā nav tādas speciālas iekārtas, kas ievērojami paaugstina pretestību), bet palielināt par 5...10% hidrauliskā augstuma zudumus berzes pārvarēšanai.

Šķidrumu pārvietošana saistīta galvenokārt ar enerģijas zudumu berzes pretestības pārvarēšanai. Turpretī gāzu (gaisa) pārvietošana saistīta galvenokārt ar enerģijas zudumu vietējo pretestību pārvarēšanai, tādēļ gaisvadiem vietējās pretestības jāaprēķina neatkarīgi no sistēmas garuma.

Cauruļvadu aprēķini. Cauruļvadu aprēķinu pamatā ir Bernulli vienādojums.

Hidraulisko augstumu H cauruļvados patērē ātruma nodrošināšanai $\left(\frac{\omega^2}{2g}\right)$, berzes $\left(\lambda \frac{l}{d} \frac{\omega^2}{2g}\right)$ un vietējo pretestību $\left(\sum_1^n \zeta_{vp} \frac{\omega^2}{2g}\right)$ pārvarēšanai. Ja hidraulisko augstumu izsaka metros, tad

$$H = \frac{\omega^2}{2g} \left(1 + \lambda \frac{l}{d} + \sum_1^n \zeta_{vp} \right). \quad (2.56)$$

2.2. tabula

Ekvivalentā garuma koeficienta n vērtības
($l_e = nd$)

Pretestības veids	n
Likņi bez noapaļojuma $d=25 \dots 70$ mm	30
$d=70 \dots 150$ mm	40
$d=150 \dots 250$ mm	50
T profils 25...100 mm	60...90
Krustenis	50
Ventilis, normālais	100...120
Aizbīdnis	10...15
Pretvārsts	75
Ieplūdne ar nenoapaļotām malām	20

Spiediens, ja to izsaka paskālos, ir šāds:

$$\Delta p = \rho g H = \frac{\omega^2 \rho}{2} \left(1 + \lambda \frac{l}{d} + \sum_1^n \zeta_{vp} \right). \quad (2.57)$$

Ja šķidrumu pārvieto z metru augstumā un tvertnē, kurā to ievada, ir pretspiediens p_2 paskālu, tad

$$\Delta p = \frac{\rho \omega^2}{2} \left(1 + \lambda \frac{l}{d} + \sum_1^n \zeta_{vp} \right) + \rho g z + \frac{p_2 - p_1}{\rho g}, \quad (2.58)$$

kur ρ — šķidruma blīvums, kg/m^3 ; p_1 — spiediens tvertnē, no kuras izvada šķidrumu, Pa.

Ķīmiskajā rūpniecībā biežāk sastopamie cauruļvadu aprēķina gadījumi sakopoti 2.3. tabulā.

Gaisa pievadiekārtas aprēķini. Gaisa pievadiekārta (arī aizvadiekārta) sastāv no gaisvadiem un ventilatora (gaisvadu sistēmā var būt ieslēgta žāvētava, kaloriferi, filtri, skruberi u. c.).

Gaisvadiem jābūt hermētiskiem un ar mazu pretestību. Tādēļ tie jāveido bez straujām pārejām. Gaisvadu pretestība atkarīga arī no gaisa ātruma. Spiedcaurulē gaisa ātrums parasti nepārsniedz 10 m/s, sūcējcaurulē — 5...8 m/s. Ja gaisvads sazarojas, gaisa ātrumu sadala tā, lai plūsmas virzienā pēc gaisa novadišanas sānis gaisa ātrums samazinātos. Gaisa plūsmu regulē ar aizbīdņiem, ko novieto atzarojumos.

Kopējais nepieciešamais maksimālais gaisa spiediens nosakāms tāpat kā šķidrumiem. Tas nav liels, tādēļ to bieži izsaka ūdens staba milimetros ($\text{mm H}_2\text{O}$) vai paskālos. So spiedienu gaisam nodrošina ventilators.

Spiediena zudumu berzes pārvarēšanai var noteikt tāpat kā šķidrumiem. To var izteikt arī ar īpatnējo spiediena zudumu R , t. i., ar *spiediena zudumu berzes pārvarēšanai vienībā ūdens staba milimetri uz katru gaisvada metru*. Īpatnējā spiediena zuduma R vērtības dotas rokasgrāmatās.

Ja gaisvads sastāv no dažāda diametra posmiem, tad nosaka berzes zudumus atsevišķiem posmiem un pēc tam tos summē:

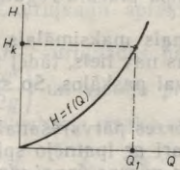
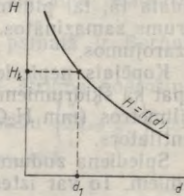
$$h_b = \sum_1^m Rl.$$

Zudumus vietējo pretestību pārvarēšanai gaisvados apzīmē ar Z un nosaka tāpat kā šķidrumiem pēc formulas

$$Z = \zeta_{vp} \frac{\rho \omega^2}{2g},$$

kur Z izteikts $\text{mm H}_2\text{O}$ vai paskālos.

Cauruļvadu aprēķini

Dots:	Šķidrumam (gāzei) — caurtece Q , m ³ /s; viskozitāte μ , Pa·s. Cauruļvadam — diametrs d , m; garums l , m; raupjums k , m.	Šķidrumam (gāzei) — viskozitāte μ , Pa·s. Cauruļvadam — diametrs d , m; garums l , m; raupjums k , m. Hidrauliskais augstums H_k , m.	Šķidrumam (gāzei) — caurtece Q , m ³ /s; viskozitāte μ , Pa·s. Cauruļvadam — garums l , m; raupjums k , m. Hidrauliskais augstums H_k , m.
Izaprēķina	Hidrauliskais augstums H_1 , m.	Šķidruma (gāzes) caurtece Q , m ³ /s.	Cauruļvada diametrs d_1 , m.
Risināšanas paraugi	<p>1. Zinot Q un d, aprēķina $w = \frac{4Q}{\pi d^2}$</p> <p>2. Aprēķina $Re = \frac{wd\rho}{\mu}$</p> <p>3. Aprēķina λ pēc attiecīgas formulas.</p> <p>4. Aprēķina kinētisko augstumu $h_k = \frac{w^2}{2g}$</p> <p>5. Aprēķina hidrauliskā augstuma zudumu berzes pārvarēšanai $h_b = \lambda \frac{l}{d} \frac{w^2}{2g}$</p> <p>6. Aprēķina hidrauliskā augstuma zudumu vietējo pretestību pārvarēšanai $h_{vp} = \sum_1^n \zeta_{vp} \frac{w^2}{2g}$</p> <p>7. Aprēķina kopējo hidraulisko augstumu $H_1 = h_k + h_b + h_{vp}$</p>	<p>Grafiski analītiskā metode</p> <p>Konstruē likni $H=f(Q)$.</p> <p>Pēc 1. parauga, pieņemot dažādas Q vērtības, iegūst atbilstošas H vērtības.</p> <p>Pēc iegūtām H un Q vērtībām zīmē likni $H=f(Q)$.</p>  <p>No liknes pēc dotā H_k iegūst Q_1 vērtību</p>	<p>Konstruē likni $H=f(d)$.</p> <p>Pēc 1. parauga, pieņemot dažādas d vērtības, iegūst atbilstošas H vērtības.</p> <p>Pēc iegūtām H un d vērtībām zīmē likni $H=f(d)$.</p>  <p>No liknes pēc dotā H_k iegūst d_1 vērtību</p>

Vietējās pretestības koeficients ζ_{vp} atkarīgs no pretestības veida (pagrieziens, šķērsgriezuma maiņa, aizbīdnis u. c.) un to iegūst no rokasgrāmatām.

Ja gaisvadu sistēmā ieslēgta kāda iekārta, piemēram, žāvētava, filtrs vai cita iekārta, tad, nosakot kopējo pretestību, jāievēro arī iekārtas pretestība H_{lek} un tā jāpieskaita pārējiem zudumiem. Tātad hidraulisko augstumu, kas jānodrošina ventilatoram, var iegūt šādi:

$$H = \sum_1^m Rl + \sum_1^n Z + \frac{\rho\omega^2}{2g} + H_{lek}. \quad (2.59)$$

Kopējais gaisa spiediens (paskālos)

$$\Delta p = gH.$$

Ja gaisvadu sistēma ir ar atzarojumiem (2.20. att.), tad nepieciešamo kopējo spiedienu nosaka pēc *magistrālā vada*, kas ir vads ar vislielāko pretestību.

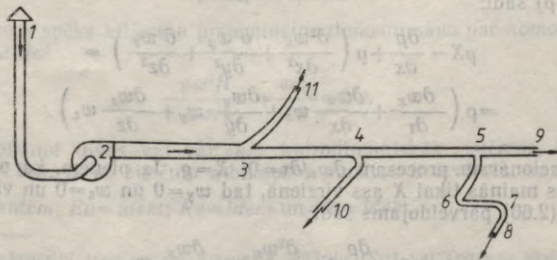
No 2.20. attēla redzams, ka garuma un vietējo pretestību ziņā posmā 1-8 sagaidāma vislielākā pretestība, tādēļ tas uzskatāms par magistrālo vadu. Ja rodas šaubas, tad aprēķinot jāpārlicinās, kurā posmā ir vislielākā pretestība. Ja plūstošais gaiss spēs pārvarēt magistrālā vada pretestību (*maksimālo pretestību*), tad tas pārvarēs pretestību arī posmos 1-11, 1-10 un 1-9.

Caurules optimālā diametra noteikšana. Projektējot cauruļvadus tālai gāzes vai šķidrums transportēšanai, jāizvēlas caurules optimālais diametrs. Jo mazāks caurules diametrs, jo tā ir lētāka, bet, šķidrums transportējot, jāpatērē lielāka enerģija, kas atkarīga no plūsmas ātruma.

Lai noteiktu caurules optimālo diametru, aprēķina ekspluatācijas un amortizācijas izdevumus dažādiem plūsmas ātrumiem un zīmē grafiku (2.21. att.). Optimālais ātrums atbilst izdevumu minimumam uz summārās izdevumu līknes. Caurules optimālo diametru iegūst no formulas (2.14):

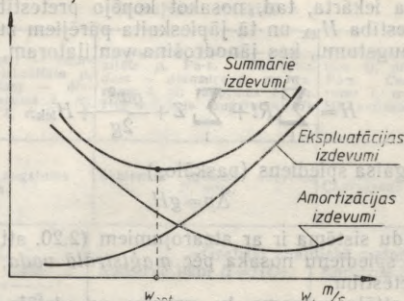
$$d = \sqrt{\frac{Q}{0,785\omega_{opt}}}$$

kur d — caurules optimālais diametrs, m.



2.20. att. Gaisvadu shēma.

Izdevumi, rbl.



2.21. att. Optimālā ātruma noteikšana.

Līdzības kritēriju noteikšana no Navjē—Stoksa diferenciālvienādojumiem. Navjē—Stoksa diferenciālvienādojumi raksturo šķidruma plūsmu, kurā darbojas masas, inerces, spiediena un berzes spēki. Attiecībā uz X asi var rakstīt (sk. vienādojumu (2.33))

$$X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{d w_x}{d \tau} + \nu \nabla^2 w_x = 0,$$

kur $\frac{d w_x}{d \tau}$ ir pilns ātruma atvasinājums pēc laika. To sauc par substitūvo atvasinājumu (sk. vienādojumu (2.27)).

$$\frac{d w_x}{d \tau} = \frac{\partial w_x}{\partial \tau} + \frac{\partial w_x}{\partial x} w_x + \frac{\partial w_y}{\partial y} w_y + \frac{\partial w_z}{\partial z} w_z.$$

Izvērstā veidā Navjē—Stoksa diferenciālvienādojumu (attiecībā uz X asi) var pārrakstīt (iepriekš reizinot ar šķidruma (gāzes) blīvumu ρ) šādi:

$$\begin{aligned} \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right) = \\ = \rho \left(\frac{\partial w_x}{\partial \tau} + \frac{\partial w_x}{\partial x} w_x + \frac{\partial w_y}{\partial y} w_y + \frac{\partial w_z}{\partial z} w_z \right). \end{aligned} \quad (2.60)$$

Stacionāram procesam $\partial w_x / \partial \tau = 0$; $X = g$. Ja pieņem, ka plūsmas ātrums mainās tikai X ass virzienā, tad $w_y = 0$ un $w_z = 0$ un vienādojums (2.60) pārveidojams šādi:

$$\rho g - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial w_x}{\partial x} w_x.$$

Inerces spēka izteiksmē $\rho \frac{\partial \omega_x}{\partial x} \omega_x$ diferenciālus aizvieto ar galiem lielumiem, tad

$$\rho \frac{\partial \omega_x}{\partial x} \omega_x \approx \rho \frac{\omega}{l} \omega = \rho \frac{\omega^2}{l}.$$

Smaguma spēka ρg attiecība pret iegūto inerces spēka izteiksmi veido bezdimensiālu kompleksu

$$\rho g / \left(\frac{\rho \omega^2}{l} \right) = gl / \omega^2.$$

Uzrakstītā kompleksa apgriezto lielumu sauc par *Frūda kritēriju*, t. i.,

$$\frac{\omega^2}{gl} = Fr. \quad (2.61)$$

Spiediena spēka $\partial p / \partial x \approx \rho / l$ attiecība pret inerces spēku veido bezdimensionālu kompleksu, kuru sauc par *Eilera kritēriju*. Spiediena p vietā ievieto spiedienu starpību Δp starp diviem punktiem šķidruma (gāzes) plūsmā:

$$\frac{\Delta p / l}{\rho \omega^2 / l} = \frac{\Delta p}{\rho \omega^2} = Eu. \quad (2.62)$$

Inerces spēka $\rho \omega^2 / l$ attiecība pret berzes spēku $\mu \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial x^2} \approx \frac{\mu \omega}{l^2}$ veido bezdimensionālu kompleksu, kuru sauc par *Reinoldsa kritēriju*

$$\frac{\rho \omega^2 / l}{\mu \omega / l^2} = \frac{\omega l \rho}{\mu} = Re. \quad (2.63)$$

Ja plūsma ir nestacionāra, tad $\partial \omega_x / \partial \tau \neq 0$ un vienādojumā (2.60) esošo locekli $\rho \partial \omega_x / \partial \tau$ var izteikt šādi:

$$\rho \partial \omega_x / \partial \tau \approx \rho \omega / \tau.$$

Inerces spēka attiecību pret minēto izteiksmi sauc par *homohrono kritēriju* Ho^1

$$\frac{\rho \omega^2 / l}{\rho \omega / \tau} = \frac{\omega \tau}{l} = Ho. \quad (2.64)$$

Salīdzinot divas vai vairākas hidrodinamiskās sistēmas, tās ir līdzīgas tad, ja šo sistēmu atbilstošos punktos ir ievērots, ka

$$Fr = idem; Eu = idem; Re = idem \text{ un } Ho = idem.$$

¹ Šo kritēriju sauc arī par Strauhala kritēriju (*Str*) vai Tomsona skaitli (*Th* vai N_{Ta}).

Vadoties no otrās līdzības teorēmas, Navjē—Stoksa diferenciāl-vienādojumu var uzrakstīt kā funkcionālu sakarību starp līdzības kritērijiem, t. i.,

$$f(Fr, Eu, Re, Ho) = 0.$$

No iepriekšteiktā zināms, ka šie kritēriji raksturo plūsmu dinamisko un kinemātisko līdzību. Lai sistēmas līdzība būtu pilnīga, jāievēro arī ģeometriskā līdzība. Aplūkojot plūsmu caurulēs vai cilindriskos aparātos, ģeometrisko līdzību izsaka ģeometriskais simplekss — caurules garuma attiecība pret diametru vai ekvivalento diametru, t. i., $G = l/d$, tad

$$f'(Fr, Eu, Re, Ho, G) = 0.$$

Hidrodinamiskos procesos nosakāmais lielums ir Δp . Tas ietilpst Eilera kritērijā, tādēļ šis kritērijs ir nosakāmais kritērijs, bet pārējie — noteicošie kritēriji:

$$Eu = f'(Fr, Re, Ho, G).$$

Stacionārai plūsmai $Ho = 0$, tad

$$Eu = f''(Fr, Re, G).$$

Spiedcaurulēs, kur masas spēka ietekme uz Δp ir niecīga, var ignorēt Frūda kritēriju, tad

$$Eu = f'''(Re, G).$$

Pēc līdzības teorijas šādas funkcijas izsaka kā pakāpju funkcijas, t. i.,

$$Eu = C Re^m G^n. \quad (2.65)$$

Uzrakstīto kritēriālo sakarību iegūst, pārveidojot Darsī—Veisbaha vienādojumu (sk. vienādojumu (2.47)):

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho \omega^2}{2}.$$

Minēto vienādojumu var pārrakstīt šādi:

$$\frac{\Delta p}{\rho \omega^2} = \frac{1}{2} \lambda \frac{l}{d}.$$

Laminārai plūsmai apaļiem plūsmas šķērsgriezumiem $\lambda = \frac{64}{Re}$, tad

$$\frac{\Delta p}{\rho \omega^2} = 32 Re^{-1} \frac{l}{d} \quad \text{vai} \quad Eu = 32 Re^{-1} \frac{l}{d}.$$

Salīdzinot pēdējo vienādojumu ar vienādojumu (2.65), redzams, ka $C = 32$; $m = -1$; $n = 1$.

Turbulentai plūsmai $\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}}$,

tad

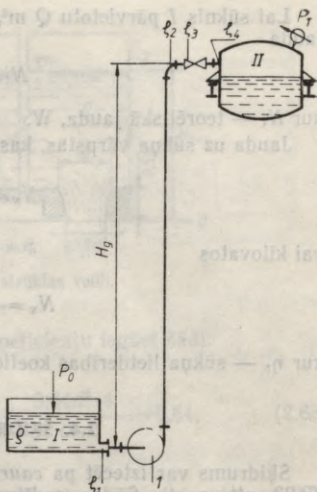
$$Eu = \frac{1}{2} \frac{0,316}{Re^{0,25}} \frac{l}{d} \quad \text{vai}$$

$$Eu = 0,158 Re^{-0,25} \frac{l}{d}, \quad \text{t. i.,}$$

$$C = 0,158; \quad m = -0,25.$$

Energijas patēriņš šķidruma pārvietošanai. Šķidruma pārvietošanai nepieciešamās enerģijas vai jaudas noteikšanai pamatā ir Bernulli vienādojums, piemēram, ja šķidrums jāpārvieto no tvertnes *I* uz tvertni *II* (2.22. att.), tad jānosaka, cik liela jauda nepieciešama sūkņa *I* darbināšanai un cik liels spiediens sūknim jārada, ievērojot, ka tvertnē *II* ir virrspiediens p_1 , kas izteikts paskālos.

Hidrauliskais augstums, kas jānodrošina sūknim, summējas no šādām hidrauliskā augstuma daļām, kas nepieciešamas



2.22. att. Hidrauliskā augstuma noteikšana, ja ir virrspiediens.

- vajadzīgā ātruma nodrošināšanai $\frac{\omega^2}{2g}$;
- vietējo pretestību pārvarēšanai cauruļvados $\sum_1^n \zeta_{vp} \frac{\omega^2}{2g}$;
- berzes pārvarēšanai cauruļvados $\zeta_b \frac{\omega^2}{2g}$;
- virsspiediena pārvarēšanai tvertnē *II* $\frac{p_1 - p_0}{\rho g}$;
- šķidruma pacelšanai no zemākā līmeņa līdz augstākajam līmenim H_g .

Tādēļ var rakstīt, ka hidrauliskais augstums

$$H = \frac{\omega^2}{2g} \left(1 + \sum_1^{n-4} \zeta_{vp} + \zeta_b \right) + \frac{p_1 - p_0}{\rho g} + H_g, \quad (2.66)$$

kur H izteikts pārvietojamā šķidruma staba metros.

Šķidruma pārvietošanai nepieciešamais spiediens

$$\Delta p = H g \rho,$$

kur Δp izteikts paskālos.

Lai sūknis I pārvietotu Q m³/s šķidrums, nepieciešamā teorētiskā jauda

$$N_t = Q\Delta p,$$

kur N_t — teorētiskā jauda, W.

Jauda uz sūkņa vārpstas, kas izteikta vatos:

$$N_v = \frac{Q\Delta p}{\eta_s}$$

vai kilovatos

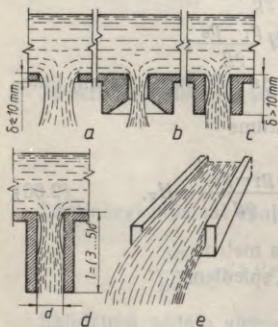
$$N_v = \frac{Q\rho gH}{\eta_s 1000}, \quad (2.67)$$

kur η_s — sūkņa lietderības koeficients.

2.4. ŠĶIDRUMA IZTECE

Šķidrums var iztecēt pa *caurumiem* (2.23. att. *a*, *b*) un *uzgaļiem* (2.23. att. *c*, *d*). Šādos gadījumos izplūde atrodas zem šķidruma līmeņa. Ja iztece notiek plūsmā ar brīvu virsmu (2.23. att. *e*), to sauc par *pārgāzi*. Uzgaļus un caurumus izgatavo atkarībā no vēlamā strūkļas veida.

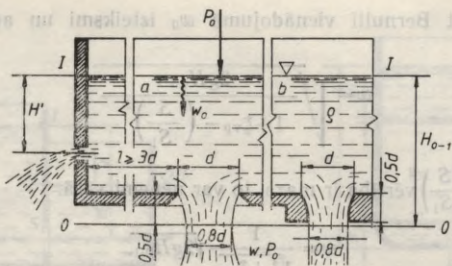
Šķidruma iztece var notikt konstantā un mainīgā līmenī, pa «*maziem*» un «*lieliem*» caurumiem «*plānās*» sienās (ja strūkļa nesaslāpina cauruma sienas neatkarīgi no sienas biezuma (2.23. att. *a*, *b*)) un pa uzgaļiem. Ja caurums atrodas zem šķidruma līmeņa 5...10 reizes dziļāk par savu vertikālo izmēru, tad tādus caurumus hidrauliskā uzskata par «*maziem*» caurumiem. Ja caurums atrodas tuvāk līmenim, tad tas uzskatāms par «*lielu*» caurumu.



2.23. att. Šķidruma izteces veidi.

Iztece konstantā līmenī. Ja izteces vieta atrodas «*plānā*» sienā, tad strūkļai ir 2.24. attēlā *a* parādītais veids. Kā redzams, ja caurums atrodas vismaz $3d$ attālumā no sienas, tad izplūstošajai strūkļai šķidruma daļiņu inerces dēļ attālumā $0,5d$ no izplūdes sākuma ir vismazākais šķērsriezums. Šai vietā strūkļas diametrs ir $0,8$ no cauruma diametra. Šo parādību sauc par *strūkļas kontrakciju* (savilkšanos).

Attiecību starp strūkļas šaurākās vietas šķērsriezuma laukumu S un cauruma šķērsriezumu S_c sauc par kontrakcijas koeficientu α_c .



2.24. att. Izteces strūkļas veidi.

«Plānām» sienām kontrakcijas koeficientu iegūst šādi:

$$\alpha_k = \frac{S}{S_c} = \frac{\pi (0,8)^2 d^2}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{0,64 d^2 \cdot 4}{d^2 \cdot 4} = 0,64. \quad (2.68)$$

Ja $l < 3d$, tad ir nepilnīga kontrakcija. Lietojot trauku ar $0,5d$ biezām sienām un izteces vietu noapaļojot (2.24. att. b), strūkļas kontrakcija ārpus trauka sienām nenotiek, un kontrakcijas koeficients $\alpha_k = 1$.

Lai noteiktu šķidruma tilpumu, kas iztek konstantā līmenī pa caurumiem tvirtnes sienās vai dībenā, vispirms jānosaka ātrums, ar kādu šķidrums tek. Ātruma noteikšanai sastāda Bernulli vienādojumu līmenim $0-0$ un $I-I$ (2.24. att.).

Izmantojot 2.24. attēlā redzamos apzīmējumus, Bernulli vienādojumu var uzrakstīt šādi:

$$\frac{w_0^2}{2g} + \frac{p_0}{\rho g} + H_{0-1} = \frac{w^2}{2g} + \frac{p_0}{\rho g} + h_z,$$

kur w_0 — šķidruma ātrums līmenī $I-I$, m/s; w — šķidruma ātrums līmenī $0-0$ strūkļas šaurākajā vietā, m/s; p_0 — apkārtējās vides spiediens, Pa; ρ — šķidruma blīvums, kg/m³; h_z — hidrauliskā augstuma zudums, pārvarot vietējās pretestības izplūdes vietā, $h_z = \zeta_{vp} \frac{w^2}{2g}$, m;

H_{0-1} — virs izplūdes vietas esošais šķidruma augstums; ja caurums atrodas trauka sienā, tad ievieto augstumu H' , m.

Ja no līmeņa $I-I$ līdz izplūdei ir nepārtraukta plūsma, tad

$$S_1 w_0 = S w \quad \text{un} \quad w_0 = \frac{S}{S_1} w,$$

kur S_1 — tvirtnes šķērsgrīzums, m²; S — strūkļas šķērsgrīzums šaurākajā vietā, m².

Ievietojot Bernulli vienādojumā ω_0 izteiksmi un aprēķinot ω , iegūst

$$\omega = \sqrt{\frac{2gH_{0.1}}{1 + \zeta_{vp} - \left(\frac{S}{S_1}\right)^2}}$$

Tā kā $\left(\frac{S}{S_1}\right)^2$ vērtība ir maza, to var neņemt vērā.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_{vp}}} \sqrt{2gH_{0.1}}$$

Izteiksmi $\frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_{vp}}}$ apzīmē ar φ un sauc par *ātruma koeficientu*.

Ātruma koeficients ir attiecība starp faktisko ātrumu un teorētisko ātrumu:

$$\omega = \varphi \sqrt{2gH_{0.1}}. \quad (2.69)$$

Ideāliem šķidrumiem $\zeta_{vp} = 0$, tad $\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+0}} = 1$. Tādēļ ideāla šķidruma iztecēšanas ātrums $\omega = \sqrt{2gH_{0.1}}$.

Teorētiskais ātrums, ar kādu šķidrums iztek pa caurumiem trauka dibenā, vienāds ar ātrumu, ko sasniedz ķermenis, brīvi kritot no augstuma $H_{0.1}$. Ātruma koeficienta skaitliskā vērtība $\varphi = 0.96 \dots 0.98$.

Ja spiediens virs šķidruma līmeņa nav vienāds ar spiedienu telpā, kurā izplūst šķidrums, tad šķidruma hidrostatiskā augstuma $H_{0.1}$ vietā jāievieto korigētais augstums H_1 , ko aprēķina pēc formulas

$$H_1 = H_{0.1} + \frac{p_0 - p}{\rho g}$$

kur p_0 — spiediens virs šķidruma līmeņa, Pa; p — spiediens vidē, kur izplūst šķidrums, Pa; ρ — šķidruma blīvums, kg/m^3 ; g — brīvās krišanas paātrinājums, m/s^2 .

Šķidruma iztece

$$Q = S\omega,$$

kur Q izteikts vienībā kubikmetri sekundē.

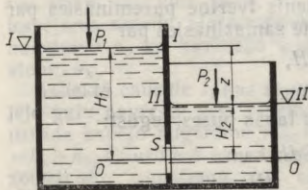
Ievietojot S un ω izteiksmes no vienādojumiem (2.68) un (2.69), iegūst

$$Q = \alpha_k S_c \varphi \sqrt{2gH_{0.1}}$$

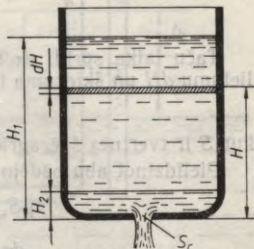
Reizinājumu $\alpha_k \varphi = \mu$ sauc par *izteces koeficientu*, tādēļ

$$Q = \mu S_c \sqrt{2gH_{0.1}}. \quad (2.70)$$

«Maziem» caurumiem un «plānām» sienām izteces koeficients $\mu = 0,60 \dots 0,62$.



2.25. att. Iztece pa applūdinātu caurumu.



2.26. att. Iztece mainīgā līmenī.

Skaitļi, kas doti attiecībā uz α_k , φ un μ , atbilst ūdenim. Viskoziem šķidrumiem izteces koeficients μ ir mazāks nekā ūdenim un atkarīgs no kinemātiskās viskozitātes.

Iztece pa applūdinātu caurumu. Ja šķidrums iztek no viena trauka otrā zem šķidrums līmeņa (2.25. att.), tad, sastādot Bernulli vienādojumu līmeņiem I-I un II-II, iegūst formulu šķidrums izteces noteikšanai:

$$Q = \mu S_c \sqrt{2gz_0}, \quad (2.71)$$

kur $z_0 = z + \frac{p_1 - p_2}{\rho g}$.

Aprēķinos parasti pieņem, ka izteces koeficienta μ skaitliskās vērtības ir tādas pašas kā neapplūdinātiem caurumiem. Formula (2.71) rāda, ka šķidrums iztece nav atkarīga no tā, kurā vietā zem līmeņa caurums atrodas.

Iztece pa uzgaļiem. Par uzgaļiem sauc īsas caurules, kas pievienotas izplūdes caurumam. Uzgaļu garums parasti 3...5 reizes lielāks par cauruma diametru.

Šķidrums tilpumu, kas laika vienībā iztek pa uzgaļiem, aprēķina pēc formulas (2.70)

$$Q = \mu S_c \sqrt{2gH_{0.1}}$$

Iztece pa caurumiem biezās sienās (ja sieniņas biezums 3...5 reizes lielāks par cauruma diametru) pakļauta tiem pašiem likumiem kā iztece pa cilindrisku uzgali.

Iztece mainīgā līmenī. Šis izteces veids novērojams, iztukšojot tvertnes, cisternas, baseinus utt.

Iztece mainīgā līmenī saistīta ar nepārtrauktu hidrauliskā augstuma maiņu. Tas rada nepārtrauktu ātruma un spiediena maiņu. Tādēļ šādu izteci uzskata par nestacionāru šķidrums plūsmu.

Izteses laika aprēķināšanai šo laiku sadala bezgalīgi mazos laika sprīžos $d\tau$. Laika sprīdī $d\tau$ iztek bezgalīgi mazs šķidrums tilpums dQ un līmenis mainās par bezgalīgi mazu lielumu dH . Tādēļ pieņem, ka laikā $d\tau$ iztece notiek konstantā šķidrums līmenī H (2.26. att.) un

iztecējušais šķidrums tilpums

$$dQ = \mu S_c \sqrt{2gH} d\tau.$$

Taču laika sprīdī $d\tau$ šķidrums līmenis tvertnē pazemināsies par lielumu dH un šķidrums tilpums tvertnē samazināsies par

$$dQ = -S dH,$$

kur S ir tvertnes šķērsriezuma laukums.

Pielīdzinot abu pēdējo vienādojumu labās puses, iegūst:

$$\mu S_c \sqrt{2gH} d\tau = -S dH \quad \text{un} \\ d\tau = -\frac{S}{\mu S_c \sqrt{2g}} \frac{dH}{\sqrt{H}}. \quad (2.72)$$

Izteses laiku, kas nepieciešams šķidrums līmeņa maiņai no H_1 līdz H_2 , nosaka, integrējot vienādojumu (2.72) robežās no H_1 līdz H_2 :

$$\int_0^\tau d\tau = -\frac{S}{\mu S_c \sqrt{2g}} \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{\sqrt{H}} = \frac{S}{\mu S_c \sqrt{2g}} \int_{H_2}^{H_1} \frac{dH}{\sqrt{H}}.$$

Pēc integrēšanas iegūst, ka

$$\tau = \frac{2S(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})}{\mu S_c \sqrt{2g}}, \quad (2.73)$$

kur τ — izteses laiks, s.

Ja tvertnes šķērsriezuma laukums S nav konstants, tad izteses laika aprēķināšanai jānosaka šķērsriezuma laukuma maiņa atkarībā no augstuma H , t. i., $S = f(H)$. Vienādojums (2.72) tad ir šāds:

$$d\tau = -\frac{f(H) dH}{\mu S_c \sqrt{2gH}}. \quad (2.74)$$

Ja tvertnei ir regulāra ģeometriskā forma, vienādojumu (2.74) integrēt samērā viegli. Citos gadījumos parasti lieto grafisko integrēšanas metodi.

Cisternas satura iztecēšanas laiku (neievērojot dibenu izliekumus) iespējams noteikt pēc šādas formulas:

$$\tau = \frac{2l}{\mu S_c \sqrt{2g}} \int_{H_1}^{H_2} \frac{\sqrt{DH - H^2}}{\sqrt{H}} dH.$$

Ja $H_2 = 0$ un $H_1 = D$, tad

$$\tau \approx 0,3 \frac{l\sqrt{D^3}}{\mu S_c},$$

kur l — cisternas garums, m; D — cisternas diametrs, m.

Pjezometriskais augstums un kinētiskais augstums, un to noteikšana. Ievietojot plūsmā divas stikla caurules (2.27. att.), iespējams noteikt pjezometrisko augstumu h_p un kinētisko augstumu h_k .

Izliektā caurule 1, kas ar vaļējo galu pavērsta pret plūsmu, uzrāda kopējo augstumu $h_{kop} = h_k + h_p$. Caurule 2 uzrāda pjezometrisko augstumu h_p . Līmeņu starpība abos pjezometros ir kinētiskais augstums h_k . Kopējais augstums h_{kop} caurulē 1 nav atkarīgs no tās stāvokļa maiņas vertikālā virzienā, jo kopējais augstums visos griezuma punktos ir vienāds. Līmenis caurulē 2 gan ir atkarīgs no tās iegremdes dziļuma, jo ātrums no caurules sienas uz centru pieaug. Pieaug kinētiskais augstums h_k , tādēļ samazinās h_p ($E_k + E_p = const$).

Precīzākai un ērtākai spiediena nolasišanai lieto Pito (Prantla, Bravē u. c.) pneimatisko cauruli 1 (2.28. att.), kas sastāv no divām caurulēm, kas ievietotas viena otrā. Centrālā caurule, kas ar vaļējo galu pavērsta pret plūsmu, uzņem kopējo spiedienu $p_k + p_p$. Ārējā caurule ar šķēlumiem 3 uzņem pjezometrisko spiedienu p_p . Pneimatiskai caurulei pievienots U veida manometrs 2, kurā esošais šķidrums (tas nedrīkst samaisīties ar plūstošo šķidrumu) veido līmeņu starpību h_m .

Aplūkojot šķidruma līdzsvaru līmenī 0-0, iegūst

$$\begin{aligned} p_k + p_p + \rho g(h + h_m) &= \\ p_p + \rho gh + \rho_m g h_m &\text{ jeb} \\ p_k &= h_m g (\rho_m - \rho). \end{aligned}$$

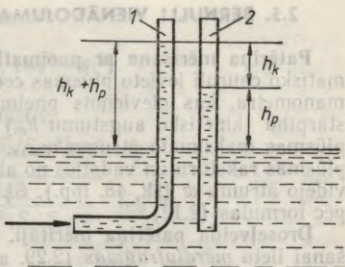
Kinētiskais spiediens $p_k = \rho \omega^2 / 2$, tad

$$\frac{\rho \omega^2}{2} = h_m g (\rho_m - \rho).$$

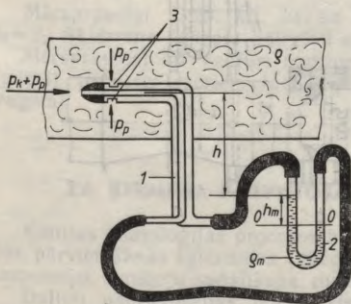
Pneimatiskās caurules atrašanās vietā plūsmas ātrums

$$\omega = \sqrt{2gh_m \frac{\rho_m - \rho}{\rho}}. \quad (2.75)$$

U veida manometru, kas uzrāda spiedienu starpību, sauc par **diferenciālo manometru**.



2.27. att. Kinētiskā augstuma noteikšana ar pjezometriskajām caurulēm.



2.28. att. Pito caurule plūsmas ātruma noteikšanai.

2.5. BERNULLI VIENĀDOJUMA PRAKTISKĀ IZMANTOŠANA

Patēriņa mērīšana ar pneimatisko cauruli (Pito cauruli). Pneimatisko cauruli ievieto plūsmas centrā (2.28. att.) un no diferenciālā manometra, kas pievienots pneimatiskajai caurulei, nolasa līmeņu starpību (kinētisko augstumu h_m) un pēc formulas (2.75) aprēķina plūsmas maksimālo ātrumu w_{max} . Nosaka Reynoldsa kritēriju. Zinot plūsmas raksturu un vadoties no attiecības w/w_{max} , aprēķina plūsmas vidējo ātrumu w (sk. 48. lpp.). Šķidrums (gāzes) patēriņu aprēķina pēc formulas (2.12).

Droseļveida patēriņa mērītāji. Šķidrums (gāzu) patēriņa mērīšanai lieto mērdiafragmas (2.29. att. a), mērsprauslas (2.29. att. b) un Venturi caurules (2.29. att. c). So patēriņu mērītāju pamatā ir plūsmas šķērsriezuma maiņa.

Pēc potenciālās enerģijas starpības pirms droselējošās iekārtas un aiz tās nosaka caurplūstošā šķidrums (gāzes) tilpumu. 2.29. attēlā a parādīta mērdiafragma, kas ievietota cauruļvadā plūsmas patēriņa mērīšanai. Vismazākais plūsmas diametrs $d_2 < d_0$ ir aiz mērdiafragmas šķēlumā II-II.

Šķēlumiem I-I un II-II var uzrakstīt Bernulli vienādojumu:

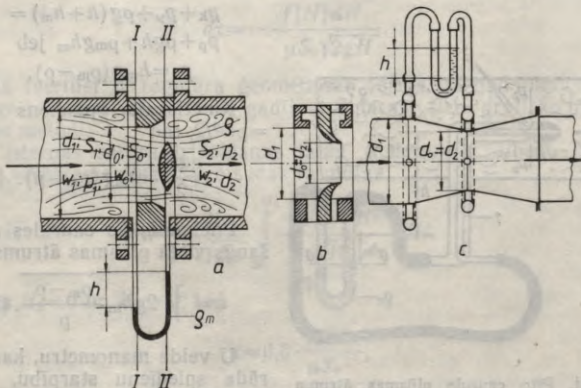
$$\overset{I-I}{\frac{w_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g}} = \overset{II-II}{\frac{w_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g}} \quad (2.76)$$

Ievērojot plūsmas nepārtrauktību, var rakstīt:

$$w_1 S_1 = w_2 S_2 = w_0 S_0.$$

Pieņemot, ka $S_2/S_0 = \epsilon$, tad $S_2 = \epsilon S_0$. No plūsmas nepārtrauktības vienādojuma iegūst

$$w_1 = S_2/S_1 w_2 = \epsilon S_0/S_1 w_2.$$



2.29. att. Droseļveida patēriņa mērītāji.

Vienādojumu (2.76) pārveido šādi:

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} = \frac{1}{2} (\omega_2^2 - \omega_1^2).$$

Pieņemot, ka $p_1 - p_2 = \Delta p$, var rakstīt:

$$\Delta p = \rho/2 [1 - \varepsilon^2 (S_0/S_1)^2] \omega_2^2 \quad \text{un}$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho [1 - \varepsilon^2 (S_0/S_1)^2]}} \quad \text{jeb}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \varepsilon^2 (d_0/d_1)^4}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}},$$

kur $\frac{1}{\sqrt{1 - \varepsilon^2 (d_0/d_1)^4}} = \mu$ ir *izteces koeficients*. Izteces koeficients $\mu = f(Re, d_0/d_1)$. Tā vērtību nosaka eksperimentāli (graduējot mēriekārtu ar noteiktu šķidruma tilpumu).

Caur mērdiafragmu izplūstošo šķidruma (gāzes) patēriņu Q aprēķina analogi kā šķidruma izplūdei pa caurumiem:

$$Q = \mu S_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}.$$

Lielumu Δp nolasa no diferenciālā manometra līmeņiem, t. i., $\Delta p = (\rho_m - \rho)gh$, kur Δp izteikts paskālos. Tad

$$Q = \mu S_0 \sqrt{2gh \frac{\rho_m - \rho}{\rho}}, \quad (2.77)$$

kur formulā esošie lielumi parādīti 2.29. attēlā *a*. Līmeņu starpības h vienība ir metrs.

Mērsprauslai (2.29. att. *b*) un Venturi caurulei (2.29. att. *c*) $d_0 = d_2$. Šķidruma (gāzes) patēriņu aprēķina tāpat kā mērdiafragmai.

Mērsprauslai un Venturi caurulei enerģijas zudumi, šķidrumam (gāzei) pārvarot mēriekārtas pretestību, ir mazāki nekā mērdiafragmai.

2.6. ĶERMEŅA PĀRVIETOŠANĀS ŠĶIDRUMĀ [GĀZĒ]

Ķīmijas tehnoloģijas procesos bieži sastopama cietu (šķidru) daļiņu pārvietošanās šķidrums (gāzēs), piemēram, putekļu atdalīšanā, suspensiju, emulsiju sadalīšanā, maisīšanā u. c.

Daļiņu pārvietošanās notiek sistēmās gāze—šķidrums, gāze—cieta viela, šķidrums—šķidrums, šķidrums—cieta viela. Daļiņām pārvietojoties šķidrā (gāzveida) vidē, tās pakļautas šīs vides pretestībai; tādēļ rodas noteikts enerģijas patēriņš.

Daļiņas kustība šķidrumā (gāzē), ja tās ātrums nav liels, saistīta tikai ar berzes spēka pārvarešanu. Tādos gadījumos ap daļiņu izveidojas robežkārtā.

Daļiņai krītot ātrāk, veidojas virpuļi. Līdz ar berzes spēkiem tad darbojas arī inerces spēki, un, ja kustības ātrums liels, tie ir no- teicošie.

Pirmo daļiņas krišanas veidu, kad nav virpuļu (2.30. att. a), sauc par *lamināru krišanu*. Laminārai krišanai Reynoldsa kritērijs $Re \leq 2$. Ja $Re = 5 \cdot 10^2 \dots 1,5 \cdot 10^5$, tad ir *turbulenta krišana* (2.30. att. b). Kustība, kad $Re = 2 \dots 5 \cdot 10^2$, uzskatāma par *pārejas stāvokli*. Daļiņām nogulsņējoties, Reynoldsa kritēriju aprēķina šādi:

$$Re = \frac{w_n d \rho}{\mu},$$

kur w_n — daļiņas nogulsņēšanās ātrums, m/s; d — daļiņas dia- metrs, m; ρ — vides blīvums, kg/m³; μ — vides dinamiskā viskozi- tāte, Pa·s.

Projektējot iekārtas šķidrumu (gāzu) nevienmērīgu sistēmu sa- dališanai smaguma spēka ietekmē (atputekļošanas kameras, nostā- dinātājus), jāzina daļiņu nogulsņēšanās ātrums.

Nogulsņēšanās ātrums. Ķermeņa krišana bezgaisa telpā ir vien- mērīgi paātrināta kustība, un tās ātrumu nosaka pēc formulas

$$w = g\tau,$$

kur w — krišanas ātrums, m/s; g — brīvās krišanas paātrinājums, m/s²; τ — krišanas ilgums, s; vai arī pēc formulas

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

kur H — krišanas augstums, m.

Gāzē (šķidrumā) tās pretestības dēļ krītošā ķermeņa ātrums par 0,05 ... 0,1% mazāks nekā ātrums bezgaisa telpā.

Ja krītošās daļiņas izmēri mazāki par 100 μm, tad krasi izpau- žas vides pretestība, un rezultātā daļiņa, kas vispirms krīt ar pieau- gošu ātrumu, pēc īsa brīža (sekundes tūkstošdaļas) sāk pārvietoties ar vienmērīgu ātrumu. Daļiņas ātrumu vienmērīgā krišanā sauc par *nogulsņēšanās ātrumu* un apzīmē ar w_n .

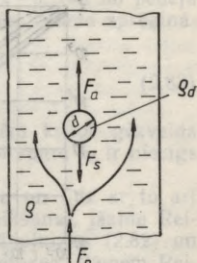
Ja daļiņas mazākas par 1 μm, tās pakļautas Brauna kustībai, ko rada vides molekulu triecieni pret daļiņu. Daļiņas, kas mazākas par 0,1 μm, smaguma spēka ietekmē nenogulsņējas un var atrasties lido- jošā stāvoklī ļoti ilgi.

Nogulsņēšanās ātrumu teorētiski var noteikt, aplūkojot lodveida daļiņas krišanu gāzē vai šķidrumā (2.31. att.). Uz krītošo daļiņu darbojas Arhimēda spēks $F_a = \left(\frac{m}{\rho_d}\right)\rho a$; smaguma spēks $F_s = ma$ un vides pretestības spēks, kas pēc Ņūtona formulas izsakāms šādi:

$F_p = \zeta S \frac{\rho w_n^2}{2}$, kur m — daļiņas masa; a — spēka F_s izraisītais daļi-



2.30. att. Plūsmas līnijas, kas veidojas, krītot lodveida ķermenim.



2.31. att. Uz krītošo daļiņu darbojošos spēku shēma.

ņas krišanas paātrinājums; ρ — vides blīvums; ρ_d — daļiņas blīvums; S — krītošās daļiņas šķērsriezuma laukums perpendikulāri krišanas virzienam; ζ — vides pretestības koeficients.

Dinamiskā līdzsvara gadījumā (Dalambēra princips) krītošai daļiņai rakstāms šāds vienādojums:

$$F_s - F_p - F_a = m \frac{dw}{d\tau}. \quad (2.78)$$

Sajā vienādojumā ievietojot attiecīgās spēku izteiksmes un dalot ar m , iegūst:

$$\frac{dw}{d\tau} = a - \frac{\rho a}{\rho_d} - \zeta S \frac{\rho \omega_n^2}{2m}. \quad (2.79)$$

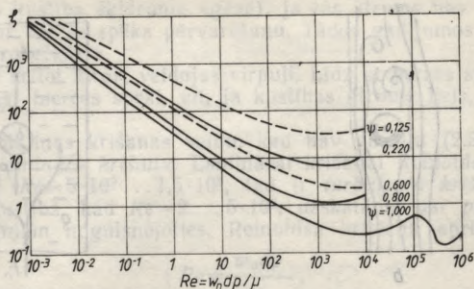
Ja daļiņa pārvietojas smaguma spēka ietekmē, tad $a = g$ un vienādojums (2.79) rakstāms šādi:

$$\frac{dw}{d\tau} = g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_d} \right) - \zeta S \frac{\rho \omega_n^2}{2m}. \quad (2.80)$$

Daļiņai pārvietojoties centrālās spēka laukā, $a = r\omega^2$, kur ω — leņķiskais ātrums, r — daļiņas ceļa rādiuss. Tad vienādojumu (2.79) var rakstīt šādi:

$$\frac{dw}{d\tau} = r\omega^2 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_d} \right) - \zeta S \frac{\rho \omega_n^2}{2m}. \quad (2.81)$$

Ja nogulsnešanās ātrums, daļiņai pārvietojoties smaguma spēka ietekmē, ir nemainīgs, t. i., $dw/d\tau = 0$, un ja daļiņa ir lodveida, tad



2.32. att. Sakarība $\zeta = f(Re, \psi)$, daļiņām nogulsņējoties smaguma spēka ietekmē.

$m = (\pi d^3/6) \rho_d$ un $S = \pi d^2/4$. Vienādojums (2.80) tad pārveidojams šādi:

$$g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_d}\right) - \zeta \frac{3\rho\omega_n^2}{4d\rho_d} = 0 \quad \text{un}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{4(\rho_d - \rho)gd}{3\rho\zeta}} = 3,617 \sqrt{\frac{d(\rho_d - \rho)}{\rho\zeta}}. \quad (2.82)$$

Vienādojums (2.82) lietojams daļiņas laminārās, pārejas un turbulētās krišanas režimos. Attiecīgi mainās tikai vides pretestības koeficienta ζ vērtības, kas atkarībā no formas faktora ψ^1 un Reynolds skaitļa nosakāmas no 2.32. attēla.

Daļiņas *laminārajā* krišanā vides pretestības spēks F_p izsakāms arī ar Stoksa vienādojumu

$$F_p = 3\pi d\mu\omega_n.$$

Tad vienādojums (2.78) rakstāms šādi:

$$m \frac{d\omega}{d\tau} = mg - \left(\frac{m}{\rho_d}\right) \rho g - 3\pi d\mu\omega_n.$$

Lodveida daļiņām $m = \frac{\pi d^3}{6} \rho_d$, tātad

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \frac{(\rho_d - \rho)g}{\rho_d} - \frac{18\mu\omega_n}{d^2\rho_d}$$

¹ Formas faktors ψ ir attiecība starp lodes virsmu S_l , kurai ir tāds pats tilpums V_d kā daļiņai, un daļiņas virsmu S_d (lodveida daļiņām $\psi=1$); $\psi = S_l/S_d = 4,878 V_d^{2/3}/S_d$.

Ja nogulsšanās ātrums ir nemainīgs, $dw/d\tau=0$, tad no pēdējā vienādojuma iegūst Stoksa formulu nogulsšanās ātruma aprēķināšanai:

$$\omega_n = \frac{d^2(\rho_d - \rho)g}{18\mu} \quad (2.83)$$

Stoksa formula lietojama, ja $Re < 2$. Daļiņām krītot gāzveida vidē, gāzes blīvums ρ salīdzinājumā ar daļiņas blīvumu ρ_d ir niecīgs un to var neievērot.

Lai izraudzītos daļiņas nogulsšanās režīmu un līdz ar to arī attiecīgo formulu nogulsšanās ātruma ω_n noteikšanai, jāzina Reynolds kritērijs, kurā arī ietilpst ω_n . Tādēļ vienādojumus (2.82) un (2.83) atrisina pēc pakāpeniskās tuvināšanas metodes. Pieņem Reynolds skaitļa vērtību, pēc tam aprēķina ω_n . Tad pārbauda, vai Reynolds skaitlis atrodas pieņemtās robežās. Ja ir atšķirības, tad atkārt aprēķinus, līdz iegūst tādu Re vērtību, kas sakrīt ar iepriekš pieņemto.

Nogulsšanās ātruma aprēķināšanai lietojama arī Ļaščenko metode, pēc kuras vienādojumā (2.82) ω_n aizvieto ar $\omega_n = Re\mu/(d\rho)$ (no Reynolds kritērija). Tad iegūst šādu vienādojumu:

$$\zeta Re^2 = \frac{4}{3} \frac{d^3(\rho_d - \rho)g}{\mu^2}$$

Izteiksme $\frac{d^3(\rho_d - \rho)g}{\mu^2} = Ar$ ir *Arhimēda kritērijs*, tādēļ

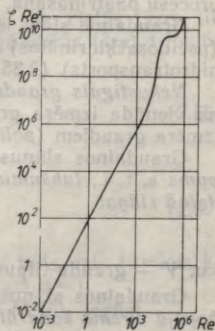
$$\zeta Re^2 = \frac{4}{3} Ar$$

Ja ir zināms Arhimēda kritērijs (kritērijā ietilpst fizikālie lielumi, kas projektēšanas gaitā ir zināmi), no Ļaščenko diagrammas (2.33. att.) pēc ζRe^2 vērtības nosaka Reynolds kritēriju un aprēķina ω_n . Pretestības koeficients atkarīgs no daļiņas krišanas režīma: laminārai krišanai $\zeta = 24/Re$; turbulentai krišanai $\zeta = 0,44$; pārejas režīmam $\zeta = 18,5/Re^{0,6}$.

Turbulentai krišanai, kad $\zeta = 0,44$, vienādojums (2.82) pārveidojams šādi:

$$\omega_n = 5,46 \sqrt{\frac{d(\rho_d - \rho)}{\rho}}$$

Ja Arhimēda kritērijs ir zināms, Reynolds kritēriju var aprēķināt arī šādi: ja $Ar < 36$, tad $Re = Ar/18$; ja $36 < Ar < 84 \cdot 10^3$, tad $Re = (Ar/13,9)^{1/1,4}$; ja $Ar > 84 \cdot 10^3$, tad $Re = 1,71\sqrt{Ar}$. Pēc tam kad noteikta Re skaitliskā vērtība, aprēķina $\omega_n = Re\mu/(d\rho)$.



2.33. att. Ļaščenko diagramma.

Pēc Ļaščenko metodes gūst labus rezultātus, ja daļiņas ir lodveida. Jebkuras citas formas daļiņām iegūtais teorētiskais nogulsnešanās ātrums jāpareizina ar formas faktoru ψ . Ja $Ar > 84 \cdot 10^3$, tad noapaļotām daļiņām $\psi = 0,77$, šķautņainām $\psi = 0,66$, garenām $\psi = 0,55$ un zvirņveida $\psi = 0,43$.

Nosakot nogulsnešanās ātrumu jebkuras formas daļiņām, kritēriju diametra vietā ievieto ekvivalento diametru, kas iegūstams šādi:

$$d_{\text{ekv}} = 1,24 \sqrt[3]{\frac{m}{\rho_d}}$$

kur m — daļiņas masa, kg.

Nogulsnešanās ātrumu var aprēķināt arī, lietojot Ļaščenko kritēriju

$$Ly = Re^3 / Ar = \frac{\omega_n^3 \rho^2}{\mu (\rho_d - \rho) g^2}. \quad (2.84)$$

Ļaščenko kritērija skaitlisko vērtību nosaka pēc 2.34. attēla atkarībā no Arhimēda kritērija.

Reālos nostādināšanas apstākļos, kad vienlaikus ar dažādu ātrumu nogulsnejas dažāda lieluma un veida daļiņas un arī videi piemīt zināma kustība, ar praksei pietiekamu precizitāti var pieņemt, ka *faktiskais nogulsnešanās ātrums* $\omega'_n = 0,5\omega_n$.

Šķidruma (gāzes) plūsma cauri nekustīgam graudainam (porainam) slānim. Ķīmijas tehnoloģijas procesos bieži sastopama šķidruma (gāzes) plūsma cauri graudainam (porainam) slānim. Graudainus (porainus) slāņus veido nogulsnes, sasmalcināts (līdz zināmam rupjumam) apstrādājamais materiāls, katalizators vai speciāli aparātā iepildīti dažādas formas ķermeņi (pildījums). Graudainā slāņa hidrodinamikas pētījumiem ir liela nozīme heterogēnu sistēmu procesu paātrināšanā.

Graudainie slāņi iedalāmi: *nekustīgos* (2.35. att. a), *suspendētos* (pseudosašķidrinātos) (2.35. att. b) un *plūstošos* (aerotransports un hidrotransports) (2.35. att. c).

Nekustīgais graudainais slānis. Graudainais slānis var sastāvēt no vienāda izmēra graudiem (*monodisperss slānis*) vai no dažāda izmēra graudiem (*polidisperss slānis*).

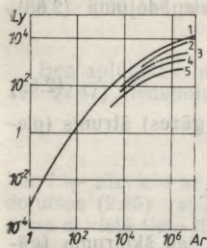
Graudainos slāņus raksturo *porainība* jeb *īpatnējais brīvais tilpums* ε , t. i., *tukšumu tilpums kubikmetros, kas atrodas 1 m³ graudainā slāņa:*

$$1 - \varepsilon = V,$$

kur V — graudu tilpums 1 m³ graudainā slāņa, m³.

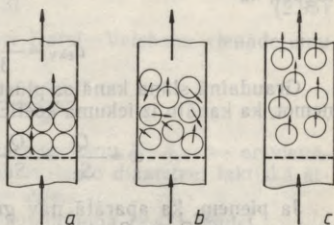
Graudainos slāņus raksturo arī *īpatnējā virsma a*, t. i., *graudu kopējā virsma kvadrātmetros 1 m³ graudainā slāņa.*

Ja aparātā ar šķērsriezumu S kvadrātmetru graudainais slānis uzpildīts H metru augstumā, tad graudainā slāņa tilpums ir SH kubikmetru.



2.34. att. Ļaščenko kritērijs $Ly = f(Ar)$:

- 1 — lodveida daļiņām,
2 — noapaļotām daļiņām,
3 — šķautņainām daļiņām,
4 — adatveida daļiņām,
5 — zvīņveida daļiņām.



2.35. att. Graudainā slāņa dažādie stāvokļi.

Kopējais tukšumu (poru) tilpums (pieņemot, ka paši graudi nav poraini) slānim ir $SH\varepsilon$, bet to kopējā virsma SHa .

Ja zināms kopējais tukšumu tilpums un pieņem, ka kanālu garums Ha , kur α — kanālu izliekuma koeficients, tad kanālu kopējais šķērsriezums $S_k = SH\varepsilon / (Ha) = S\varepsilon / \alpha$ un tas izteikts kvadrātmetros.

Kanālu kopējais saslāpīnātais perimetrs $\kappa = SHa / (Ha) = Sa / \alpha$.

Kanālu ekvivalentais diametrs (sk. vienādojumu (2.23)) izsakāms šādi:

$$d_{\text{ekv}} = \frac{4S_k}{\kappa} = \frac{4S\varepsilon\alpha}{\alpha Sa} = \frac{4\varepsilon}{a}. \quad (2.85)$$

Ekvivalento diametru iespējams noteikt arī pēc cietās fāzes tilpuma 1 m^3 graudainā slāņa, t. i., $1 - \varepsilon$. Ja šajā cietās fāzes tilpumā ir n graudu, tad viena grauda tilpums ir

$$\frac{1 - \varepsilon}{n} = \frac{\pi d^3}{6}. \quad (2.86)$$

Viena grauda virsma

$$\frac{a}{n} = \frac{\pi d^2}{\psi} \quad (2.87)$$

kur d — ekvivalentas lodes diametrs, kurai ir tāds pats tilpums kā graudam; ψ — formas faktors; lodveida graudam $\psi = 1$.

Vienādojumu (2.87) dalot ar vienādojumu (2.86), iegūst

$$a = \frac{6(1 - \varepsilon)}{\psi d}. \quad (2.88)$$

Vienādojumā (2.85) ievietojot a izteiksmi no vienādojuma (2.88), iegūst, ka

$$d_{ekv} = \frac{2\varepsilon\psi d}{3(1-\varepsilon)}. \quad (2.89)$$

Graudainā slāņa kanālos plūstošā šķidrums (gāzes) ātrums (pieņemot, ka kanālu izliekuma koeficients $\alpha=1$)

$$\omega = \frac{Q}{S_k} = \frac{Q}{S\varepsilon} \quad \text{vai} \quad Q = \omega S\varepsilon.$$

Ja pieņem, ka aparātā nav graudainā slāņa, tad šķidrums (gāzes) caurtece $Q = \omega_0 S$, kur ω_0 — plūsmas *fiktīvais ātrums*; S — aparāta šķērsriezuma laukums.

Izsakot plūsmas faktisko ātrumu graudainā slānī ar fiktīvo ātrumu, iegūst sakarību

$$\omega_0 S = \omega S\varepsilon \quad \text{vai} \quad \omega = \frac{\omega_0}{\varepsilon}. \quad (2.90)$$

Graudaina nekustīga slāņa aprēķinos lieto modificētos Reinoldsa kritērijus, kurus iegūst, parastajā Reinoldsa kritērijā ω un d vietā liekot fiktīvo ātrumu un ekvivalento diametru:

$$Re = \frac{\omega d \rho}{\mu} = \frac{4\rho\omega_0}{a\mu} = \frac{4W}{a\mu}$$

kur $W = \rho\omega_0$ — masas ātrums, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

$$Re = \frac{\omega d \rho}{\mu} = \frac{2\omega_0 d \rho}{3\mu} \frac{\psi}{1-\varepsilon}. \quad (2.91)$$

Skaitli $2/3$ dažreiz atmet un raksta $\frac{\omega_0 d \rho}{\mu} = Re_0$, tad

$$Re = \frac{\omega_0 d \rho}{\mu} \frac{\psi}{1-\varepsilon} = Re_0 \frac{\psi}{1-\varepsilon}. \quad (2.92)$$

Graudainā slāņa pretestība atkarīga no plūsmas rakstura un graudu virsmas raupjuma. Šī slāņa pretestības aprēķināšanai ir vairākas metodes.

Laminārai plūsmai, ja $Re < 60$, var lietot šādu vispārinātu kritēriālu vienādojumu:

$$La = 200\Gamma, \quad (2.93)$$

kur *Lagranža kritērijs* $La = Re Eu = \Delta p d / (\mu \omega)$.

Lagranža kritērijs raksturo attiecību starp spiediena spēku un iekšējo berzi sistēmā. Ģeometriskais simplekss $\Gamma = H/d_{ekv}$ — kur H — slāņa augstums; d_{ekv} — kanālu ekvivalentais diametrs.

Turbulentam režīmam, ja $Re = 60 \dots 7000$,

$$Eu = 7,6 Re^{-0,2}\Gamma. \quad (2.94)$$

Ja $Re > 7000$, tad pretestību neietekmē Reinoldsa kritērijs,

$$Eu = 1,3\Gamma. \quad (2.95)$$

Bez aplūkotām metodēm lieto arī Darsī—Veisbaha vienādojumu (sk. (2.47) vienādojumu):

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d_{ekv}} \frac{\rho \omega^2}{2},$$

kur l — aizvieta ar graudainā slāņa augstumu H ; d_{ekv} — ar vienādojumos (2.85) vai (2.89) izteikto ekvivalento diametru; faktiskā ātruma ω vietā lieto fiktīvo ātrumu $\omega = \omega_0/\epsilon$.

Izdarot attiecīgās izmaiņas, no vienādojuma (2.47) iegūst

$$\Delta p = \lambda \frac{aH\rho\omega_0^2}{8\epsilon^3} \quad \text{vai} \quad (2.96)$$

$$\Delta p = \lambda \frac{3(1-\epsilon)H\rho\omega_0^2}{4\psi\epsilon^2 d}. \quad (2.97)$$

Koeficients λ raksturo ne tikai berzi starp vidi un slāņa graudiem, kā tas ir caurulēs, bet arī vietējās pretestības, kas rodas, videi plūstot cauri slāņa kanāliem.

Koeficienta λ noteikšanai ieteiktas daudzas metodes. Pamatā ir sakarība, ka $\lambda = f(Re)$, kur Reinoldsa skaitlis aprēķināms pēc vienādojumiem (2.90) un (2.91).

Visiem plūsmas režīmiem lietojama šāda sakarība

$$\lambda = \frac{133}{Re} + 2,34. \quad (2.98)$$

Ja $Re < 1$, tad $\lambda = 133/Re$, ja $Re > 1000$, tad $\lambda \approx 2,34$ neatkarīgi no Reinoldsa skaitļa.

2.7. SUSPENDĒTA GRAUDAINĀ SLĀŅA HIDRODINĀMIKA

Daudzos ķīmijas tehnoloģijas procesos jāiegūst laba saskare starp cieto fāzi un gāzveida (šķidro) fāzi, piemēram, katalīzes un sorbcijas procesos, kā arī apdedzinot iežus, žāvējot, dedzinot kurināmo u. c. Šādos procesos ļoti svarīgi, lai cietā fāze būtu smalka. Jo smalkāks materiāls, jo lielāka kopējā saskares virsma starp fāzēm, līdz ar to process uz virsmas noris daudz intensīvāk.

Saberot sasmalcinātu materiālu slānī un laižot tam cauri gāzi (šķidrumu) ar nelielu ātrumu, nekādas pārvērtības nenotiek. Gāze filtrējas cauri graudainā slāņa kanāliem (nekustīgs slānis). Sasniedzot noteiktu plūsmas ātrumu, kad plūstošās vides spiediens kļūst lielāks par slāņa spiedienu, cieto daļiņu aizņemtais tilpums palielinās un tās sāk intensīvi cirkulēt.

Šādu daļiņu izkliedēšanu sauc par *suspendēšanu*, literatūrā šī parādība pazīstama arī ar nosaukumu *pseudosašķidrināšana* jeb *fluidizācija*.

Ja sasniegts zināms gāzes (šķidruma) ātrums, iespējams iegūt augstu cietās fāzes koncentrāciju, kurā ir intensīva daļiņu cirkulācija. Tas nodrošina vienmērīgu temperatūru visā slāņa tilpumā. Tam liela nozīme katalīzes procesos, ķīmiskā reakcijā starp cieto fāzi un gāzveida (šķidro) fāzi, kā arī siltuma apmaiņas un masas apmaiņas procesu intensificēšanā.

Suspendētam graudainam slānim, tāpat kā šķidrumiem, izveidojas noteikts līmenis. Slānis it kā verd, atgādinot šķidrumu ar mazu viskozitāti. Slānim ir vienmērīgs cieto daļiņu sadalījums pa aparāta tilpumu, nav vērojami burbuļi. Tas ir *verdošais slānis* (2.36. att. a).

Palielinot caurplūstošās gāzes ātrumu, veidojas *burbuļi*, kas, nokļūstot slāņa virspusē, saplīst un izšķaida daļiņas uz visām pusēm. Burbuļi veicina intensīvu slāņa jaukšanu (2.36. att. b). Neliela diametra aparātos burbuļi, kas rodas tieši virs režģa, saplūst kopā, veidojot gāzes virzuli (spilvenu), kas pārvieto uz augšu daļiņas. Šādu slāņa suspendēšanu sauc par *virzuļveida suspendēšanu* (2.36. att. c).

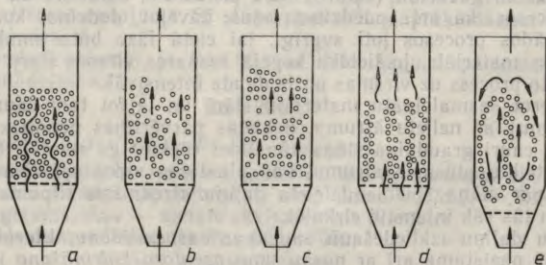
Ja daļiņas sīkas vai tām piemīt tieksme veidot aglomerātus, tad var rasties slāņa caurrāvumi, un gāze pārvietojas pa izveidotiem *kānāliem* (2.36. att. d), nesaskaroties ar visām daļiņām.

Ja režģa laukums ievērojami mazāks par aparāta šķērsriezumu (konisks aparāts), tad, ievadot gāzi, tā ar daļiņām pārvietojas pa slāņa centru uz augšu un daļiņas tiek izsviestas no slāņa centra uz perifēriju. Tālāk daļiņas gar aparāta malām plūst atpakaļ uz režģi (2.36. att. e). Tā veidojas *fontanējošais slānis*.

Suspendēta slāņa hidrauliskā pretestība. Graudainā slāņa hidrauliskā pretestība atkarīga no gāzes (šķidruma) plūsmas ātruma. Atliekot uz ordinātas slāņa pretestību Δp_s , bet uz abscisas plūsmas fiktīvo ātrumu w_0 , iegūst 2.37. attēlā redzamo likni 1. Līdz punktam B slāņa pretestība Δp_s aprēķināma pēc vienādojumiem (2.93), (2.94), (2.95), (2.96) un (2.97). Posmā OB ir nekustīgs graudainais slānis,

Aiz punkta B sākas suspendētais graudainais slānis, kura hidrauliskā pretestība Δp_s paliek nemainīga un ir vienāda ar $\Delta p_s = mg/S$. Graudu masu var izteikt šādi:

$$m = (1 - \epsilon) (\rho_d - \rho) HS,$$



2.36. att. Suspendētā graudainā slāņa dažādie veidi.

kur m — graudu masa, kg; ε — slāņa porainība, m^3/m^3 ; ρ_d — daļiņu blīvums, kg/m^3 ; ρ — plūstošās vides blīvums, kg/m^3 ; g — brīvās krišanas paātrinājums, m/s^2 ; H — graudainā slāņa augstums, m; S — aparāta šķērssgriezuma laukums, m^2 .

Tad hidrauliskā pretestība, izteikta paskālos, ir šāda:

$$\Delta p_s = (1 - \varepsilon) (\rho_d - \rho) g H. \quad (2.99)$$

Gāzes (šķidrums) plūsmas fiktīvo ātrumu (punktā B), kad rodas suspendētais slānis, sauc par *pirmo kritisko ātrumu* $\omega_0 = \omega'_k$. Pirms punkta B (2.37. att. 1) spiediens nedaudz pieaug (punkts A); tas saistīts ar daļiņu atraušanos citai no citas.

Suspendētam slānim pretestība nemainās ($\Delta p_s = const$), līdz plūsmas ātrums sasniedz *otro kritisko ātrumu* ω''_k (punkts C 2.37. att. 1). Palielinot plūstošās vides fiktīvo ātrumu virs ω''_k , suspendētais slānis beidz eksistēt un graudi tiek transportēti laukā no aparāta. Sākas pneimotoports (hidrotransports). Slāņa porainība ε tuvojas vienam.

Polidispersām daļiņām pāreja no nekustīga slāņa uz suspendētu slāni nenotiek tik krasi kā monodispersām daļiņām (2.37. att. 2). Vispirms suspendē sīkās daļiņas, pēc tam rupjās. Graudainā slāņa augstums H_0 līdz pirmajam kritiskajam ātrumam paliek nemainīgs (2.37. att. 3), pēc tam tas palielinās.

Kritisko ātrumu aprēķināšana. Pirmā kritiskā ātruma ω'_k aprēķināšanas formulas iegūšanai vienādojumu (2.97) apvieno ar vienādojumiem (2.98) un (2.91), tad

$$\Delta p_s = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2 \mu H \omega_0}{\varepsilon^3 \psi^2 d^2} + 1,75 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3 \psi} H \frac{\rho \omega_0^2}{d}, \quad (2.100)$$

kur μ — vides viskozitāte, Pa·s; ω_0 — plūstošās vides fiktīvais ātrums punktā B (2.37. att. 1), $\omega_0 = \omega'_k$.

Pielīdzinot vienādojumu (2.100) vienādojumam (2.99), iegūst

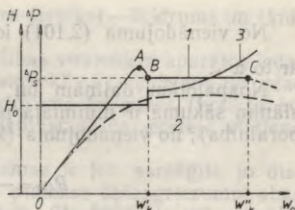
$$150 \frac{(1 - \varepsilon) \mu \omega'_k}{\varepsilon^3 \psi^2 d^2} + 1,75 / \varepsilon^3 \psi \frac{\rho (\omega'_k)^2}{d} = (\rho_d - \rho) g.$$

Pareizinot abas puses ar $d^3 / (\rho v^2)$ un μ izsakot ar $\nu \rho$, iegūst

$$150 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3 \psi^2} \frac{d \omega'_k}{\nu} + \frac{1,75}{\varepsilon^3 \psi} \frac{d^2 (\omega'_k)^2}{\nu^2} = \frac{d^3 (\rho_d - \rho) g}{\rho \nu^2}$$

kur $\frac{d^3 (\rho_d - \rho) g}{\rho \nu^2} = Ar$; $\frac{d \omega'_k}{\nu} = Re_k$, tādēļ

$$150 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3 \psi^2} Re_k + \frac{1,75}{\varepsilon^3 \psi} Re_k^2 = Ar. \quad (2.101)$$



2.37. att. Graudainā slāņa hidrauliskā pretestība Δp un slāņa augstums H .

No vienādojuma (2.101) iespējams aprēķināt $Re_k = \frac{d\omega'_k}{v}$ un līdz ar to ω'_k .

Noapaļotām daļiņām un lodveida daļiņām $\psi=1$, suspendētām slānim sākumā ir minimālā porainība, t. i., $\varepsilon=0,4$ (nekustīga slāņa porainība); no vienādojuma (2.101) iegūst

$$Re_k = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}}.$$

Pirmā kritiskā ātruma ω'_k noteikšanai ir vēl daudzas citas formulas. Viena no plaši lietojamām formulām ir šāda:

$$Re_k = \frac{Ar\varepsilon^{4,75}}{18 + 0,61\sqrt{Ar\varepsilon^{4,75}}}$$

No šīs formulas iespējams iegūt formulu suspendētā slāņa porainības noteikšanai

$$\varepsilon = [(18Re_k + 0,36Re_k^2)/Ar]^{0,21}.$$

Suspendētā slāņa otrā kritiskā ātruma ω''_k aprēķināšanai lietojamās formulas, kuras dotas nogulsnešanās ātruma noteikšanai (sk. vienādojumus (2.82), (2.83) un (2.84)).

2.8. DIVFĀŽU PLŪSMU GĀZE (TVAIKS) — ŠKIDRUMS UN ŠKIDRUMS—ŠKIDRUMS HIDRODINAMIKA

Daudzi ķīmijas tehnoloģijas procesi, piemēram, sorbcija, rektifikācija, ekstrakcija, ķīmiskie procesi un citi notiek divfāžu plūsmās, kur vienu fāzi veido dispersas daļiņas, bet otra fāze ir dispersijas vide. Dispersā fāze var būt cietu daļiņu, pilieņu, burbuļu, strūklku veidā, kā arī plānā slānī.

Divfāžu plūsmu klasifikācija. Divfāžu plūsmas iedalās divos veidos.

Pirmā veida divfāžu plūsmas ir tādas, kur dispersijas vide ir šķidrums vai gāze, bet dispersā fāze ir cietās daļiņas, kas plūsmā praktiski nemaina formu un masu.

Otrā veida divfāžu plūsmas ir gāze (tvaiks) un šķidrums, kas veido gan dispersijas vidi, gan dispersās daļiņas (burbuļus, pilienus). Šī veida plūsmās dispersās daļiņas var mainīt savu formu un masu, piemēram, smalcinoties pilieniem (burbuļiem) vai tiem saplūstot (koalescējot).

Ķīmijas tehnoloģijā sastopas ar šādām divfāžu plūsmām: šķidrums—šķidrums (šķidrumu ekstrakcija); gāze (tvaiks)—šķidrums (absorbicija, ietvaice, pārtvaice, kondensācija); gāze vai šķidrums—cieta viela (cietu vielu ekstrakcija, adsorbicija, hidrotransports un pneimotransports, suspendēti slāņi).

Sajā nodaļā aplūkosim sistēmas gāze (tvaiks)—šķidrums un šķidrums—šķidrums.

Sīs sistēmas pēc atsevišķo fāžu kustības virzieniem aparātos iedalās šādi: 1) šķidrums atrodas miera stāvoklī; 2) šķidrums un gāze plūst savstarpēji perpendikulāri; 3) šķidruma un gāzes (tvaika) ātruma vektori vērsti vienā virzienā (līdzplūsma) vai pretējā virzienā (pretplūsma).

Matemātiski raksturot divfāžu plūsmas ir ļoti sarežģīti, jo dispersā fāze ir nevienmērīgi sadalīta pa plūsmas šķērsriezumu, abas fāzes pārvietojas ar dažādiem ātrumiem. Struktūra ir vēl sarežģītāka, ja dispersajām daļiņām ir dažādi izmēri un blīvumi. Inženieraprēķinos divfāžu sistēmām lieto eksperimentu rezultātā iegūtas formulas.

Divfāžu plūsmas iedalās *vertikālās un horizontālās plūsmās*.

Gāzei (tvaikam) plūstot *vertikālās caurulēs* kopā ar šķidrumu, novērojami šādi režīmi: 1) *burbuļveida*; 2) *korķveida*; 3) *gredzenveida* un 4) *emulsijas režīms*.

Burbuļveida režīms rodas, ja ievada nelielus gāzes (tvaika) tilpumus. Gāzes fāzes ātrums atbilst burbuļu ātrumam. Pieaugot gāzes tilpumam, atsevišķie burbuļi saplūst un veido periodiski plūstošus gāzes korķus. To diametrs vienāds ar caurules diametru, bet garums var būt vairākas reizes lielāks. Turpinot gāzes tilpuma palielināšanu, starp gāzes korķiem izzūd šķērssienas un tie saplūst, veidojot gāzes stabu. Šāds gāzes stabs plūst pa caurules centru, bet pa caurules perifēriju šķidrums plūst gredzena veidā.

Ja ir lieli gāzes ātrumi, tad šķidrā fāze disperģējas (notiek inversija un gāze kļūst par dispersijas fāzi).

Divfāžu plūsmas raksturo ar Frūda kritēriju Fr un gāzes tilpumaturu φ . Gāzes tilpumaturu izsaka maisījuma tilpuma daļu, kuru aizņem gāze, $\varphi = V_g / (V_g + V_s)$, kur V_g — gāzes tilpums; V_s — šķidruma tilpums.

$$\varphi = f(Fr_m),$$

kur Fr_m — Frūda kritērijs maisījumam. $Fr_m = \frac{\omega_m^2}{gd}$, kur ω_m — gāzes—šķidruma maisījuma ātrums, m/s; g — brīvās krišanas paātrinājums, m/s²; d — caurules diametrs, m.

Atsevišķo režīmu eksistēšanas robežas:

- 1) burbuļveida režīms, ja $\varphi = 0,05 Fr_m^{0,2}$;
- 2) korķveida režīms, ja $\varphi = (0,12 \dots 0,5) Fr_m^{0,15 \dots 0,1}$;
- 3) gredzenveida režīms, ja $\varphi = (0,65 \dots 0,85) Fr_m^{0,05 \dots 0,02}$.

Divfāžu sistēmām plūstot pa *horizontālām caurulēm*, ja gāzes (vieglās fāzes) tilpumi ir mazi, gāze plūst gar caurules augšējo sienu. Pieaugot gāzes tilpumam, gari gāzes burbuļi aizņem ievērojamu daļu no caurules šķērsriezuma un tikai caurules apakšā plūst šķidrums. Turpinot gāzes (vieglās fāzes) tilpuma palielināšanu, abas fāzes sadalās vienmērīgi pa caurules šķērsriezumu.

Vienkāršākā metode *spiediena zuduma aprēķināšanai* divfāžu plūsmai izsakāma ar divfāžu koeficientu Φ , tad

$$(\Delta p/l) = \Phi_s^2 (\Delta p/l)_s = \Phi_g^2 (\Delta p/l)_g, \quad (2.102)$$

kur $(\Delta p/l)$, $(\Delta p/l)_s$ un $(\Delta p/l)_g$ — īpatnējais spiediena zudums caurulē (uz 1 m caurules garuma), ja pa to plūst gāzes—šķidrums maisījums, tikai šķidrums vai tikai gāze ar tādu pašu ātrumu, spiedienu un temperatūru kā maisījumam; Φ_s un Φ_g — koeficienti, kas rāda, par cik hidrauliskā pretestība divfāžu plūsmā lielāka nekā vienfāzes šķidrums plūsmā (Φ_s) vai vienfāzes gāzes plūsmā (Φ_g).

2.38. attēlā parādīta sakarība starp koeficientiem Φ_s , Φ_g un spiediena zudumu reizinājumu $[(\Delta p/l)_s/(\Delta p/l)_g]^{0.5}$.

Pilienu stabilitāte gāzes plūsmā atkarīga no *Vēbera kritērija*, $We = \rho_g \omega^2 d_p / \sigma$, kur ρ_g — gāzes fāzes blīvums, kg/m^3 ; ω_p — pilienu relatīvais ātrums, m/s ; d_p — pilienu diametrs, m ; σ — šķidrās fāzes virsmas spraigums, N/m .

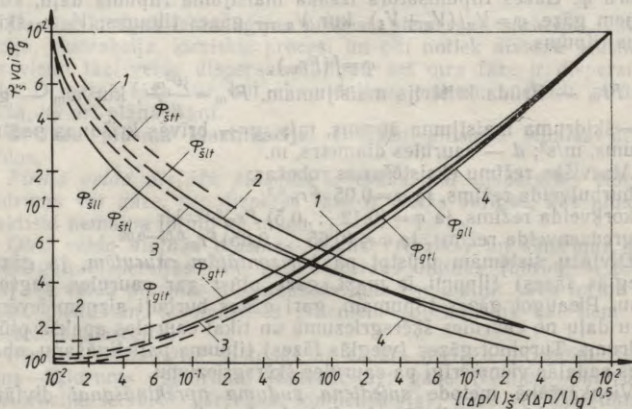
Ja $We > 12$, tad pilieni smalcinās. Ja Reinoldsa kritērijs $Re = d_{\text{max}} \omega_p \rho / \mu > 1000$, tad stabilo pilienu maksimālais diametrs aprēķināms šādi: $d_{\text{max}} = \mu / [(\omega_p \rho_s) / 4 \sigma / [g(\rho_s - \rho_g)]]$.

Divfāžu plūsmā šķidrums—šķidrums īpatnējo spiediena zudumu $(\Delta p/l)$ iespējams aprēķināt analogiski kā gāzes—šķidrums maisījumiem pēc vienādojuma

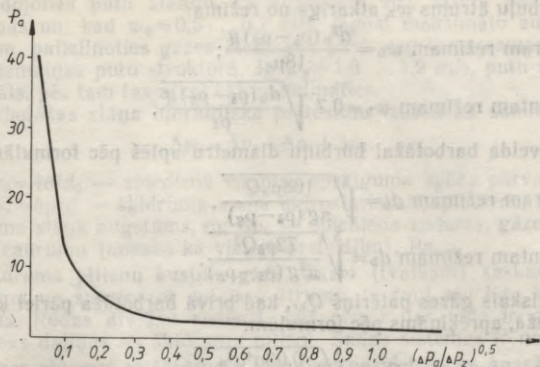
$$(\Delta p/l) = \Phi_a (\Delta p/l)_a,$$

kur $(\Delta p/l)_a$ — īpatnējais spiediena zudums, plūstot komponentam, kuram ir lielāka viskozitāte, ar tādu ražīgumu, kāds ir abu komponentu maisījumam.

Koeficients Φ_a atkarīgs no attiecības $(\Delta p_a / \Delta p_z)$, kur Δp_a , Δp_z — spiediena zudumi, plūstot tikai ļoti viskozam un mazviskozam komponentam. Koeficienta Φ_a vērtības iegūstamas pēc eksperimentālās līknes, kas dota 2.39. attēlā.



2.38. att. Koeficienti Φ_s un $\Phi_g = f[(\Delta p/l)_s/(\Delta p/l)_g]^{0.5}$.



2.39. att. Koeficienti $\Phi_a = f(\Delta p_a / \Delta p_2)^{0,5}$.

Gāzes plūsma caur šķidruma slāni. Gāzes burbuļošānu caur šķidruma slāni sauc par *barbotāžu*. Barbotāžu lieto, ja nepieciešams panākt kontaktu starp šķidrumu un gāzi (tvaiku). Barbotāža ievērojami intensificē siltuma apmaiņas un masas apmaiņas procesus, veicina atputekļošanu. Barbotāža aparātos bieži notiek uz caurumotiem šķīvjiem (sietveida šķīvjiem, sk. 452. lpp.).

Barbotāžai raksturīgi trīs galvenie darba režīmi: burbuļi, strūklas un putu režīms.

Burbuļu režīms novērojams, ja gāzes (tvaika) tilpumi ir nelieli. Ja gāze caur šķidruma slāni plūst atsevišķu burbuļu veidā, tad to sauc par *brīvo barbotāžu*. Ja burbuļu diametrs mazāks par 1 mm, tad to diametru var aprēķināt pēc formulas

$$d_b = \sqrt[3]{\frac{6d_0\sigma}{g(\rho_s - \rho_g)}}, \quad (2.103)$$

kur d_b — burbuļu diametrs, m; d_0 — šķīvja cauruma diametrs, m; σ — caurplūstošās gāzes (tvaika) virsmas spraigums, N/m.

Burbuļu skaits, kuri veidojas 1 sekundē, ir

$$n = 6Q / (\pi d_b^3), \quad (2.104)$$

kur Q — gāzes patēriņš, m³/s.

Palielinoties caurplūstošās gāzes tilpumam, burbuļu skaits palielinās, un tie plūst ķēditēs cits aiz cita. Šādu barbotāžu sauc par *ķēžveida barbotāžu*.

Burbuļu pārvietošanās režīms var būt laminārs $Re_b < 9$ vai turbulentus $Re_b > 9$.

Reinoldsda kritēriju Re_b aprēķina šādi: $Re_b = w_b d_b \rho_s / \mu_s$.

Burbuļu ātrums w_b atkarīgs no režīma:

$$\text{lamināram režīmam } w_b = \frac{d_b^2 (\rho_s - \rho_g) g}{18\mu_s};$$

$$\text{turbulentam režīmam } w_b = 0,7 \sqrt{\frac{d_b (\rho_s - \rho_g) g}{\rho_s}}.$$

Ķēžveida barbotāžai burbuļu diametru aplēs pēc formulām:

$$\text{lamināram režīmam } d_b = \sqrt[4]{\frac{108\mu_s Q}{\pi g (\rho_s - \rho_g)}},$$

$$\text{turbulentam režīmam } d_b = \sqrt[5]{\frac{72\rho_s Q^2}{\pi^2 g (\rho_s - \rho_g)}}.$$

Kritiskais gāzes patēriņš Q_{kr} , kad brīvā barbotāža pāriet ķēžveida barbotāžā, aprēķināms pēc formulām:

$$\text{lamināram režīmam } Q_{kr} = \sqrt[3]{\frac{0,03\sigma^4 d_0^4}{\mu_s^3 (\rho_s - \rho_g) g}},$$

$$\text{turbulentam režīmam } Q_{kr} = \sqrt[6]{\frac{20\sigma^5 d_0^5}{\rho_s^3 (\rho_s - \rho_g)^2 g^2}}.$$

Vēl turpinot gāzes ātruma palielināšanu, izveidojas *strūklas režīms*. Gāzes plūsma, izplūstot no barbotiera cauruma, veido formas ziņā nemainīgu strūklu. Strūklas augstums nav liels, ražošanā lietojamiem barbotieriem — līdz 40 mm. Ja šķidrums slānis ir plāns, strūkļa izraujas cauri slānim, ja slānis biezāks, strūkļa dalās pilienuos.

Masas apmaiņas un siltuma apmaiņas procesu intensificēšanā liela nozīme ir gāzes—šķidrums plūsmas turbulizēšanai. Tās rezultātā palielinās kontakts starp fāzēm.

Norisinoties intensīvai barbotāžai, uz barbotāžas aparātu šķīvjēm (sk. 453. lpp.) novērojamas trīs šķidrums joslas. Apakšējā josla — *barbotāžas josla* ir šķidrums josla, caur kuru barbotē gāze. Virs tās atrodas *putu josla*, bet trešā ir *šļakatu* (pilienu) *josla*.

Ja šķidrums atrodas uz caurumota šķīvjā, kas veicina vienmērīgu gāzes fāzes sadalījumu pa aparāta šķērsriezumu, tad, palielinot gāzes ātrumu ($w_g \approx 0,5$ m/s), novērojama gāzes barbotāža. Ja gāzes ātrums $w_g > 0,5$ m/s, rodas putas, kas tādā gadījumā, ja gāzes ātrums ir 1...3 m/s, veido kustīgas putas. Kustīgas putas rodas tad, kad izūd barbotāžas josla. Viss šķidrums tad pārvēršas šūnveidīgās kustīgās putās, un rodas spēcīgi turbulizēta gāzes—šķidrums sistēma.

Palielinoties barbotāžas intensitātei, pieaug gāzes kinētiskā enerģija. Ja $w_g > 3,5$ m/s, notiek intensīva pilienu līdzrašana ar aizplūstošo gāzi. Pilienu rašanās process kļūst līdzīgs šķidrums disperģēšanai lielā gāzes ātrumā.

Ja turpina palielināt gāzes ātrumu, gāzes fāze aizrauj līdzīgu smago fāzi un notiek tā saucamā aparāta «aizrišanās». Šķidrā fāze tiek izviesta no aparāta.

Veidojoties putu slānim, tā augstums virs šķīvja pakāpeniski palielinās un, kad $w_g \approx 0,5 \dots 0,7$ m/s, iegūst maksimālo augstumu. Pēc tam, palielinoties gāzes ātrumam, putu augstums samazinās, jo rodas izmaiņas putu struktūrā. Ja $w_g \approx 1,0 \dots 1,2$ m/s, putu slānis ir minimāls, pēc tam tas atkal sāk palielināties.

Barbotāžas slāņa hidrostatisko pretestību izsaka kā summu:

$$\Delta p_b = \Delta p_0 + \Delta p_s + \Delta p_c, \quad (2.105)$$

kur $\Delta p_0 = 4\sigma/d_0$ — spiediens virsmas spraiguma spēka pārvarēšanai, Pa; $\Delta p_s = h\rho_s g$ — šķidrums staba hidrostatiskais spiediens, Pa; h — šķidrums slāņa augstums, m; Δp_c — spiediena zudums, gāzei izplūstot pa caurumu (nosaka kā vietējo pretestību), Pa.

Šķidrums pilienu kustība gāzē. Gāzei (tvaikam) saskaroties ar šķidrumu un sasniedzot noteiktu ātrumu, tā rauj sev līdz šķidrums pilienus. Rodas divfāžu sistēma, kur dispersijas vide ir gāze, bet dispersās daļiņas — šķidrums pilieni. Šādas sistēmas ir nestabilas.

Gāzes plūsmā ar šķidrums pilieniem pārvietojoties aparātā (caurulē), pilieni no plūsmas izdalās uz aparāta (caurules) sienām. Augstos aparātos, ja gāzes (tvaika) ātrumi ir nelieli, iespējama pilnīga lielo pilienu separācija.

Pilienu līdzraušānai un to separācijai ir liela nozīme daudzos ķīmijas tehnoloģijas aparātos, piemēram, ietvaicētajos, rektifikācijas un absorbcijas kolonnās u. c.

Gāzei (tvaikam) barbotējot caur šķidrums slāni, uz virsmas izplūstošā burbuļa apvalka saraušana un mazu pilienu veidošanās saistīta ar ievērojamu fāžu saskares virsmas zudumu. Pārplīsušā burbuļa virsma vairākkārt pārsniedz radušos pilienu virsmu.

Pilienu veidošanās barbotāžas laikā notiek ne tikai uz gāzes (tvaika) kinētiskās enerģijas rēķina, bet arī uz atbrīvojušās virsmas enerģijas rēķina, kura radusies, pārplīstot burbulim. Mērenas intensitātes barbotāžā, kas ķīmijas tehnoloģijā raksturīga daudziem aparātiem, tvaika (gāzes) kinētiskā enerģija, kura nokļūst līdz virsmai, ir samērā maza. Galvenā nozīme kopējā enerģijas bilancē ir burbuļa apvalka virsmas enerģijai.

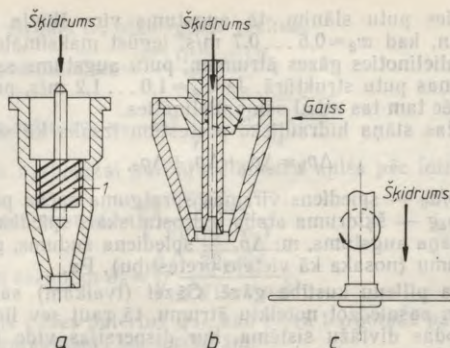
Par minēto viegli pārliecināties, pieņemot, ka cauri ūdens slānim parastā spiedienā 100 °C temperatūrā barbotē ūdens tvaiks (ūdens tvaika blīvums $\rho = 0,579$ kg/m³; virsmas spraigums $\sigma = 58,9 \cdot 10^{-3}$ N/m) un veido burbuļus, kuru diametrs $d = 2$ mm un kuri caur šķidrums slāni pārvietojas ar ātrumu $w_g = 1$ m/s. Tad burbuļa kinētiskā enerģija:

$$E_k = \frac{\pi d^3}{6} \frac{\rho w_g^2}{2} = \frac{3,14 \cdot (2 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 579 \cdot 10^{-1}}{12} \approx 1,2 \cdot 10^{-9} \text{ J},$$

bet burbuļa virsmas enerģija:

$$E_v = \pi d^2 \sigma = 3,14 \cdot (2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 58,9 \cdot 10^{-3} \approx 7,4 \cdot 10^{-7} \text{ J}.$$

Pilieni pēc izveidošanās pārvietojas ar lielu sākuma ātrumu, tādēļ daži no tiem nekustīgajā gāzes vidē var «palēkties» ievērojamā



240. att. Izsmidzinātāju shēmas.

augstumā (līdz 2 m). No virsmas atrautie pilieni var būt gan lieli (to diametrs 1...2 mm), gan ļoti sīki (to diametrs — daži mikroni).

Gāzes (tvaika) līdzrautie pilieni (šlakatas), aizplūzdami no šķidruma virsmas, zaudē ātrumu, jo, pārvietojoties vertikāli uz augšu, tie pakļauti vides pretestībai.

Ja pilienu lidināšanās ātrums $\omega_l > \omega_g$, tad pilienis, zaudējis sākuma enerģiju, sāk krist ar ātrumu $\omega_l - \omega_g$, t. i., ja vides pretestības spēks kopā ar piliena smaguma spēku ir lielāks par gāzes (tvaika) spiediena spēku, tad pilienis pēc noteikta augstuma sasniegšanas separējas. Ja $\omega_l \gg \omega_g$, tad piliena pacelšanās augstums nav atkarīgs no ω_g un pilieni tikai «palecas» virs šķidruma slāņa līmeņa.

Šķidrumu izsmidzināšanas metodes. Šķidrumu izsmidzināšana (disperģēšana) gāzes (šķidruma) vidē rūpniecībā jāizdara bieži, piemēram, žāvējot šķidru materiālu, ekstrahējot šķidrumus, sadedzinot šķidro kurināmo, mitrinot gaisu kondicionēšanas iekārtās u. c.

Siem mērķiem lietojamus izsmidzinātājus var iedalīt trīs grupās: *mehāniskie izsmidzinātāji, pneimatiskie izsmidzinātāji un centrālās izsmidzinātāji.*

Mehāniskos izsmidzinātājos šķidrumu pievada ar lielu spiedienu (daži MPa) un pirms izvadišanas praktiski nekustīgā gāzes (gaisa) vidē šķidruma strūklu ievada īpašā virpuļotājā, kur tā iegūst kustību pa spirāli. Ātri plūstošā, spirālveidīgā šķidruma strūkļa, saskaroties ar mierā esošo gāzi, inerces spēku, virsmas spraiguma un viskozitātes ietekmē sadalās dažāda izmēra un veida pilienu. Pilienu izmēri atkarīgi no šķidruma spiediena, izplūdes diametra, sprauslas konstrukcijas, šķidruma fizikālajām īpašībām (galvenokārt no viskozitātes).

240 attēlā *a* redzams izsmidzinātājs ar spirālveida virpuļotāju *1*, kuru plaši lieto tīru, mazviskozu šķidrumu izsmidzināšanai. Šādos izsmidzinātājos šķidrums, izplūdzams no sprauslas, veido plašu šķidruma miglas konusu. Pilienu diametrs 50...10 nm.

Sprauslas ražīgums šķidrumiem ar ūdens konsistenci

$$Q_m = 2,8 \cdot 10^{-4} k d p^n, \quad (2.106)$$

kur Q_m — šķidruma caurtece, kg/s; d — izplūdnes diametrs, mm; p — šķidruma spiediens, Pa; k, n — koeficienti, kas atkarīgi no sprauslas veida; 2.40. attēlā a parādītajam izsmidzinātajam $k = 30 \dots 50, n = 0,53$.

Pneimatiskos izsmidzinātājus (2.40. att. b) iedala 1) *augstspiediena izsmidzinātājos* (līdz 0,3...0,4 MPa) ar nelielu īpatnējo gāzes patēriņu (0,3...1,0 kg gāzes/kg šķidruma) un 2) *zemspiediena izsmidzinātājos* (zemāk par 0,01 MPa) ar lielu īpatnējo gāzes patēriņu (4...10 kg gāzes/kg šķidruma).

Pneimatiskie izsmidzinātāji darbināmi ar saspiestu gaisu vai tvaiku. Strūklai, izplūstot no sprauslas izplūdnes, ir izteikts viļņu raksturs. Viļņi pakāpeniski apdziest, strūklai attālinoties no izplūdnes. Pēc šo viļņu apdzišanas izveidojas nenoturīgi viļņi, kuru amplitūda nepārtraukti pieaug, strūklai virzoties uz priekšu, un kuri rezultātā izraisa strūklas sadalīšanos pilienos.

Centrbēdzes izsmidzinātāji ir ātri rotējošs disks ($D = 100 \dots 500$ mm), uz kuru virza izsmidzināmo šķidrumu (2.40 att. c). Biežāk lieto diskus ar diametru 150...200 mm. Diskus iedala *gludos diskos* (rupjām suspensijām), *diskos ar radiāliem spārnēm, gropēm un sprauslām* (smalkām suspensijām un viendabīgiem šķidrumiem). Spārnī un gropes novērš šķidruma slīdēšanu pa diska virsmu.

Pilienu veidošanās mehānisms centrēdzes izsmidzinātājos atkarīgs no šķidruma plūsmas. Ja šķidruma tilpumi nav lieli, šķidrums pārtek pāri diska malai un centrēdzes spēka ietekmē sadalās pilienos. Palielinoties šķidruma padevei, rodas strūklas, kas zināmā attālumā no diska sadalās pilienos. Ja turpina palielināt šķidruma padevi, atsevišķās strūklas saplūst, veidojot blīvu plēvi, kas noteiktā attālumā no diska sadalās pilienos. Ja diska apgriezieni ir mazi, iegūst neviendabīgu miglu. Minimālais diska lineārais ātrums $u = 60$ m/s. Diska apgriezieni ir $67 \dots 333$ s⁻¹.

Centrbēdzes izsmidzinātāju darbināšanai nepieciešamā jauda summējas no šķidruma izsmidzināšanai, berzes pārvarēšanai un gaisa cirkulācijas nodrošināšanai nepieciešamajām jaudām.

Šķidruma izsmidzināšanai (kinētiskās enerģijas piešķiršanai šķidrumsam) patērēto jaudu aprēķina pēc formulas:

$$N_1 = 5,05 \cdot 10^{-4} Q_m (u^2 + w_a^2 + 2uw_a \cos \alpha), \quad (2.107)$$

kur N_1 — izsmidzināšanā patērētā jauda, kW; w_a — šķidruma absolūtais ātrums, tam noplūstot no diska, m/s; u — diska lineārais ātrums, m/s; α — leņķis starp u un w_a vektoriem; Q_m — šķidruma caurtece, kg/s.

Jauda berzes pārvarēšanai diskam pret gaisu:

$$N_2 = 1,15 (1 + k_d) \cdot 10^{-3} \rho_g u^3 D, \quad (2.108)$$

kur N_2 — berzes pārvarēšanai nepieciešamā jauda, kW; k_d — koeficients, $k_d = 1,5 z (h_d/D)$; z — gropju skaits uz diska; h_d — gropju augstums, m; D — diska diametrs, m; ρ_g — gaisa blīvums, kg/m³.

Gaisa cirkulācijai patērētā jauda

$$N_3 = 60 \cdot 10^{-3} \rho_g u^3 S_g, \quad (2.109)$$

kur N_3 — gaisa cirkulācijai patērētā jauda, kW; S_g — visu gropju summārais šķērsriezuma laukums, m^2 .

Kopējā patērētā jauda centrēdzes izsmidzinātājam

$$N = N_1 + N_2 + N_3.$$

Centrēdzes izsmidzināšanai salīdzinājumā ar mehānisko un pneimatisko izsmidzināšanu ir tā priekšrocība, ka iespējams izsmidzināt biezas suspensijas un pastveida masas.

Putu un emulsiju raksturojums. Putas rodas, pārsātinot šķidrums ar gāzi (tvaiku) (rekifikācijā, absorbcijā, ietvaicē, fermentācijā u. c.). Gāze rodas procesa rezultātā vai arī tiek īpaši vadīta cauri šķidruma slānim (barbotāžas aparātos, putu atputekļotājos u. c.).

Putu rašanās pamatā ir daudzi faktori — fizikālķīmiskie, tehnoloģiskie u. c.

Šķidrums raksturojami ar to *putošanas spēju*, t. i., ar putu tilpumu vai putu slāņa augstumu virs dzidrā šķidruma, kurš rodas no noteikta šķidruma tilpuma, attiecīgi veicot putošanu.

Gāzei (tvaikam) plūstot cauri šķidrums, kas nesatur virsmasaktīvas vielas, veidojas *nestabilas putas*. Tās sabrūk, tiklīdz pārtrauc gāzes padevi.

Stabilas putas veido šķidrums, kas satur virsmasaktīvas vielas (olbaltumvielas, taukskābju, alkilsulfāta, alkilsulfonāta, alkilarilsulfonāta sāļus u. c.).

Putu veidošanos un to stabilitāti ietekmē vides pH un virsmas spraigums. Putas raksturo *putu stabilitāte*, *gāzes saturs putās*, *īpatnējā virsma*.

Putu stabilitāte ir spēja saglabāt kopējo tilpumu, dispersitāti un šķidruma noplūdi. Putu stabilitātes mērs ir laiks, kurā eksistē noteikts putu tilpums.

Gāzes saturs putās ϵ ir gāzes tilpuma daļa attiecība pret kopējo putu tilpumu. Šo lielumu iegūst, nosakot, cik paliek dzidrā šķidruma V_s pēc noteikta putu tilpuma V_p sabrukšanas.

Gāzes tilpums putās $V_g = V_p - V_s$.

Gāzes saturs putās $\epsilon = V_g/V_p$, ko izsaka kubikmetros gāzes (gaisa) $l\ m^3$ putu.

Putu īpatnējā virsma a ir virsmas laukums kvadrātmetros $l\ m^3$ putu.

Ja $l\ m^3$ putu ir n pūslīšu ar vidējo diametru d_{vid} , tad $a = n\pi d_{vid}^2$. Sādā tilpumā gāzes saturs putās $\epsilon = \frac{n\pi d_{vid}^3}{6}$.

No šiem abiem vienādojumiem izsaka n . Tad iegūst vienādojumu

$$\frac{a}{\pi d_{vid}^2} = \frac{6\epsilon}{\pi d_{vid}^3} \quad \text{vai} \quad d_{vid} = \frac{6\epsilon}{a}.$$

2.9. SLĀŅAINA ŠĶIDRUMA PLŪSMA

Kīmijas tehnoloģijas aparātos slāņaina šķidruma plūsma pa cietu virsmu veidojas gāzes (tvaika) klātbūtnē.

Šķidrumam plūstot plānā slānī pa cietu virsmu, ja gāzes fāzes ātrums attiecībā pret šķidruma ātrumu ir mazs un tas nerada kaut cik ievērojamu bīdes spriegumu ar šķidruma virsmu, tad šāda sistēma uzskatāma par vienfāzes sistēmu. Ja minētais nosacījums netiek ievērots, tad sistēma ir divfāžu sistēma.

Vienfāzes slāņaina šķidruma plūsma. Šādu šķidruma pārvietošanos no hidrodinamiskā viedokļa raksturo Reinoldsa kritērijs

$$Re_k = \frac{\omega_{vid} d_{ekv} \rho}{\mu}, \quad (2.110)$$

kur Re_k — Reinoldsa kritērijs slāņainai šķidruma plūsmai; ω_{vid} — vidējais šķidruma slāņa ātrums, m/s; d_{ekv} — šķidruma slāņa ekvivalentais diametrs, m; ρ — šķidruma blīvums, kg/m³; μ — šķidruma dinamiskais viskozitātes koeficients, Pa·s.

Šķidruma slāņa ekvivalentais diametrs (sk. vienādojumu (2.23))

$$d_{ekv} = \frac{4S}{\varkappa} = \frac{4\delta\varkappa}{\varkappa} = 4\delta,$$

kur δ — šķidruma slāņa biezums, m; \varkappa — saslapinātais perimetrs, m.

Pa vertikālu virsmu plūstošā šķidruma patēriņš, ja saslapinātais perimetrs \varkappa :

$$Q_m = \varkappa \delta \omega_{vid} \rho,$$

kur Q_m — šķidruma caurtece, kg/s.

Attiecība $Q_m/\varkappa = \Gamma$ parāda šķidruma masu sekundē, kura attiecīnāta uz saslapinātā perimetra garuma vienību un kuru sauc par *lineāro aprasināšanas blīvumu*. To izsaka vienībā kg/(m·s).

No pēdējā vienādojuma

$$\delta = \frac{\Gamma}{\omega_{vid} \rho}. \quad (2.111)$$

Reinoldsa kritēriju slāņainai šķidruma plūsmai iegūst, ievietojot vienādojumā (2.110) $d_{ekv} = 4\delta$ un $\omega_{vid} = \Gamma/(\rho\delta)$ izteiksmes:

$$Re_k = 4\Gamma/\mu.$$

Pēc Reinoldsa skaitļa vērtības izšķir šādus trīs plūsmas veidus: 1) *lamināru plūsmu ar gludu fāžu* (šķidrumu) *saskares virsmu* (ja $Re_k < 30$); 2) *lamināru plūsmu ar viļņotu fāžu saskares virsmu* (ja $Re_k \approx 30 \dots 1600$); 3) *turbulentu plūsmu* (ja $Re_k > 1600$).

Stacionāru slāņainu šķidruma plūsmu raksturojošos lielumus iegūst, integrējot Navjē—Stoksa vienādojumu kopā ar plūsmas nepārtrauktības vienādojumu un pieņemot, ka uz cietās virsmas ātrums $\omega_x = 0$. Tad šķidruma ātrums uz slāņa ārējās virsmas

$$\omega_k = 1/2\rho g/(\mu\delta^2 \sin \varphi), \quad (2.112)$$

bet vidējais ātrums plūsmā

$$\omega_{\text{vid}} = 1/3\rho g / (\mu\delta^2 \sin \varphi), \quad (2.113)$$

kur φ — virsmas slīpuma leņķis pret horizontu.

No vienādojumiem (2.112) un (2.113) iegūst, ka $\omega_k/\omega_{\text{vid}} = 1,5$, t. i., *šķidruma ātrums uz fāžu saskares virsmas 1,5 reizes lielāks par vidējo ātrumu plūstošā šķidruma slāni.*

No vienādojumiem (2.111) un (2.113)

$$\omega_{\text{vid}} = \sqrt[3]{\frac{\Gamma^2 g}{3\mu\rho} \sin \varphi} \quad \text{un} \quad \delta = \sqrt[3]{\frac{3\Gamma\mu}{g\rho^2 \sin \varphi}}$$

Vertikālām sienām $\varphi = 90^\circ$. Tad pēdējiem vienādojumiem, aizvietojot lielumu Γ ar Re_k , iegūst $\omega_{\text{vid}} = 0,59 (\mu\rho)^{1/3} Re_k^{2/3}$ un $\delta = 0,43 (\mu^2/\rho^2)^{1/3} \cdot Re_k^{1/3}$.

Divfāžu slāņaina šķidruma plūsma. Divfāžu slāņaina šķidruma plūsma veidojas tad, ja uz plūstošo fāžu saskares virsmas darbojas berzes spēki. Plūstošā šķidruma slānis un gāze var veidot *līdzplūsmu* un *pretplūsmu*.

Līdzplūsmā (uz leju virzīta līdzplūsma) gāze rauj līdzī šķidruma slāni, palielina tā vidējo ātrumu un samazina slāņa biezumu. Līdzplūsmā hidrauliskā pretestība ir mazāka nekā pretplūsmā. Stabila uz leju plūstošā šķidruma un gāzes plūsma pastāv, ja gāzes ātrums nepārsniedz 15...30 m/s. Lielāki ātrumi rada pilienu līdzraušānu.

Pretplūsmā, gāzei virzoties no apakšas uz augšu, gāze bremzē šķidruma plūsmu. Tas rada šķidruma slāņa biezuma palielināšanos. Ja gāzes ātrums ir 5...10 m/s, rodas tā saucamā «aizrišanās», kas izraisa šķidruma uzkrāšanos aparātā un strauju hidrauliskās pretestības pieaugšanu. Palielinot gāzes ātrumu, šķidrumi sāk plūst uz augšu (*kāpjoša slāņaina plūsma*); hidrauliskā pretestība zināmu laiku samazinās, pēc tam atkal pieaug. Ja gāzes ātrums 15...40 m/s, šķidrumi atdalās no virsmas un gāze to pilienveidā rauj līdzī.

Slāņaina divfāžu plūsma šķidrumi—gāze ķīmiskās rūpniecības aparātos bieži eksistē caurulēs. Šķidruma slānis plūst pa caurules iekšējo virsmu plāna gredzena veidā, bet gāze pārvietojas pa centrālo daļu.

Ja palielina gāzes ātrumu, stabilā slāņainā plūsma pārveidojas. Uz fāžu saskares virsmas rodas viļņi. Gāzes plūsma no viļņu galotnēm norauj šķidrumu, un gredzenveida plūsma pārvēršas dispersā gredzenveida plūsmā. Caurules centrālajā daļā plūst ne tikai gāze, bet arī disperģētie šķidruma pilieni.

Slāņainas plūsmas stabilitātes augšējā robeža ir tad, kad viss šķidrumi disperģējas gāzes fāzē. Atmosfēras spiedienā sistēmām gaiss—ūdens šī robeža atbilst gaisa ātrumam aptuveni 20 m/s.

Pieskares spriegums uz fāžu saskares virsmām izsakāms ar sakarību, ko lieto vienfāzes plūsmām:

$$\tau_g = \lambda_g \frac{\rho_g \omega_r^2}{2}$$

kur τ_g — pieskares spiegunums uz fāžu saskares virsmas, J/m; ω_r — gāzes relatīvais ātrums, m/s; ρ_g — gāzes blīvums, kg/m³; λ_g — berzes koeficients.

Gāzes relatīvais ātrums ir starpība starp gāzes un šķidrums ātrumu uz fāžu saskares virsmas. Ja gāzes ātrums ievērojami pārsniedz šķidrums ātrumu, tad šķidrums ātrumu var ignorēt un uzskatīt, ka tas vienāds ar gāzes ātrumu. Tad

$$\tau_g = \lambda_g \frac{\omega_r^2 \rho_g}{2\varphi^2},$$

kur $\omega_r = Q_m / (S \rho_g)$ — fiktīvais gāzes ātrums (attiecināts uz visu kanāla šķērsgriezumu S , m²), m/s; Q_m — gāzes caurtece, kg/s; φ — šķērsgriezuma daļa, ko aizņem gāze.

Spiediena gradients, kuru nosaka gāzes berze gar šķidrums virsmu, ir

$$-(dp/dz)_g = \kappa \tau_g / S.$$

Apaļa šķērsgriezuma kanāliem $\kappa = \pi d_g$; $S = \pi d_g^2 / 4$ un

$$-(dp/dz)_g = 4 \tau_g / d_g,$$

kur d_g — caurules centrālā gāzes kanāla diametrs, kas ar caurules diametru d saistīts šādi: $d_g = d \sqrt{\varphi}$. Tad

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_g = \frac{4 \tau_g}{d \sqrt{\varphi}} = \frac{2 \lambda_g \omega_r^2 \rho_g}{d \varphi^{2.5}}$$

Berzes koeficients λ_g atkarīgs no vairākiem faktoriem, vispirms no fāzes atdalosās virsmas stāvokļa. Ja fāžu saskares virsma ir gluda, tad enerģiju, kas jāpievada gāzes fāzei, patērē tikai berzes pārvarēšanai. Ja ātrumi ir lieli, rodas papildu enerģijas zudumi viļņu veidošanai uz virsmas, šķidrums kustības ātruma palielināšanai (ja ir uz leju plūstoša līdzplūsma) vai smaguma spēka pretdarbībai. Sakarā ar to spiediena gradients, plūstot divfāžu sistēmai ($\varphi < 1$), vienmēr ir lielāks nekā tad, ja caurulē ir tikai gāzes plūsma ($\varphi = 1$).

Berzes koeficienta λ_g aprēķināšanai lieto empīriskas formulas, piemēram,

$$\lambda_g = 0,005 [1 + 75(1 - \varphi)], \quad (2.114)$$

kur 0,005 — berzes koeficients, gāzei plūstot neaprasinātā caurulē.

Uz leju plūstošai līdzplūsmai spiediena zudumu gāzes fāzei Δp aprēķina pēc formulas

$$\Delta p = 4 \lambda \frac{l}{d} \frac{\omega_r^2 \rho_g}{2}, \quad (2.115)$$

kur Δp — spiediena zudums, Pa; ω_r — gāzes relatīvais ātrums, m/s; l — sienas (caurules) augstums, m; λ — berzes koeficients, kuru var aprēķināt pēc Blaziusa formulas:

$$\lambda = 0,079 / \sqrt[4]{Re_g},$$

kur $Re_g = \omega_r d_g \rho_g / \mu_g$.

2.10. PLŪSMU STRUKTŪRAS UN TO UZTURĒŠANĀS LAIKS APARĀTOS

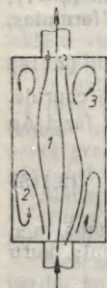
Lai projektētu efektīvas iekārtas (reaktorus, kolonnveida aparātus u. c.), modelētu (pārietu no laboratorijas modeļiem uz rūpniecības agregātiem) un procesus optimizētu, jāzina hidrodinamiskā aina aparātā.

Šķidrums (gāzu) plūsmu ātrumi aparāta tilpumā sadalās nevienmērīgi. Tā rezultātā visu šķidrums daļiņu uzturēšanās laiks aparātā nav vienāds. Piemēram, šķidrums daļiņas (2.41. att.), kas virzās pa trajektoriju 1, aparātā atradīsies īsāku laiku nekā daļiņas, kas cirkulē virzienā 2 vai «mirušajā» zonā 3. Otrs piemērs ir plūsmas ātruma nevienmērīga sadalīšanās pa šķēsgriezumu. Daļiņas, kas virzās caurules centrā, apdzēn daļiņas, kas pārvietojas tuvāk caurules sienām.

Turbulentā plūsmā, kaut arī ātrums vienmērīgāk sadalās pa caurules šķēsgriezumu, daļiņu uzturēšanās laiks ir dažāds. To nosaka pulsācija, kuras rezultātā notiek turbulentā difūzija — daļiņas pārvietojas dažādos virzienos attiecībā pret pamatmasas plūsmu. Ja daļiņas pārvietojas šķērsvirzienā (no plūsmas centra uz malām), tad to sauc par *radiālo difūziju*, ja garenvirzienā, — tad par *aksiālo difūziju*. Aksiālā difūzija var būt virzīta pamatmasas virzienā vai arī pretēji tai (*atplūsma*).

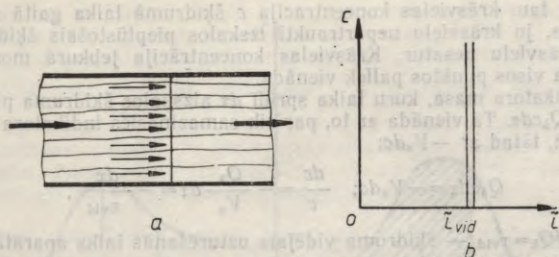
Daudzos ķīmijas rūpniecības aparātos ātruma sadalījums (kas raksturo hidrodinamisko režīmu aparātā) ir ievērojami sarežģītāks nekā iepriekš aplūkoto ātruma sadalījumi. Šādas hidrodinamiskās parādības aparātos rada nevēlamas norises, piemēram, blakusreakcijas (reaktoros), lokālu pārkaršanu, koncentrāciju neizlīdzināšanos u. tml.

Theorētiski aprēķināt un praktiski noteikt plūsmu ātrumus dažādās aparāta vietās nav iespējams. Informāciju par ātruma lauku aparātā iegūst, ja ievadāmajā plūsmā ievada kādu vielu — indikatoru (to sauc arī par *traseri* un tās koncentrāciju — par *signālu*) un izplūstošajā vidē registrē tās koncentrāciju c atkarībā no laika τ . Indikatora ievadīšanu izdara īsu brīdi (*impulsa metode*) vai nepārtraukti, sākot ar noteiktu momentu (*pakāpes metode*). Par indikatoru lieto krāsvielas, sāļu šķīdumus, radioaktīvos preparātus un citas vielas, kuru saturu plūsmā ērti noteikt.



2.41. att. Vi-
des cirkulā-
cija aparātā.

Reakciju uz ierosmi, ko rada ievadītais indikators, plūsmā ieplūstot aparātā, attēlo līknes veidā, atliekot uz vienas koordinātu ass indikatora koncentrāciju izplūstošajā plūsmā, bet uz otras — laiku. Iegūto līkni sauc par *atsauces līkni* jeb *izplūdes līkni*. Konkrētam aparātam iegūto atsauces līkni salīdzinot ar ideālo modeļu atsauces līknēm, var novērtēt plūsmas struktūru aparātā.



2.42. att. Ideālas izspiešanas shēma.

Ideālie plūsmu struktūru modeļi. Plūsmu struktūru pamatā ir ideālas izspiešanas modelis un ideālas maisīšanas modelis.

Ideālas izspiešanas modelis. Šķidruma (gāzes) plūsmu, kur visas daļiņas virzās paralēli cita citai ar vienādu ātrumu, neapdzienot plūsmas pamatmasu un neatpaliekot no tās, uzskata par *ideālas izspiešanas modeli*. Šķidruma masu no aparāta ieplūdes līdz izplūdei it kā ar virzuli bīda uz priekšu. Aparātus ar šādu šķidruma virzuļveida plūsmu sauc par *ideālas izspiešanas aparātiem* (2.42. att. a).

Plūsmas daļiņu uzturēšanās laiks τ ideālas izspiešanas modeli vienāds ar vidējo uzturēšanās laiku τ_{vid} , ko iegūst, daļiņas pārvietošanās ceļu l dalot ar šķidruma (gāzes) lineāro ātrumu w :

$$\tau_{vid} = \frac{l}{w} = \frac{lS}{\omega S} = \frac{V_a}{Q_s},$$

kur S — aparāta šķērsgriezuma laukums, m^2 ; V_a — aparāta tilpums, m^3 ; Q_s — šķidruma caurtece, m^3/s .

Ideālas izspiešanas modeļa *atsauces likne* parādīta 2.42. attēlā b. No momenta $\tau=0$ līdz momentam $\tau=\tau_{vid}$ no aparāta izplūstošajā šķidrumā indikators neparādās. Laikā $\tau=\tau_{vid}$ indikatora koncentrācija c izplūdes vietā momentāni pieaug, bet tūlīt arī kritas līdz nullei. Indikators caur aparātu izplūst plānā slānī (it kā cieta virzuļa virsma), un signāls fiksējas pēc laika τ_{vid} .

Praksē ideālas izspiešanas modelim tuvi ir kolonnu veida aparāti. Novirze no ideālas izspiešanas modeļa iespējama tad, ja notiek šķidruma daļiņu *aksiālā* vai *radiālā difūzija*, veidojas «mirušās» zonas u. tml.

Ideālas maisīšanas modelis. Caurplūdes aparātu, kurā notiek momentāna un pilnīga ievadītā indikatora samaisīšanās ar aparātā esošo šķidrumu, sauc par *ideālas maisīšanas aparātu* (2.43. att. a). Ja šādā aparātā, kur ir maisītājs, nepārtraukti plūstošā šķidrumā ievada m masas vienības krāsvielas, tad tā momentāni vienmērīgi nokrāso visu aparātā esošo šķidrumu. Indikatora koncentrācija c_0 jebkurā aparāta punktā ir šāda:

$$c_0 = m/V_a.$$

Pēc tam krāsvielas koncentrācija c šķīdumā laika gaitā samazināsies, jo krāsvielu nepārtraukti izskalo pieplūstošais šķīdums, kas krāsvielu nesatur. Krāsvielas koncentrācija jebkurā momentā aparāta visos punktos paliek vienāda.

Indikatora masa, kuru laika sprīdī $d\tau$ aizskalos šķīduma plūsma Q_s , ir $Q_s c d\tau$. Tā vienāda ar to, par cik samazināsies indikatora masa aparātā, tātad ar $-V_a dc$:

$$Q_s c d\tau = -V_a dc; \quad \frac{dc}{c} = -\frac{Q_s}{V_a} d\tau = -\frac{d\tau}{\tau_{vid}},$$

kur $V_a/Q_s = \tau_{vid}$ — šķīduma vidējais uzturēšanās laiks aparātā.

So vienādojumu integrējot robežās no c_0 (ja $\tau=0$) līdz c_τ (brīvi izraudzītā laika momentā τ), iegūst

$$\int_{c_0}^c \frac{dc}{c} = -\frac{1}{\tau_{vid}} \int_0^\tau d\tau, \text{ tad}$$

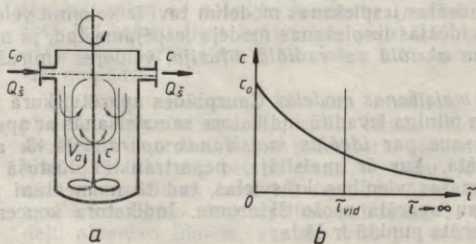
$$\ln \frac{c}{c_0} = -\tau/\tau_{vid} \text{ vai}$$

$$c_\tau = c_0 \exp(-\tau/\tau_{vid}). \quad (2.116)$$

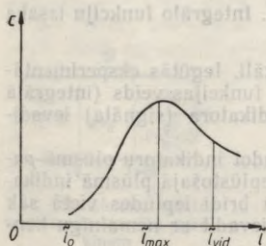
No vienādojuma (2.116) un atsaucēs liknes (2.43. att. b) redzams, ka indikatora lielākā daļa no aparāta izplūst laikā starp ievadišanas momentu un laiku, kas atbilst vidējam uzturēšanās laikam $\tau_{vid} = V_a/Q_s$. Indikatora atlikušās daļas izskalošanai nepieciešams ilgs laiks.

Tāda aparāta prototips, kur apstākļi tuvi ideālas maisīšanas modelim, ir tvertne ar intensīvas darbības maisītāju, kā arī aparāts ar plūstošu suspendētu graudaina materiāla slāni. Lielākajā daļā reālo nepārtrauktas darbības aparātu plūsmas struktūra neatbilst šīm divām idealizētām hidrodinamisko modeļu galējībām.

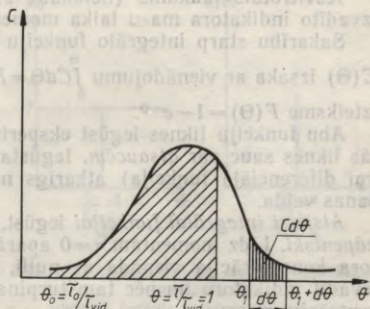
Reālo aparātu atsaucēs likne parādīta 2.44. attēlā. Ievadot indikatoru aparātā ieplūstošajā šķīdumā, tas parādās vēlāk nekā ideālas maisīšanas modelī — pēc laika τ_0 no ievadišanas momenta $\tau=0$.



2.43. att. Ideālas maisīšanas shēma.



2.44. att. Atsauces liknes reāliem aparātiem.



2.45. att. Uzturēšanās laika funkcijas (atsauces liknes) reāliem aparātiem.

Indikatora koncentrācija izplūstošā plūsmā sākumā pieaug līdz brīdim τ_{max} , bet pēc tam samazinās, tiecoties uz nulli, ja $\tau \rightarrow \infty$.

Varbūtība, ka aparātā momentā $\tau=0$ ievadītā daļiņa tiks izvadīta no aparāta kaut kad (starp $\tau=0$ līdz $\tau=\infty$), vienāda ar vienu. Daļiņa kaut kad jau tiks izvadīta.

Atsauces liknes biežāk attēlo nevis koordinātās $c=\tau$, bet bezdimensionālās koordinātās $C-\Theta$, kur $C=c/c_0$, c_τ — indikatora koncentrācija attiecīgajā laika momentā τ , kg/m^3 ; c_0 — indikatora koncentrācija sākumā, kg/m^3 , un $\Theta=\tau/\tau_{vid}$.

Bezdimensionālās koordinātas vienkāršo sakarības un vieglāk konstatēt eksperimenta kļūdas.

Laukums zem atsauces liknes (2.45. att.) izsaka kopējo relatīvo indikatora masu saskaņā ar vienādojumu $\int_0^\infty Cd\Theta=1$ (pieņem, ka kopējā relatīvā indikatora masa vienāda ar vienu).

Lielums $Cd\Theta$ (vertikāli iesvītrotais laukums) izsaka daļu no kopējās indikatora masas, kas aizplūst no aparāta laikā $d\Theta$, vai daļu no šķidruma, kura uzturēšanās laiks atbilst laika sprīdim no Θ_1 līdz $(\Theta_1+d\Theta)$. Relatīvās koncentrācijas C atkarību no relatīvā laika Θ sauc par *šķidruma uzturēšanās laika (aparātā) diferenciālo funkciju*.

No vienādojuma (2.116), rakstot to bezdimensionālās koordinātās, iegūst *uzturēšanās laika diferenciālo funkciju ideālas maisīšanas modelim*:

$$C = \exp(-\Theta) = e^{-\Theta}. \quad (2.117)$$

Lielums $\int_0^\Theta Cd\Theta$ atkarībā no Θ raksturo no aparāta izvadīto indikatora masu laikā no 0 līdz brīvi izraudzītajam momentam Θ , un to sauc par *šķidruma uzturēšanās laika (aparātā) integrālo funkciju*.

Iesvītrotais laukums (lielākais, 2.45. att.) raksturo no aparāta izvadīto indikatora masu laika momentam, kas nav lielāks par τ_{vid} .

Sakarību starp integrālo funkciju $F(\Theta)$ un diferenciālo funkciju $C(\Theta)$ izsaka ar vienādojumu $\int_0^{\Theta} C d\Theta = F(\Theta)$. Integrālo funkciju izsaka izteiksme $F(\Theta) = 1 - e^{-\Theta}$.

Abu funkciju līknes iegūst eksperimentāli. Iegūtās eksperimentālās līknes sauc par *atsaucēm*. Iegūstamās funkcijas veids (integrālā vai diferenciālā funkcija) atkarīgs no indikatora (signāla) ievadīšanas veida.

Atsauci integrālāi funkcijai iegūst, ievadot indikatoru plūsmā pakāpeniski. Līdz momentam $\tau=0$ aparātā ieplūstošajā plūsmā indikatora koncentrācija vienāda ar nulli. Sajā brīdī ieplūdes vietā sāk ievadīt indikatoru un pēc tam turpina to ievadīt ar nemainīgu koncentrāciju.

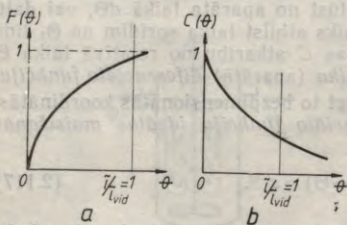
Atsauci diferenciālās funkcijas sadalījumam iegūst, ievadot indikatoru (signālu) impulsveidā. Indikatora padeve impulsveidā notiek, iešļācot to plūsmā (praktiski ļoti īsā laikā).

Atsauces līknes ideālas maisīšanas modelim parādītas 2.46. attēlā *a* un *b*.

Plūsmu struktūru matemātiskās izteiksmes. Plūsmu struktūru modeļus matemātiski raksturo ar diferenciālvienādojumiem. Diferenciālvienādojumu koeficientus sauc par *modeļa parametriem*. Nezināmos modeļa parametrus iegūst, salīdzinot diferenciālvienādojumu atrisinājumu rezultātus (ievērojot attiecīgās robežas un sākuma nosacījumus) ar eksperimentāli iegūstām atsauces funkcijām.

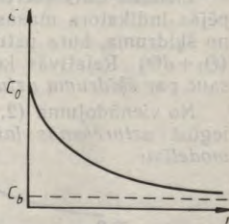
Ideālas maisīšanas modeļa diferenciālvienādojums dots 106. lapusē.

Ideālas izspiešanas modelis. Realizējot masas apmaiņas procesus vai siltuma procesus ideālas izspiešanas aparātos, darba vielas koncentrācija (vai temperatūra) nepārtraukti mainās pa aparāta garumu (augstumu) no ieplūdes līdz izplūdei (2.47. att.).

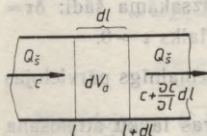


2.46. att. Atsauces līknes ideālas maisīšanas modelim:

a — integrālā funkcija (pakāpeniska ierosme),
b — diferenciālā funkcija (impulsīva ierosme).



2.47. att. Ideālas izspiešanas modeļa shēma.



2.48. att. Lielumi ideālas izspiešanas aparāta aprēķinam.

Ideālas izspiešanas aparātam (2.48. att.) elementārais tilpums $dV_a = S dl$ (kur S — aparāta šķērsgriezuma laukums) akumulē (saista) šādu indikatora masu:

$$Sdl \frac{\partial c}{\partial \tau} d\tau = \underbrace{Q_s c d\tau}_{\text{ievadīts}} - \underbrace{Q_s \left(c + \frac{\partial c}{\partial l} dl \right) d\tau}_{\text{akumulēts}} + \underbrace{Q_s dl}_{\text{izvadīts}}$$

indikatora masa tilpumā dV_a laikā $d\tau$.

Atverot iekavas un daļēji saīsinot, iegūst

$$Sdl \frac{\partial c}{\partial \tau} d\tau = -Q_s \frac{\partial c}{\partial l} dl d\tau. \quad (2.118)$$

Turpinot saīsināšanu un dalot abas puses ar S , iegūst

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -\frac{Q_s}{S} \frac{\partial c}{\partial l},$$

kur $Q_s/S = \omega$, tad

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -\omega \frac{\partial c}{\partial l}. \quad (2.119)$$

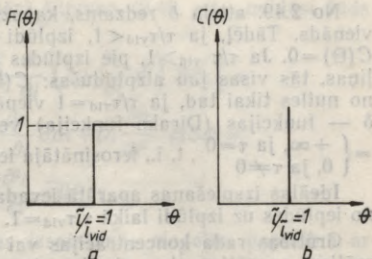
Analogiski siļuma procesiem

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = -\omega \frac{\partial T}{\partial l}$$

kur T — vides temperatūra.

Atsauces līknes šim gadījumam dotas 2.49. attēlā *a* un *b*.

No 2.49. attēla *a* redzams: ja $\tau/\tau_{vid} < 1$, tad $F(\Theta) = 0$, ja $\tau/\tau_{vid} > 1$, tad $F(\Theta) = 1$, t. i., jebkurai $\tau/\tau_{vid} > 1$ vērtībai no aparāta izplūdušas visas daļiņas, kas tur iekļuvušas sākuma momentā; ja $\tau/\tau_{vid} = 1$, tad funkcija realizē lēcieni.



2.49. att. Atsauces līknes ideālas izspiešanas modelim:

a — integrālā funkcija (pakāpeniska ierosme), *b* — diferenciālā funkcija (impulsveida ierosme).

No 2.49. attēla *b* redzams, ka uzturēšanās laiks visām daļiņām vienāds. Tādēļ, ja $\tau/\tau_{vid} < 1$, izplūdi nesasniedz neviena daļiņa un $C(\theta) = 0$. Ja $\tau/\tau_{vid} > 1$, pie izplūdes arī nav nevienas iezīmētas daļiņas, tās visas jau aizplūdušas: $C(\theta) = 0$. Funkcija $C(\theta)$ atšķiras no nulles tikai tad, ja $\tau/\tau_{vid} = 1$ vienā punktā un šajā punktā tai ir δ — funkcijas (Diraka funkcija) veids, kura izsakāma šādi: $\delta\tau = \begin{cases} +\infty, & \text{ja } \tau = 0 \\ 0, & \text{ja } \tau \neq 0 \end{cases}$, t. i., ierosinātāja ievadišanas laiks $\tau \rightarrow 0$.

Ideālas izspiešanas aparātā ievada signāls nemainīgs pārvietojas no ieplūdes uz izplūdi laikā $\tau/\tau_{vid} = 1$.

Grūtības rada koncentrācijas vai temperatūras lauku attēlošana reāliem aparātiem, kas atrodas starp ideālas maisīšanas un izspiešanas modeļiem. Reālu aparātu plūsmu struktūru attēlošanai bieži lieto difūzijas modeli un šūnu modeli.

Difūzijas modelis. Difūzijas modeli aksiālās atplūsmas un radiālās difūzijas dēļ notiek plūsmā esošo daļiņu samaisīšanās. Izšķir vienparametra un divparametru difūzijas modeļus.

Vienparametra difūzijas modelis ir tad, ja notiek tikai atplūsma (aksiālais difūzijas modelis, 2.50. att. *a*).

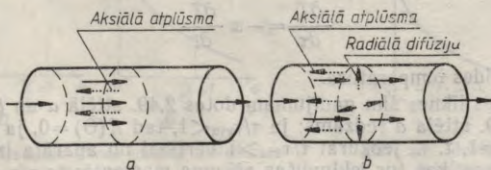
Divparametru difūzijas modelis ir tad, ja notiek aksiālā atplūsma un radiālā difūzija (2.50. att. *b*). Šādu plūsmu struktūru attēlošanai lieto ideālas izspiešanas modeli, kurā paredz atplūsmu, ko raksturo (formāli) ar difūzijas likumu.

Vienparametra difūzijas modelis. Pieņem, ka koncentrācijas maiņa ir nepārtrauktas koordinātas funkcija (attāluma, sk. 2.47. att.); plūsmas tilpums $Q = const$, aksiālais atplūsmas koeficients un radiālais difūzijas koeficients nemainās plūsmas garenvirzienā un šķērsvirzienā, t. i., $D_l = const$ un $D_r = const$.

Atplūsmu raksturo ar Fika likumu, pēc kura difundējošo vielu izsaka ar molekulārās difūzijas vienādojumu (sk. 401. lpp.).

$$dM = -D \frac{\partial c}{\partial l} S d\tau,$$

kur M — vielas daudzums, kas sekundē difundē caur virsmu, kmol/s; $\frac{\partial c}{\partial l}$ — komponenta koncentrācijas gradients.



2.50. att. Difūzijas modeļu shēmas.

Sakarā ar atplūsmu elementārā tilpumā (2.48. att.) nokļūst šāds indikatora daudzums:

$$\begin{aligned} -D_l \frac{\partial c}{\partial l} S d\tau - \left[-D_l \frac{\partial}{\partial l} \left(c + \frac{\partial c}{\partial l} dl \right) S d\tau \right] &= \\ = -D_l \frac{\partial c}{\partial l} S d\tau + D_l \frac{\partial c}{\partial l} S d\tau + D_l \frac{\partial^2 c}{\partial l^2} dl S d\tau &= \\ = D_l \frac{\partial^2 c}{\partial l^2} dl S d\tau. \end{aligned}$$

Vienādojumu (2.118) ideālas izspiešanas modelim papildina ar iegūto izteiksmi:

$$S dl \frac{\partial c}{\partial \tau} d\tau = -Q_s \frac{\partial c}{\partial l} dl d\tau + D_l \frac{\partial^2 c}{\partial l^2} dl S d\tau.$$

Abas puses dala ar S un saīsina, tad

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -w \frac{\partial c}{\partial l} + D_l \frac{\partial^2 c}{\partial l^2}, \quad (2.120)$$

kur D_l — aksiālais atplūsmas koeficients, kas ietver molekulāro un turbulento difūziju (D_l nosaka eksperimentāli).

Aksiālais atplūsmas koeficients, ja difūzijas ātrums ir vienāds, atkarīgs arī no aparāta garuma un plūsmas ātruma.

Modeļa attiecināšanai uz līdzīgiem gadījumiem aksiālo atplūsmas koeficientu ērti raksturot ar līdzības kritēriju, kas analogisks difūzijas procesa Peklē kritērijam

$$Pe = \frac{wl}{D_l}$$

kur l — sistēmas noteicošais lineārais izmērs.

Ja $Pe=0$ ($D_l=\infty$), plūsmas struktūra atbilst ideālas maisīšanas modelim. Bezgalīgi ātra difūzija izraisa pilnīgu samaisīšanos.

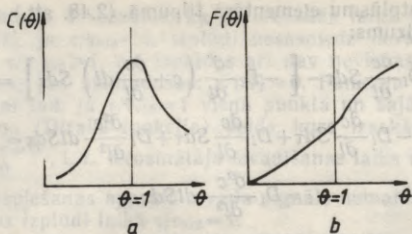
Ja $Pe=\infty$ ($D_l=0$), plūsmas struktūra atbilst ideālas izspiešanas modelim.

Ja $0 < Pe < \infty$, tad aparāts ir starp ideālas maisīšanas un izspiešanas modeļiem. Katru aparātu tad raksturos sava sadales funkcija.

Divparametru difūzijas modelis. Šādā modelī novērojama garenvirziena atplūsma un radiālā difūzija. Modeli raksturo aksiālais atplūsmas koeficients D_l un radiālais difūzijas koeficients D_r .

Cilindriskas formas aparātam, ja plūsmas ātrums w nemainās, vienparametra difūzijas modeļa vienādojumam (2.120) pieskaita radiālās difūzijas izteiksmi $D_r \partial^2 c / \partial r^2$ un iegūst divparametru difūzijas modeļa vienādojumu:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -w \frac{\partial c}{\partial l} + D_l \frac{\partial^2 c}{\partial l^2} + D_r \frac{\partial^2 c}{\partial r^2}. \quad (2.121)$$



2.51. att. Atsauces liknes difūzijas modelim:
 a — diferenciālā funkcija, b — integrālā funkcija.

Koeficientus D_l un D_r nosaka eksperimentāli.

Uzturēšanās laika funkcijas (atsauces liknes) difūzijas modelim parādītas 2.51. attēlā a un b.

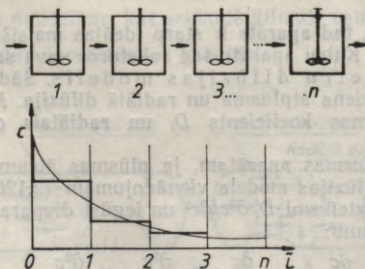
Sūnu modelis. Šādam modelim pieņem, ka plūsma sastāv no rindā saslēgtiem ideālas maisīšanas aparātiem (šūnām). Maisīšana starp šūnām nenotiek. Sūnu modeļa parametri ir šūnu skaits n un uzturēšanās laiks τ vienā šūnā (2.52. att.).

Ja $n=1$, plūsmas struktūra atbilst ideālas maisīšanas modelim, ja $n=\infty$, tad tā atbilst ideālas izspiešanas modelim. Sūnu modeli, ja visas šūnas ir vienādas (to summa vienāda ar aparāta tilpumu) un plūsmas tilpums ir nemainīgs, var raksturot ar n lineāriem diferenciālvienādojumiem:

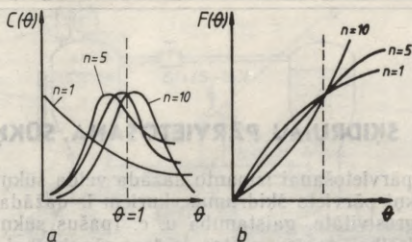
$$\frac{l}{n} \frac{dc_i}{d\tau} = \frac{Q}{V_a} (c_{i-1} - c_i); \quad i = 1, 2, 3, \dots, n.$$

Uzturēšanās laika funkcijas (atsauces liknes) parādītas 2.53. attēlā.

Kombinētie modeļi. Ja neviens no aplūkotajiem hidrodinamiskajiem modeļiem pietiekami precīzi neattēlo plūsmas īpašības, t. i., ja,



2.52. att. Sūnu modeļa shēma.



2.53. att. Atsauces līknes šūnu modelim:

a — diferenciālā funkcija, b — integrālā funkcija.

salīdzinot eksperimentāli iegūtās atsaucē līknes ar aplūkoto modeļu atsaucē līkņēm (kuras iegūstamas ar ESM), neiegūst sakrītību, tad lieto kombinētos hidrodinamiskos modeļus. To pamatā ir aplūkoto modeļu diferenciālvienādojumi ar papildu locekļiem, kas ietver «mirušās» zonas, plūsmas daļu recirkulāciju, apvadlīnijas u. c. Tas ievērojami sarežģī procesa matemātisko izteiksmi.

Pētīt plūsmu hidrodinamiskās struktūras, jāsalīdzina modeļa atsaucē līkņu adekvātums ar pētāmā objekta atsaucē līkņēm. Sakrīšanas gadījumā nosaka modeli raksturojošo parametru skaitliskās vērtības. Iegūtās vērtības lieto, aprēķinot procesu attiecīgā aparātā¹

¹ Pilnīgāka informācija par plūsmu struktūrām un modeļiem sk. Dreijers I., Vitols P. Ķīmijas tehnoloģijas procesu teorijas pamati. — R.: Zvaigzne, 1986. — 228 lpp.

3. ŠKIDRUMU PĀRVIETOŠANA. SŪKŅI

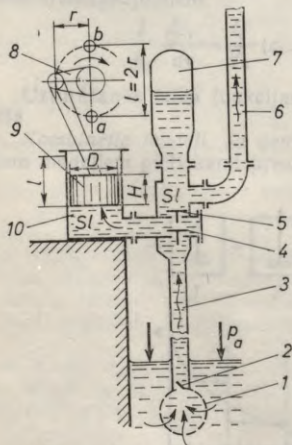
Šķidrumu pārvietošanai izmanto dažāda veida sūkņus. Ķīmiskajā rūpniecībā sūkņi pārvieto šķidrumus, kuriem ir dažāda temperatūra, viskozitāte, agresivitāte, gaistamība u. c. Īpašus sūkņus gatavo ķīmiskajai rūpniecībai, papīra, naftas, kūdras rūpniecībai, termoelektrostacijām.

Vienotas sūkņu klasifikācijas nav. Atkarībā no lietošanas iespējām sūkņus iedala auksta un karsta ūdens, benzīna, eļļas sūkņos u. c. Atkarībā no konstrukcijas sūkņus iedala *virzuļsūkņos*, *centrbēdzes sūkņos* un *speciālos sūkņos*.

3.1. VIRZUĻSŪKŅI

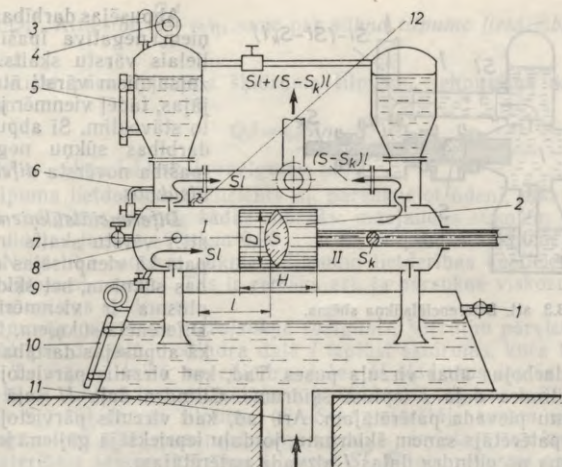
Virzuļsūkņu iedalījums pēc darbības veida. Pēc darbības veida virzuļsūkņus iedala *vienpusējas darbības virzuļsūkņos*, *abpusējas darbības virzuļsūkņos* un *diferenciālsūkņos*.

Vienpusējas darbības virzuļsūkņa iekārta parādīta 3.1. attēlā. Virzulim 9 pārvietojoties uz augšu, cilindrā 10 samazinās spiediens, un atmosfēras spiediens p_a , kas darbojas uz šķidruma līmeni, pārvieto šķidrumu pa sūcējcauruli 3 uz augšu un atver sūcējvārstu 4. Sis ir sūkšanas gājiens. Tas turpinās, līdz kloķis 8 no stāvokļa *a* nonāk stāvoklī *b*. Kloķim pārvietojoties no *b* uz *a*, virzulis pārvietojas uz leju. Virzuļa radītais spiediens izplatās pa šķidrumu uz visām pusēm, paceļ vārstu 5 un iespiež šķidrumu spiedcaurulē 6. Tādējādi šķidrums nokļūst līdz patērētājam. Grozs 1 aiztur mehāniskos piemaisījumus, lai tie neiekļūtu sūkņī. Vārsts 2, sūkņim apstājoties, neļauj šķidrumam iztecēt no sūcējcaurules, jo tas aprūtinā sūkņa iedarbināšanu. Gaisa tvertnes 7 nozīme tiks apskatīta atsevišķi.



3.1. att. Vienpusējas darbības virzuļsūkņa shēma.

3.1. attēlā parādītais sūkņis pieder pie vertikālajiem sūkņiem, jo virzuļa kustība notiek vertikālā virzienā.



3.2. att. Abpusējas darbības virzulsūkņa shēma.

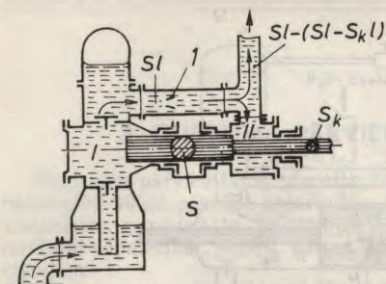
Ja virzuļa garums lielāks par diametru, t. i., ja $H > D$, tad tādu virzuli sauc par *gremdvirzuli* un attiecīgos sūkņus — par *gremdvirzuļa sūkņiem*. Gremdvirzuļa sūkņus lieto spiedieniem, kas lielāki par 1,0...1,5 MPa. Zemākiem spiedieniem lieto virzulsūkņus ($H < D$).

Vienpusējas darbības sūkņiem šķidruma padeve ir nevienmērīga, jo sūkšanas brīdī patērētājs šķidrumu nesaņem.

Vienmērīgu šķidruma plūsmu iegūst ar *abpusējas darbības sūkni*. Tā shēma dota 3.2. attēlā. Virzulim 2 pārvietojoties pa labi, cilindra daļā I šķidrumu iesūc. Tai pašā laikā no cilindra daļas II šķidrumu ievada spiedcaurulē. Ja virzulis pārvietojas pa kreisi, cilindra daļās I un II notiek pretējas darbības. Parādītā abpusējas darbības sūkņa shēma ir *horizontālā sūkņa shēma*, jo gremdvirzulis pārvietojas horizontāli.

Lielāka ražīguma sūkņiem ir šāda armatūra: drošības vārsts 3, manometrs 4, līmeņrādītāji 5 un 10, caurulītes 6 un 9 šķidruma pārvadīšanai no spiedcaurules uz cilindru un no tā uz sūcējcaurulīti. Šīs caurulītes izmanto šķidruma ievadīšanai sūcējcaurulē pirms sūkņa palaišanas, ja šķidruma pēc ilgākas stāvēšanas iztecējis, kā arī tad, ja sūknis jāiztukšo pirms remonta vai ja paredzams to apturēt uz ilgāku laiku. Krānus 7 un 1 lieto gaisa papildināšanai gaisa tvertnēs. Caurums 8 domāts indikatora piestiprināšanai. Pa krānu 12 gaisu izlaiž no cilindra tajā laikā, kad to piepilda ar šķidrumu.

Šķidruma plūsmas vienmērīgums atkarīgs no attiecības starp virzuļa šķērsgriezumu S un virzuļa kāta šķērsgriezumu S_k .



3.3. att. Diferenciālsūkņa shēma.

niem, darbojas abas virzuļa puses. Tad, kad virzulis pārvietojas pa labi, cilindra daļā I ieplūst šķidrums. Cilindra daļa II šajā laikā šķidrumu pievada patērētājam. Arī tad, kad virzulis pārvietojas pa kreisi, patērētājs saņem šķidrumu, jo daļu iepriekšējā gājienā iesūktā šķidruma no cilindra daļas I aizvada patērētājam.

Bez tam lieto arī *vienpusējas darbības daudzcilindru sūkņus*.

Trīscilindru sūknis sastāv no trim vienpusējas darbības sūkņiem, kurus darbina kopēja kloķvārpsta. Šiem sūkņiem ir kopēja sūcējcaurule un spiedcaurule. Vārpstas kloķi novietoti 120° leņķī. Lieto pat 5...7 paralēli saslēgtus sūkņus. Šādos sūkņos, kloķvārpstu pareizi sadalot, panāk vienmērīgu šķidruma plūsmu.

Virzulsūkņus atkarībā no pārvietojamā šķidruma tilpuma iedala *maza ražīguma sūkņos* ar ražīgumu līdz $5,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ($20 \text{ m}^3/\text{h}$); *vidēja ražīguma sūkņos* ar ražīgumu līdz $8,4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ ($300 \text{ m}^3/\text{h}$) un *liela ražīguma sūkņos* ar ražīgumu virs $8,4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ (virš $300 \text{ m}^3/\text{h}$).

Atkarībā no vārpstas apgriezīnu skaita minūtē virzulsūkņus iedala *lēngaitas sūkņos* — 45...60 apgr./min; *normālgaitas sūkņos* — 60...100 apgr./min; *ātrgaitas sūkņos* — 100...150 apgr./min.

Virzulsūkņu ražīgums. Virzulsūkņu ražīgums atkarīgs no virzuļa šķērsgriezuma laukuma, gājiena garuma, vārpstas apgriezīnu skaita un sūkņa darbības principa.

Vienpusējas darbības virzulsūkņa ražīgums. Ja virzuļa šķērsgriezumu apzīmē ar S (sk. 3.1. att.), gājiena garumu ar l , tad, vārpstai apgriezoties vienu reizi, cilindrā iesūc šķidruma tilpumu $S l$. Tādu pašu šķidruma tilpumu spiediena gājienā izspiež no cilindra, t. i., patērētājs ar katru kloķvārpstas δ apgriezīnu saņem $S l$ kubikmetrus šķidruma. Ja vārpsta sekundē apgriežas n reizi, tad sūkņa ražīgums

$$Q_s^t = S l n, \quad (3.1)$$

kur Q_s^t — sūkņa teorētiskais ražīgums, m^3/s .

Faktiski dažādu šķidruma zudumu dēļ, kuri rodas galvenokārt tāpēc, ka iekārta nav blīva, patērētājs saņem mazāku šķidruma til-

pumu Q_s^f . Attiecību $\frac{Q_s^f}{Q_s^i} = \eta_1$ sauc par *sūkņa tilpuma lietderības koeficientu*.

Faktiski pārvietojamais šķidruma tilpums vienpusējas darbības sūkņim

$$Q_s^f = \eta_1 S l n, \quad (3.2)$$

kur Q_s^f — sūkņa faktiskais ražīgums, m^3/s .

Tilpuma lietderības koeficients η_1 , pārsūknējot ūdeni, atkarībā no sūkņa ražīguma mainās šādās robežās: mazjaudas sūkņiem 0,85... 0,90; vidējas jaudas sūkņiem 0,90... 0,95; lieljaudas sūkņiem 0,95... 0,99. Nekārtībā esošiem sūkņiem tilpuma lietderības koeficients var būt ievērojami zemāks. Tas ir zemāks arī, ja pārsūknē viskozus, karstus un netirus šķidrumus.

Abpusējas darbības virzulsūkņa ražīgums. Virzulim pārvietojoties pa labi (sk. 3.2. att.), cilindra daļā I ieplūst šķidrums, kura tilpums ir Sl . Tajā pašā laikā no cilindra daļas II šķidrums ieplūst spiedcaurulē un nokļūst līdz patērētājam. Šī šķidruma tilpums ir $Sl - S_k l = l(S - S_k)$. Šķidruma tilpumu $(S - S_k)l$ patērētājs saņem vārpstas pusapgriezienā. Otrā pusapgriezienā virzulis pārvietojas pa kreisi, un tad patērētājs saņem šķidruma tilpumu Sl . Tātad, vārpstai apgriežoties vienu reizi, patērētājs saņem $(S - S_k)l + Sl = (2S - S_k)l$ kubikmetrus šķidruma.

Ja vārpsta sekundē apgriežas n reizi, tad teorētisko ražīgumu aprēķina pēc formulas

$$Q_s^t = (2S - S_k) l n.$$

Abpusējas darbības sūkņa faktiskais ražīgums

$$Q_s^f = \eta_1 (2S - S_k) l n. \quad (3.3)$$

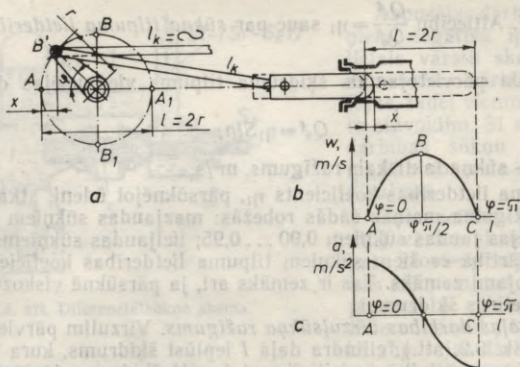
Diferenciālsūkņa ražīgums. Virzulim pārvietojoties uz priekšu, šķidruma tilpums Sl ieplūst cauruļvadā l (sk. 3.3. att.). Visu šo šķidruma tilpumu patērētājs nesaņem, jo šķidruma daļa $Sl - S_k l = l(S - S_k)$ ietek cilindrā, aizpildot virzuļa atbrīvoto tilpumu. Virzulim pārvietojoties atpakaļ, patērētājs iegūst $Sl - S_k l = l(S - S_k)$ kubikmetrus šķidruma. Tādējādi, vārpstai apgriežoties vienu reizi, patērētājs saņem $Sl - (S - S_k)l + (S - S_k)l = Sl$ kubikmetrus šķidruma. Tātad diferenciālsūkņi pārsūknē tādu pašu šķidruma tilpumu kā vienpusējas darbības sūkņi. Tādēļ diferenciālsūkņa faktiskais ražīgums

$$Q_s^f = \eta_1 S l n.$$

No virzulsūkņu ražīguma formulas

$$Q_s^f = \eta_1 S l n = \eta_1 \frac{\pi D^2}{4} l n$$

izriet, ka ražīgumu ietekmē virzuļa diametrs D un gājienu garums l . *Augstspiediena sūkņus* izgatavo ar mazu virzuļa diametru, bet garu gājienu, *zemspiediena sūkņus* — otrādi. Ja sūkņiem vārpstas apgrie-



3.4. att. Virzuļsūkņa pārvada shēma.

zienu skaits vienāds, tad, jo garāks gājiens, jo nevienmērīgāka šķidruma plūsma, t. i., lielāka inerces spēka iedarbība. Tādēļ ātrgaitas sūkņus izgatavo ar īsu gājienu.

Sūkņus, kam $\frac{l}{D} < 1,5$, sauc par *īsa gājiena sūkņiem*, bet sūkņus, kam $\frac{l}{D} > 2$, — par *gara gājiena sūkņiem*. Parasti attiecība $\frac{l}{D}$ nepārsniedz 3,5.

Virzuļa kustības likums. Virzuļa kustības ātrums mainās no nulles galējos stāvokļos (punkti A, A₁, 3.4. att. a) līdz maksimālajam ātrumam vidējos stāvokļos (punkti B, B₁). Vienkāršākai virzuļa kustības likuma izskaidrošanai kļūda garumu l_k , kas ievērojami lielāks par kļūda garumu r , ar praksei pietiekamu precizitāti var uzskatīt par bezgalīgi garu ($l_k = \infty$). Tad, kļūdim pārvietojoties no stāvokļa A līdz stāvoklim B', virzuļa noieto ceļu x var izteikt šādi:

$$x = r - r \cos \varphi = r(1 - \cos \varphi).$$

Sajā momentā virzuļa ātrums

$$\omega = \frac{dx}{d\tau} = r \sin \varphi \frac{d\varphi}{d\tau},$$

kur $\frac{d\varphi}{d\tau}$ — kļūda lenķiskais ātrums, t. i., $\frac{d\varphi}{d\tau} = \omega = 2\pi n$.

Līdz ar to iegūst vienādojumu virzuļa ātruma noteikšanai:

$$\omega = \omega r \sin \varphi. \quad (3.4)$$

Ja $\varphi = 0$ vai $\varphi = \pi$, tad $\sin \varphi = 0$. No tā secināms, ka virzuļa galējos stāvokļos $\omega = 0$. Tas arī ir saprotams, jo virzuļa kustība šajā stāvoklī

maina savu virzienu. Virzuļa vidēja stāvoklī (punkts B), kad $\varphi = \frac{\pi}{2}$ un $\sin \varphi = 1$, tā ātrums ir maksimālais, t. i.,

$$\omega_{\max} = \omega r = 2\pi r n. \quad (3.5)$$

Vārpstai apgriezoties vienu reizi, virzulis noiet ceļu $2l$; ja sekundē ir n apgriezienu, noietais ceļš ir $2ln$. Virzuļa vidējais ātrums

$$\omega_{\text{vid}} = 2ln = 4\pi n. \quad (3.6)$$

No formulām (3.5) un (3.6) var iegūt attiecību, kas rāda, cik reizi virzuļa maksimālais ātrums pārsniedz vidējo ātrumu:

$$\frac{\omega_{\max}}{\omega_{\text{vid}}} = \frac{2\pi r n}{4\pi n} = \frac{\pi}{2} = 1,57.$$

No formulas (3.4) redzams, ka virzuļa ātrums mainās pēc sinusoidas (3.4. att. b).

Virzuļa ātruma atvasinājums pēc laika parāda likumu, pēc kura mainās virzuļa paātrinājums a :

$$\frac{d\omega}{d\tau} = \omega r \cos \varphi \frac{d\varphi}{d\tau} \quad \text{un} \quad \frac{d\varphi}{d\tau} = \omega; \quad \frac{d\omega}{d\tau} = a,$$

tad

$$a = \omega^2 r \cos \varphi. \quad (3.7)$$

No formulas (3.7) izriet, ka virzuļa paātrinājums mainās pēc kosinusoidas, t. i., ja $\varphi = 0$ vai $\varphi = \pi$, tad $\cos \varphi = 1$, turpreti, ja $\varphi = \frac{\pi}{2}$, tad $\cos \varphi = 0$. Tas rāda, ka virzulim vislielākais paātrinājums ir galējos stāvokļos (3.4. att. c). Turpreti, ja ātrums ir maksimālais, tad paātrinājums $a = 0$.

Sādas virzuļa kustības dēļ sūkšanas gājienu sākumā iespējama virzuļa atrašanās no šķidrums. Tādējādi sūkņa darbības laikā rodas trokšņi vai pat tā darbība tiek pārtraukta. Lai no tā izvairītos, jāsamazina kļoņa rādiuss vai vārpstas apgriezienu skaits.

Virzuļsūkņa šķidrums padeve. Šķidrums tilpums, ko virzulis pārvieto sekundē, atkarīgs no virzuļa šķērsgriezuma laukuma S un ātruma w :

$$Q_v = S w,$$

kur Q_v — virzuļa pārvietotais šķidrums tilpums laika vienībā, m^3/s .

Virzuļa šķērsgriezums S ir nemainīgs lielums. Mainīgs ir ātrums, tādēļ pārsūknējams šķidrums tilpums mainās pēc virzuļa ātruma maiņas likuma, t. i., pēc sinusoidas. Bezgalīgi mazā laika sprīdī $d\tau$ virzulis pārvietojas par attālumu dl . Šīnī laikā sūknis pārvieto bezgalīgi mazu šķidrums tilpumu dQ_v :

$$dQ_v = S dl,$$

kur $dl = \omega d\tau = \omega r \sin \varphi d\tau$, tad $dQ_v = S \omega r \sin \varphi d\tau$. Tā kā $\omega d\tau = d\varphi$, tad

$$dQ_v = Sr \sin \varphi d\varphi. \quad (3.8)$$

Pārvietotā šķidruma tilpuma izmaiņas virzuļa gājienu laikā var attēlot grafiski. Grafiks uzskatāmi parāda šķidruma pārsūknešanas nevienmērīgumu. Šim nolūkam konstruē pusriņķi ar rādiusu, kas mērogā attēlo virzuļa šķēsgriezuma laukumu S (3.5. att. *a*). Pa labi no pusriņķa (3.5. att. *b*) novelk taisni, kas attēlo riņķa līnijas garumu, kuru apraksta kļokis ar rādiusu r . Uz šīs taisnes konstruē sinusoīdu. Sinusoīdas laukums attēlo mērogā šķidruma tilpumu, ko vienā gājienu pārsūknē sūknis. Tas pierādāms šādi: ja kļokis ieņem stāvokli, kas atbilst leņķim φ , tad pēc bezgalīgi maza laika sprīža $d\tau$ tas pārvietosies par leņķi $d\varphi$. Kļokļa rēdze aprakstīs loku $rd\varphi$, ko viegli iegūt uz riņķa līnijas garumam atbilstošās taisnes (3.5. att. *b*). Bezgalīgi mazais laukums ar pamatu $rd\varphi$ un augstumu $S \sin \varphi$ izsakāms šādi:

$$dQ_v = rd\varphi S \sin \varphi. \quad (3.9)$$

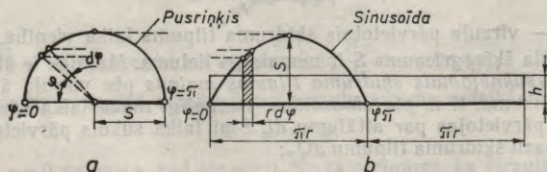
Pamatojoties uz vienādojumu (3.8), redzams, ka iegūtais vienādojums (3.9) raksturo pārsūknēto šķidruma tilpumu laikā $d\tau$. Integrojot vienādojumu (3.9) virzuļa gājienu robežās, iegūst

$$Q_v = Sr \int_0^{\pi} \sin \varphi d\varphi = Sr [-\cos \varphi]_0^{\pi} = Sr(1+1) = 2Sr = Sl. \quad (3.10)$$

No vienādojuma (3.10) izriet, ka laukums, ko ierobežo sinusoīda, raksturo šķidruma plūsmu vienā virzuļa gājienu. Vienpusējas darbības sūknim otrais gājiens ir tukšais gājiens (iesūkšana).

Ja sūknis pārsūknētu šķidrumu vienmērīgi, tad pārvietoto šķidruma tilpumu varētu attēlot ar taisnstūri, kura pamats ir $2\pi r$ un augstums h . Šī taisnstūra laukums būtu vienāds ar sinusoīdas laukumu. Faktiski pēc sinusoīdas (sk. 3.5. att. *b*) maksimālo šķidruma padevi raksturo sinusoīdas augstums S . Attiecība starp augstumiem S un h rāda šķidruma pārsūknešanas nevienmērīgumu:

$$\frac{Q_{\max}}{Q_{\text{vid}}} = \frac{S}{h} \quad (3.11)$$



3.5. att. Vienpusējas darbības sūkņa šķidruma padeves diagramma.

Taisnstūra laukums vienāds ar sinu-
soīdas laukumu:

$$2\pi rh = 2Sr, \text{ tādēļ } h = \frac{S}{\pi}.$$

Ievietojot h izteiksmi vienādojumā
(3.11), iegūst sūkņa šķidruma padeves
nevienmērīguma koeficientu vienpusējas
darbības virzuļsūknim:

$$\frac{Q_{\max}}{Q_{\text{vid}}} = \pi = 3,14.$$

Jo mazāka šī attiecība, jo vienmēri-
gāk sūknis pārsūknē šķidrumu. Ja sūk-
nēšana noris vienmērīgi, tad $\frac{Q_{\max}}{Q_{\text{vid}}} = 1$.

Līdzīgi var iegūt šķidruma padeves
nevienmērīguma koeficientu arī citu
veidu virzuļsūkņiem: abpusējas darbības
sūknim — 1,57; diferenciālsūknim iesūk-
šanas gājienā — 3,14, bet spiešanas gā-
jienā — 1,57.

Virzuļsūkņa šķidruma celšanas augstums. Virzuļsūkņa kopējo
šķidruma celšanas augstumu var noteikt, sastādot Bernulli vienādo-
jumus sūkšanas un spiešanas gājieniem.

Sūkšanas gājienā šķidrumu no līmeņa 0-0 nokļūst līmenī I-I (3.6.
att.). Bernulli vienādojums sūkšanas gājienam ir

$$\begin{matrix} 0-0 & I-I \\ \frac{\omega_1^2}{2g} + \frac{p_a}{\rho g} = \frac{\omega_2^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + H_1 + h_z^{\text{sūc}}. \end{matrix} \quad (3.12)$$

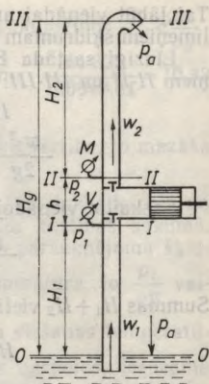
Sūcējcaurulē šķidruma ātrums ir ω_1 . Tādēļ kinētiskais augstums
līmenī 0-0 ir $\frac{\omega_1^2}{2g}$. Uz šķidruma līmeni darbojas atmosfēras spiediens

p_a , kas šķidrumam nodrošina potenciālo enerģiju $\frac{p_a}{\rho g}$ (pnezometris-
kais augstums).

Līmenī I-I šķidruma ātrums ir tāds pats kā līmenī 0-0, tādēļ arī
kinētiskā enerģija ir tāda pati $\left(\frac{\omega_1^2}{2g}\right)$. Šinī līmenī šķidrumam ir

spiediens p_1 , tad pnezometriskais augstums ir $\frac{p_1}{\rho g}$. Līmenī I-I šķid-
rums atrodas virs līmeņa 0-0 augstumā H_1 , tādēļ tam pieskaitāma
klāt potenciālā enerģija, kas līdzvērtīga ar šo augstumu.

Daļu no šķidruma enerģijas $h_z^{\text{sūc}}$ patērē berzes un vietējo pretes-
tību pārvarēšanai sūcējcaurulē no līmeņa 0-0 līdz līmenim I-I. Šo
četrus locekļu summa sastāda kopējo enerģijas daudzumu līmenī I-I.



3.6. att. Virzuļsūkņa ie-
kārtas shēma celšanas
augstuma noteikšanai.

Tai jābūt vienādei ar enerģijas daudzumu līmenī 0-0, jo starp šiem līmeņiem šķidrumam papildu enerģiju nepieveda.

Līdzīgi sastāda Bernulli vienādojumu spiediena gājienam līmeņiem II-II un III-III:

$$\begin{array}{ccc} \text{II-II} & & \text{III-III} \\ \frac{\omega_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} = \frac{\omega_2^2}{2g} + \frac{p_a}{\rho g} + H_2 + h_z^{\text{sūc+sp}}. & & \end{array} \quad (3.13)$$

Saskaitot vienādojumus (3.12) un (3.13), iegūst

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho g} = H_1 + H_2 + \Sigma h_z^{\text{sūc+sp}}.$$

Summas $H_1 + H_2$ vietā var rakstīt $H_g - h$, tad

$$H_g + \Sigma h_z^{\text{sūc+sp}} = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + h. \quad (3.14)$$

Geometrisko celšanas augstumu H_g kopā ar zaudēto spiediena augstumu sūcējcaurulē un spiedcaurulē ($\Sigma h_z^{\text{sūc+sp}}$) sauc par manometrisko celšanas augstumu, jo to var nolāsīt no manometra M un vakuummembra V rādītājiem p_2 un p_1 (sk. 3.6. att.), un apzīmē ar H_m , tātad

$$H_m = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + h, \quad (3.15)$$

kur H_m — manometriskais celšanas augstums, m; p_1, p_2 — spiediens cilindrā sūkšanas un spiešanas gājiēnā, Pa; ρ — pārsūknējamā šķidruma blīvums, kg/m³; g — brīvās krišanas paātrinājums, m/s²; h — attālums pa vertikāli starp vakuummembri un manometru, m.

No formulas (3.15) redzams, ka virzuļsūkņiem kopējais šķidruma celšanas augstums atkarīgs no spiedieniem cilindrā sūkšanas un spiešanas gājiēnos, kā arī no pārsūknējamā šķidruma blīvuma ρ . Kopējais celšanas augstums nav atkarīgs no atmosfēras spiediena.

Ja nebūtu zudumu pašā sūknī, celšanas augstums būtu vēl lielāks. Izsakot zudumus sūknī ar augstumu h_z^s , iespējamais celšanas augstums

$$H_1 = H_m + h_z^s.$$

Celšanas augstums H_1 ir *teorētiskais sūkņa celšanas augstums (indicētais augstums)*. Attiecību $\frac{H_m}{H_1} = \eta_2$ sauc par *sūkņa hidraulisko lietderības koeficientu*.

Virzuļsūkņa sūkšanas augstumu var aprēķināt pēc vienādojuma (3.12), izsakot H_1 un ievērojot inerces spēku ietekmi h_{1s} (sk. formulu (3.21)), tad

$$H_1 \leq \frac{p_a}{\rho g} - \frac{p_1}{\rho g} - h_z^{\text{sūc}} - h_{1s}. \quad (3.16)$$

No formulas (3.16) redzams, ka sūkšanas augstums $H_1 < \frac{p_a}{\rho g}$. Piemēram, pārsūknējot aukstu ūdeni, augstums $\frac{101\ 325}{1000 \cdot 9,81} = 10,33$ metri praktiski nav sasniedzams.

Jo lielāka ir locekļu $\frac{p_1}{\rho g}$, $h_z^{\text{sūc}}$ un h_{1s} skaitliskā vērtība, jo mazāks ir sūkšanas augstums.

Virzulsūkņi spiediens p_1 ir mainīgs lielums, un tas atkarīgs no virzuļa noietā ceļa. Vismazākais tas ir virzuļa kustības sākumā. Sūkšanas gājienā spiediens cilindrā atkarīgs no pārsūknējamā šķidruma temperatūras. Jo augstāka šķidruma temperatūra, jo $\frac{p_1}{\rho g}$ vai-

rāk tuvojas $\frac{p_a}{\rho g}$. Tādēļ karstus šķidrumus (tuvu viršanas temperatūrai) sūknis nespēj iesūkt cilindrā. Lai sūknis darbotos, iesūcamā šķidruma līmenim jābūt virs sūkņa cilindra. Sūkšanas gājienā spiediens p_1 nedrīkst būt mazāks par pārsūknējamā šķidruma tvaika parcelālo spiedienu. Citādi pārsūknējamais šķidrums sāks izdalīt tvaikus, un rezultātā virzulis atrausies no šķidruma. Samazinoties virzuļa ātrumam (gājiena beigās), šķidrums trieksies pret virzuli. Tas nav vēlams.

Ja šķidruma tvaika parcelālo spiedienu pārsūknēšanas temperatūrā apzīmē ar h_t , tad, lai sūknis normāli darbotos, jāievēro nosacījums

$$\frac{p_1}{\rho g} > h_t.$$

Šķidruma tvaika parcelālais spiediens h_t mainās atkarībā no temperatūras.

Virzulsūkņu sūkšanas augstums H_1 atkarīgs no vārpstas apgrieziena skaita un pārsūknējamā ūdens temperatūras. Praktiski jau 70 °C temperatūrā ūdenim sūkšanas augstums $H_1 = 0$, tātad sūkšana nenotiek.

Lai palielinātu sūkšanas augstumu, jācenšas samazināt zudumus sūcējcaurulē $h_z^{\text{sūc}}$. Zudumus sūcējcaurulē aprēķina šādi:

$$h_z^{\text{sūc}} = \frac{\omega_1^2}{2g} \left(1 + \xi_b + \sum_1^n \xi_{vp} \right), \quad (3.17)$$

kur $h_z^{\text{sūc}}$ — zudumi sūcējcaurulē, m; ω_1 — vidējais šķidruma ātrums sūcējcaurulē, m/s; ξ_b — berzes koeficients; $\xi_b = \lambda \frac{H_1}{d}$; λ — ārējais berzes koeficients; H_1 — sūcējcaurules garums, m; $\sum_1^n \xi_{vp}$ — vietējo pretestību koeficientu summa; d — sūcējcaurules diametrs, m.

No formulas (3.17) redzams, ka zudumi samazināsies, ja sūcējcaurulē būs mazs šķidrums ātrums w_1 , kā arī tās sienas būs pēc iespējas gludākas (berzes samazināšanai). Sūcējcaurule jāizveido tā, lai samazinātu zudumus vietējo pretestību pārvarēšanai ($\sum \zeta_{vp}$), t. i., lai pēc iespējas mazāk būtu likumu, ventiļu.

Virzuļsūkņu jauda. Ja sūkņa vārpsta apgriežas vienu reizi, tad patērētājs saņem Sl kubikmetrus šķidrums, kas sver $Sl\rho g$ ņūtonus. Šis šķidrums jāpaceļ H_g metru augstumā un jāpārvar pretestība caurulēs un sūknī.

Šķidruma pacelšanai H_g metru augstumā jāpatērē darbs, kas vajadzīgs $Sl\rho g$ ņūtonu pārvietošanai H_1 (teorētiskais celšanas augstums) metru augstumā, t. i.,

$$A = Sl\rho g H_1,$$

kur A — šķidrums pacelšanai patērētais darbs, J.

Ja vārpsta sekundē apgriežas n reižu, tad nepieciešamā jauda

$$N_1 = Sl n \rho g H_1,$$

kur N_1 — indicētā jauda, W.

Ja jaudu izsaka kilovatos, tad

$$N_1 = \frac{Sl n \rho g H_1}{1000}. \quad (3.18)$$

So jaudu sauc par *indicēto jaudu*, jo to iespējams noteikt pēc sūkņa indikatora diagrammas. Indicētā jauda ir tā jauda, ko šķidrums saņem tieši no virzuļa. Formulā (3.18) izteiksme $Sl n$ izsaka sūkņa teorētisko ražīgumu Q_t , tādēļ var rakstīt

$$N_1 = \frac{Q_t \rho g H_1}{1000}. \quad (3.18)'$$

Praksē ērtāk operēt ar sūkņa faktisko ražīgumu Q_f un manometrisko augstumu H_m .

No iepriekšteiktā zināms, ka $Q_t = \frac{Q_f}{\eta_1}$ un $H_1 = \frac{H_m}{\eta_2}$.

Lai izvēlētos dzinēju, jāzina *sūkņa jauda uz vārpstas* N_v . Šī jauda ir lielāka par indicēto jaudu: $N_v > N_1$, jo daļa enerģijas, pārvadot to no vārpstas uz šķidrumu, berzes dēļ zūd. Attiecību

$$\frac{N_1}{N_v} = \eta_3$$

sauc par sūkņa *mehānisko lietderības koeficientu*; $\eta_3 = 0,85 \dots 0,95$.

Ievietojot vienādojumā (3.18)' Q_t , H_1 un N_1 vietā lielumus Q_f , H_m un N_v , iegūst

$$N_v = \frac{Q_f \rho g H_m}{\eta_1 \eta_2 \eta_3 1000}.$$

Lietderības koeficientu η_1 , η_2 un η_3 reizinājumu apzīmē ar η_s un sauc par *kopējo sūkņa lietderības koeficientu*. Virzuļsūkņiem $\eta_s = 0,60 \dots 0,90$.

Nepieciešamo jaudu uz vārpstas aprēķina pēc formulas

$$N_v = \frac{Q_t \rho g H_m}{\eta_s 1000}, \quad (3.19)$$

kur N_v — jauda uz sūkņa vārpstas, kW; Q_t — sūkņa faktiskais ražīgums, m³/s; ρ — pārsūknējamā šķidruma blīvums, kg/m³; H_m — manometriskais celšanas augstums ($H_m = H_g + \Sigma h_z^{\text{sūc+sp}}$), m; g — brīvās krišanas paātrinājums, m/s².

Formulā (3.19) reizinājums $\rho g H_m$ izsaka spiedienu, kas jāpārvar sūknim. Tātad šo reizinājumu var aizstāt ar Δp . Tad jaudas formula iegūst šādu veidu:

$$N_v = \frac{Q_t \Delta p}{\eta_s 1000}, \quad (3.20)$$

kur Δp — spiediens, kas jāpārvar sūknim, Pa.

Aprēķinot nepieciešamo *dzinēja jaudu*, jāievēro pārvada lietderības koeficients η_p un paša dzinēja lietderības koeficients η_{dz} .

Dzinēja jauda aprēķināma pēc formulas

$$N_{dz} = \frac{Q_t \rho g H_m}{\eta 1000},$$

kur η — sūkņa iekārtas lietderības koeficients; $\eta = \eta_s \eta_p \eta_{dz}$.

Lai nodrošinātu dzinēju pret pārslodzi, to uzstādot, jaudu izvēlas lielāku par N_{dz} , t. i.,

$$N_{uzst} = \beta N_{dz},$$

kur β — *jaudas rezerves koeficients*. Tas atkarīgs no aprēķinātās dzinēja jaudas N_{dz} vērtības.

Ja $N_{dz} < 1$ kW, tad $\beta = 2 \dots 1,5$,

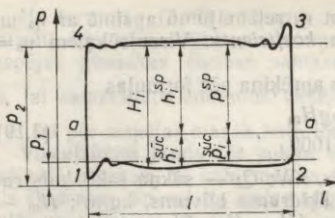
„ $N_{dz} = 1 \dots 5$ kW, „ $\beta = 1,5 \dots 1,2$,

„ $N_{dz} = 5 \dots 50$ kW, „ $\beta = 1,2 \dots 1,15$,

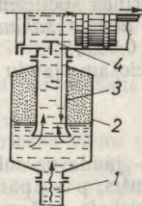
„ $N_{dz} > 50$ kW, „ $\beta = 1,1$.

Virzuļsūkņa indikatora diagramma. Virzuļsūkņa indikatora diagramma parāda sakarību starp spiedienu cilindrā un virzuļa stāvokli, vārpstai veicot vienu apgriezību. Indikatora diagrammu iegūst ar indikatoru, ko pievieno sūkņa cilindram. Pēc diagrammas iespējams noteikt sūkņa indicēto jaudu N_i un noskaidrot defektus sūkņa darbībā.

Virzuļsūkņa normāla indikatora diagramma parādīta 3.7. attēlā. Līnija 1-2 attēlo sūkšanas gājienu. Ja sūknī ievada šķidrumu ar paštecī, tad līnija 1-2 atrodas virs atmosfēras līnijas *a-a*. Spiediena nevienmērība sūkšanas sākumā (punkts 1) saistīta ar sūcējvārsta atvēršanos. Punktā 2 beidzas sūkšanas gājiens un sākas spiešanas gājiens. Tā kā šķidrumi nav saspiežami, spiediens strauji paaugsti-



3.7. att. Virzuļsūkņa normāla indikatora diagramma.



3.8. att. Gaisa tvertne sūcējcaurulē.

nās, līdz sasniedz beigu spiedienu p_2 . Šajā spiedienā šķidrums ieplūst spiedcaurulē. Spiediena nevienmērīgums punktā 3 saistīts ar spiedvārsta atvēršanos. Punktā 4 beidzas spiešanas gājiens, un darbība atkārtojas.

Ja sūknis bojāts, tad indikatora diagramma ir deformēta. Pēc deformācijas veida iespējams noteikt sūkņa defektus.

Gaisa tvertne. Virzuļsūkņiem negatīva īpašība ir šķidruma ātruma maiņa, virzulim pārvietojoties. Tas rada nevienmērīgu šķidruma plūsmu caurulēs. Lai novērstu plūsmas nevienmērīgumu, sūcējcaurulēs un spiedcaurulēs ievieto gaisa tvertnes.

Gaisa tvertnes nozīme sūcējcaurulē izprotama, aplūkojot 3.8. attēlu. Sūkšanas gājiēnā no gaisa tvertnes 2 nosūc vairāk šķidruma, nekā tajā pievada, jo pa cauruli 3 nosūktā šķidruma tilpums atkarīgs no retinājuma cilindrā, bet šķidruma kustība caurulē 1 atkarīga no retinājuma gaisa tvertnē. Bez tam caurules 3 diametrs lielāks par sūcējcaurules 1 diametru. Tādēļ šķidruma tilpums gaisa tvertnē samazinās (gaisa tilpums palielinās). Gaisa tvertnē palielinās retinājums. Tajā laikā virzulis nogājis līdz galēji labējam stāvoklim un sākas spiešanas gājiens. Vārstulis 4 aizveras. Tā kā gaisa tvertnē ir retinājums, tad, neraugoties uz to, ka cilindrā jau notiek spiešanas gājiens, šķidrums pa cauruli 1 ceļas uz augšu un ieplūst gaisa tvertnē. Tātad, ja sūcējcaurulē ir gaisa tvertne, tad šķidrums ieplūst tajā neatkarīgi no tā, vai ir sūkšanas vai spiešanas gājiens.

Gaisa tvertne šķidruma kustību sūcējcaurulē tuvina stacionārai plūsmai. Šķidruma kustības vienmērīgums samazina inerces spēka ietekmi. Inerces spēki darbojas tikai isajā caurulē 3 un cilindrā, jo tur ir nevienmērīga šķidruma plūsma, kas pakļauta virzuļa kustības likumiem un nav maināma.

Augstuma zudums inerces spēka pārvarēšanai virzuļsūkņos nosakāms pēc šādas formulas:

$$h_{is} = 1,2 \frac{l_1}{g} \frac{S}{S_1} \frac{\omega_r^2}{r}, \quad (3.21)$$

kur h_{is} — augstuma zudums inerces spēka pārvarēšanai, m; l_1 — nevienmērīgi plūstošā šķidruma staba augstums sūcējcaurulē vai spiedcaurulē, m; S — virzuļa šķērsriezuma laukums, m^2 ; S_1 — sūcējcaurules vai spiedcaurules šķērsriezuma laukums, m^2 ; ω_r — kloķa lineārais ātrums, m/s; r — kloķa rādiuss, m.

No formulas (3.21) redzams, ka augstuma zudums inerces spēku pārvarēšanai sūcējcaurulē vai spiedcaurulē lielā mērā atkarīgs no nevienmērīgi plūstošā šķidruma staba augstuma l_1 , tādēļ gaisa tvertnes kā sūcējcaurulē, tā spiedcaurulē novieto tuvāk cilindram. Sūcējcaurulē ievietotā gaisa tvertne veicina sūkšanas augstuma palielināšanos, jo samazinās zudumi, kas rastos inerces spēku ietekmē.

Gaisa tvertne spiedcaurulē (3.9. att.) darbojas tāpat kā gaisa tvertne sūcējcaurulē. Spiešanas gājienā (virzulis iet pa kreisi) ne viss šķidrums spēj no cilindra pārvietoties spiedcaurulē 2, daļa no tā ieplūst gaisa tvertnē 3. Tā rezultātā šķidruma tilpums gaisa tvertnē palielinās (gaisa tilpums samazinās). Tvertnē palielinās spiediens. Kad cilindrā sākas sūkšanas gājiens un vārsts 1 aizveras, šķidruma ieplūde no gaisa tvertnes spiedcaurulē (gaisa spiediena ietekmē) turpinās. Gaisa tvertnes pasargā sūkņa iekārtu arī no hidrauliskiem triecieniem.

Spiedcaurules gaisa tvertnes vidējais gaisa tilpums V_{vid} ir aptuveni šāds:

vienpusējas darbības sūknim	22 Sl
abpusējas darbības sūknim	9 Sl
diferenciālsūknim	9 Sl

Sūcējcaurules gaisa tvertnes gaisa tilpums ir 5...10 Sl neatkarīgi no sūkņa veida.

Parasti gaisa tvertnes izgatavo cilindriskas ar šādiem izmēriem:

$$D = 0,97\sqrt[3]{V} \quad \text{un} \quad H = 1,36\sqrt[3]{V},$$

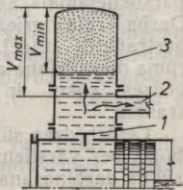
kur V — gaisa tvertnes tilpums, m^3 ; D , H — gaisa tvertnes diametrs un augstums, m.

Ja sūknis darbojas normāli, sūcējcaurules gaisa tvertnē gaisa tilpums palielinās, jo retinājumā gaiss izdalās no šķidruma. Turpretī spiedcaurules gaisa tvertnē gaisa tilpums samazinās, jo paaugstinātā spiedienā pieaug gaisa šķīdība pārsūknējamā šķidrumā.

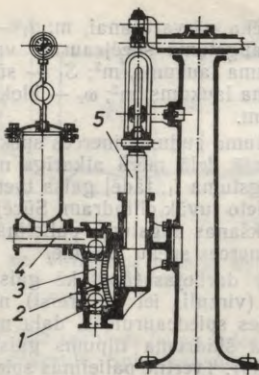
Sūkņa darbības laikā 2/3 no gaisa tvertnes tilpuma jābūt aizpildītām ar gaisu.

Speciālie virzuļšūkņi. Ķīmiskajā rūpniecībā bez iepriekš minētajiem virzuļšūkņiem vēl lieto membrānas jeb diafragmas sūkņus.

Membrānas (diafragmas) sūknis. Membrānas sūkni lieto agresīvu šķidrumu vai suspensiju pārsūknēšanai.



3.9. att. Gaisa tvertne spiedcaurulē.



3.10. att. Membrānas sūkņa shēma.

Gremdvirzulim 5 (3.10. att.) pārvietojoties uz augšu, membrāna 2 izliecas uz cilindra pusi un vārstu kārbā 3 rodas retinājums. Atmosfēras spiediena ietekmē paceļas sūcējvārsts 1 un notiek iesūkšana. Gremdvirzulim pārvietojoties uz leju, eļļa, kas ielieta cilindrā, spiež uz membrānu, un tā izspiež iepriekš iesūkto šķidrumu no telpas 3 spiedvadā 4.

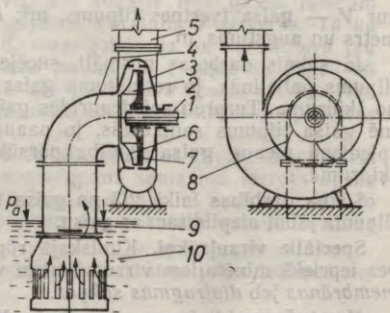
Membrānu izgatavo no elastīgas gumijas vai plāna tērauda skārda. Agresīvu šķidrumu pārsūknēšanai sūcējcauruli, spiedcauruli un vārstu kārbu līdz membrānai izgatavo no speciāla sakausējuma. Pārējie sūkņa elementi izgatavoti no parasta metāla. Tādējādi palēnina sūkņa iekārtu.

3.2. CENTRBĒDZES SŪKŅI

Sūkņa darbības princips un uzbūve. Centrbēdzes sūknis (3.11. att.) sastāv no vārpstas 1, uz kuras nostiprināts darba rats 2, un apvalka 3. Darba rats izveidots no diviem diskkiem — priekšējā 6 un pakaļējā 7. Starp diskkiem atrodas lāpstiņas 8. Darba rati var būt arī bez priekšējā diska un pat bez abiem diskkiem.

Darba ratam rotējot, lāpstiņas pārnēs mehānisko enerģiju uz šķidrumu, un tas sāk pārvietoties. Centrbēdzes spēka ietekmē šķidrums pārvietojas no centra uz perifēriju un nokļūst spiedcaurulē 5. Līdz ar to pie iepļūdes darba ratā 4 rodas retinājums. Tādēļ no šķidruma krātuves 10 atmosfēras spiediena p_a ietekmē pa sūcējcauruli 9 pieplūst pārsūknējamo šķidrumu. Darba rats griežas nepārtraukti, tādēļ šķidruma pievadišana ar centrālās sūkni ir nepārtraukta.

Centrbēdzes sūkņi darbojas bez vārstiem. Pirms sūkņa darbināšanas sūcējcaurule un sūknis jāpiepilda ar pārsūknējamo šķidrumu, jo darba rats,



3.11. att. Centrbēdzes sūkņa shēma.

griezoties gaisa vidē, nespēj radīt pietiekamu retinājumu, lai sūkni varētu iekļaut šķidrums.

Viens darba rats spēj radīt spiedienu 0,5...0,7 MPa (50...70 m H₂O (reti līdz 120 m H₂O)). Lielāka spiediena sasniegšanai jāpalielina darba rata lineārais ātrums, un tādus gadījumos darba rati jāizgatavo no izturīgāka materiāla. Lielie šķidrums ātrumi ievērojami palielina sūkņa pretestību. Tādēļ celšanas augstuma palielināšanai darbina vairākus darba ratus, kas saslēgti virknē. Šādus sūkņus sauc par *vairākpakāpju sūkņiem*.

Vairākpakāpju centrālās sūkņa sastāv no vairākiem darba ratiem, kas nostiprināti uz kopējas vārpstas 4 (3.12. att.), līdz ar to spiedienu var palielināt pat līdz 30 MPa. Parasti darba ratu skaits nepārsniedz 10, retāk — 12. Pakāpju skaitu vairāk palielināt nav izdevīgi, jo rodas samērā lieli spiediena zudumi *vadratos* jeb difuzoros 5, 6, 7. Lai palielinātu šķidrums celšanas augstumu, var saslēgt virknē vairākus vairākpakāpju sūkņus. Darba ratiem vairākpakāpju sūkņos ir vienāds diametrs. Ja darba rata celšanas augstums ir H_1 un darba ratu skaits i , tad aptuvenais kopējais sūkņa celšanas augstums

$$H \approx iH_1, \quad (3.22)$$

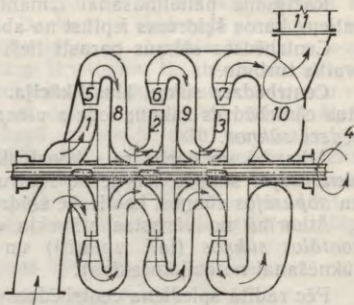
kur H — kopējais sūkņa celšanas augstums, m.

3.12. attēlā parādīts trīspakāpju sūkņa, jo uz vārpstas 4 novietoti trīs darba rati 1, 2, 3. Liela ražīguma centrālās sūkņiem ap darba ratu koncentriski novietots vadrats. Tas sastāv no diviem gredzenveida diskiem, starp kuriem atrodas lāpstiņas, kas noliekas darba rata lāpstiņām pretējā virzienā. Difuzoram jāsamazina no darba rata izplūstošā šķidrums ātrums, t. i., šķidrums kinētiskā enerģija jāpārvērš potenciālajā enerģijā (tā rezultātā palielinās spiediens). Pa kanāliem 8, 9 šķidrums no viena darba rata plūst uz nākamo. No pēdējā darba rata tas nokļūst spirālveida kolektorā 10 un no tā — spiedcaurulē 11.

Centrālās sūkņa ražīguma palielināšanai var lietot paralēli saslēgtus vienādus darba ratus, jo tad sūkņa aptuvenais kopējais ražīgums

$$Q \approx iQ_1,$$

kur Q_1 — viena darba rata ražīgums, m³/s.



3.12. att. Vairākpakāpju centrālās sūkņa shēma.

Ražīguma palielināšanai izmanto arī sūkņus ar tādiem darba ratiem, kuros šķidrums ieplūst no abām pusēm.

Centrbēdzes sūkņus parasti tieši sajūdz ar elektrodzinēju vai ar tvaika turbīnu.

Centrbēdzes sūkņu klasifikācija. Pēc darba ratu skaita uz vārpstas centrālās sūkņus iedala *vienpakāpes* un *vairāpkāpju centrālās sūkņos*.

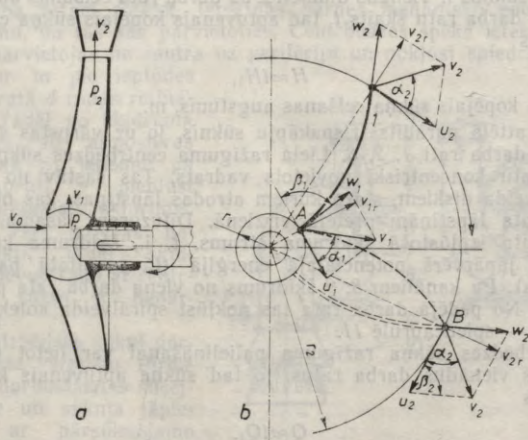
Atkarībā no darba rata konstrukcijas centrālās sūkņus iedala *vienpusējos* sūkņos, kas iesūc šķidrumu no vienas darba rata puses, un *abpusējos* sūkņos, kas iesūc šķidrumu no abām darba rata pusēm.

Atkarībā no vārpstas stāvokļa centrālās sūkņus iedala *horizontālos sūkņos* (ļoti izplatīti) un *vertikālos sūkņos* (lieto ūdens sūkņiem no dziļām akām).

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

Bez tam sūkņus klasificē pēc šķidruma aizvadīšanas no darba rata, pēc apvalka atvēršanas iespējām, pēc savienojuma ar dzinēju un pēc lietošanas veida.

Centrbēdzes sūkņa pamatvienādojums. Centrbēdzes sūkņi, darba ratam rotējot, šķidrums kopā ar to pārvietojas pa riņķa līniju ar noteiktu lineāro ātrumu un vienlaikus slīd gar lāpstiņām ar noteiktu relatīvo ātrumu. Tādēļ centrālās sūkņiem izšķir *lineāro ātrumu u* , *relatīvo ātrumu w* un *absolūto ātrumu v* . Absolūtais ātrums ir lineārā ātruma un relatīvā ātruma geometriskā summa (3.13. att.).



3.13. att. Centrbēdzes sūkņa darba rata shēma.

Centrbēdzes sūkņos darba ratā šķidrums ieplūst ass virzienā ar absolūto ātrumu v_0 (3.13. att. *a*). Darba ratā šķidruma plūsma pāriet radiālā virzienā un nokļūst uz lāpstiņām ar absolūto ātrumu $v_1 > v_0$. Šķidrumam plūstot spraugās starp lāpstiņām, tā absolūtais ātrums nepārtraukti pieaug, līdz, izplūstot no darba rata, sasniedz ātrumu v_2 .

Pārvietojoties lāpstiņai kopā ar darba ratu no stāvokļa *I*, šķidruma daļiņa, kas pārvietojas kopā ar darba ratu un virzās gar lāpstiņu, apraksta trajektoriju *AB* (3.13. att. *b*). Absolūtā ātruma vektors v_2 veido pieskari šai trajektorijai. Triecienu novēršanai, šķidrumam ieplūstot vadratā, lāpstiņām jābūt trajektorijas *AB* turpinājumam. Tādēļ vadrata lāpstiņas noliekas pretēji darba rata lāpstiņām.

Lineāro ātrumu lāpstiņu sākumā aprēķina pēc formulas

$$u_1 = 2\pi r_1 n = \pi D_1 n,$$

kur u_1 — lineārais ātrums, šķidrumam ieplūstot darba ratā, m/s; n — darba rata apgriezienu skaits sekundē.

Lineāro ātrumu, šķidrumam izplūstot no lāpstiņas, iegūst šādi:

$$u_2 = 2\pi r_2 n = \pi D_2 n,$$

kur u_2 — lineārais ātrums, šķidrumam izplūstot no darba rata, m/s.

Sakarību starp dažādiem šķidruma ātrumiem centrālās sūkņos vislabāk parāda ātrumu paralelogrami pie ieplūdes darba ratā un izplūdes no tā (3.13. att.). No šiem paralelogramiem izriet, ka

$$\omega_1^2 = v_1^2 + u_1^2 - 2v_1 u_1 \cos \alpha_1; \quad (3.23)$$

$$\omega_2^2 = v_2^2 + u_2^2 - 2v_2 u_2 \cos \alpha_2. \quad (3.24)$$

Ja darba rats atrastos miera stāvoklī, tad kopējais enerģijas daudzums, šķidrumam plūstot cauri ratam, paliktu nemainīgs. Bernulli vienādojums tādā gadījumā, rēķinot uz 1 kg šķidruma, būtu šāds:

$$\frac{\omega_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{\omega_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g}$$

kur p_1 — šķidruma spiediens, tam ieplūstot darba ratā (punktā *A*); p_2 — šķidruma spiediens, tam izplūstot (punktā *B*).

Rotējošā darba ratā šķidrums iegūst papildu enerģiju, kas vienāda ar centrālās spēka veikto darbu. Tādēļ ir ievērots nosacījums, ka

$$\frac{\omega_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} < \frac{\omega_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g}.$$

Ja ar E_k apzīmē enerģiju, ko iegūst 1 kg šķidruma darba ratā, tad

$$\frac{\omega_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + E_k = \frac{\omega_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} \quad (3.25)$$

kur $E_k = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}$.

Ievietojot E_x izteiksmi vienādojumā (3.25), iegūst

$$\frac{\omega_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} = \frac{\omega_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g}.$$

No šejienes

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho g} = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}. \quad (3.26)$$

Centrbēdzes sūkņa celšanas augstums atkarīgs no sūkņi ieplūstošā šķidruma un izplūstošā šķidruma enerģijas starpības. Ja rotējošā darba ratā, šķidrumam ieplūstot, spiediens ir p_1 un šķidruma absolūtais ātrums v_1 , bet, šķidrumam izplūstot, attiecīgi — p_2 , v_2 , tad enerģijas starpība, kas līdzvērtīga sūkņa teorētiskajam celšanas augstumam,

$$H_t = \left(\frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} \right) - \left(\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} \right) \quad \text{jeb}$$

$$H_t = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}, \quad (3.27)$$

kur H_t — sūkņa teorētiskais celšanas augstums, m. Vienādojuma (3.27) pirmais loceklis $\frac{p_2 - p_1}{\rho g}$ rāda šķidruma potenciālās enerģijas pieaugumu darba ratā, bet loceklis $\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}$ — kinētiskās enerģijas pieaugumu. Vienādojumā (3.27) ievietojot izteiksmes $\frac{p_2 - p_1}{\rho g}$ vietā izteiksmi $\frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}$, no vienādojuma (3.26) iegūst

$$H_t = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}.$$

Lielumu ω_1 un ω_2 vietā liekot attiecīgās izteiksmes no vienādojumiem (3.23) un (3.24) un izdarot matemātiskās darbības, iegūst vienādojumu teorētiskā celšanas augstuma noteikšanai tādā veidā, kā to devis L. Eilers:

$$H_t = \frac{u_2 v_2 \cos \alpha_2 - u_1 v_1 \cos \alpha_1}{g}. \quad (3.28)$$

So vienādojumu sauc par *centrbēdzes sūkņa pamatvienādojumu*. No vienādojuma (3.28) izriet, ka vislielākais teorētiskais celšanas augstums ir tad, ja $u_1 v_1 \cos \alpha_1 = 0$. Tādēļ lāpstņņas veido tā, lai $\alpha_1 = 90^\circ$, tad $\cos \alpha_1 = 0$, t. i., lai ātruma vektors, ar kādu šķidrumam ieplūst darba ratā, būtu virzīts radiālā virzienā. Tādējādi parasta-

jiem centrālās sūkņiem ($\alpha_1 = 90^\circ$) teorētisko celšanas augstumu var aprēķināt pēc formulas

$$H_t = \frac{u_2 v_2 \cos \alpha_2}{g} \quad (3.29)$$

Teorētiskais celšanas augstums atkarīgs arī no lāpstiņu stāvokļa. Uz priekšu noliektām lāpstiņām ir vislielākais celšanas augstums. Taču, izplūstot no darba rata, šķidrums ir liels ātrums, bet sūkņim zems hidrauliskais lietderības koeficients. Lai sūkņa hidrauliskais lietderības koeficients būtu augstāks, centrālās sūkņus gatavo ar atpakaļ atliektām lāpstiņām. Lāpstiņu skaitam jābūt tādā, lai katrā nākamā lāpstiņā ar savu ārējo malu nosegtu iekšējās lāpstiņas iekšējās malu. Lāpstiņām jābūt pēc iespējas plānākām.

Centrālās sūkņa faktiskais celšanas augstums ir mazāks par teorētisko, jo daļa enerģijas tiek patērēta pretestību pārvarēšanai pašā sūkņī. Faktisko celšanas augstumu aprēķina pēc formulas

$$H_f = \frac{u_2 v_2 \cos \alpha_2}{g} \eta_2 K, \quad (3.30)$$

kur H_f — faktiskais sūkņa celšanas augstums, m; η_2 — hidrauliskais lietderības koeficients, kas saistīts ar pretestībām pašā sūkņī un atkarīgs no sūkņa konstrukcijas; vienkāršiem sūkņiem $\eta_2 = 0,6 \dots 0,7$, vairāpkāpju sūkņiem $\eta_2 = 0,65 \dots 0,75$, jaunākās konstrukcijas centrālās sūkņiem $\eta_2 = 0,8 \dots 0,9$; K — koeficients, kas raksturo plūsmas nevienmērīgumu, kā arī dažas konstruktīvās īpatnības.

Koeficientu K nosaka pēc šādas formulas:

$$K = \frac{1}{1 - \frac{2\psi}{z} \frac{1}{1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2}}, \quad (3.31)$$

kur z — lāpstiņu skaits, koeficients $\psi = 0,8 \dots 1$ — sūkņiem ar vadratu; $\psi = 1 \dots 1,3$ — sūkņiem bez vadrata.

Formulās, kuras lieto centrālās sūkņa celšanas augstuma noteikšanai, neietilpst šķidruma blīvums, jo spiediens, ko rada sūkņis, nav atkarīgs no šķidruma blīvuma.

Centrālās sūkņa celšanas augstumu aptuveni var aprēķināt arī pēc šādas formulas:

$$H = kn^2 D^2 i, \quad (3.32)$$

kur H — sūkņa celšanas augstums, m; $k = (1,0 \dots 1,5) 10^{-4}$; n — darba rata apgriezienu skaits minūtē; D — darba rata ārējais diametrs, m; i — darba ratu skaits uz vārpstas.

Kavitācija. Kavitācija ir parādība, kas saistīta ar pārsūkņējamā šķidruma strūkļas nepārtrauktības traucējumiem. Ja šķidruma spiediens, šķidrums iekļūstot darba ratā, ir mazāks par tā tvaika parciālo spiedienu pārsūkņēšanas temperatūrā, tad sūkņī šķidrums daļēji iztvaiko.

Šķidruma iztvaikošana rada sūkņim mehāniskus erozijas un korozijas veida bojājumus. Bez tam novērojami trokšņi, vibrācija, samazinās spiediens. Kavitācija pazemina sūkņa lietderības koeficientu, un sūknis var ātri sabojāties. Lai samazinātu kavitācijas ietekmi, jāveic šādi pasākumi:

- 1) jānodrošina pareizs sūkšanas augstums;
- 2) karsts pārsūkņējama šķidrums jāievada, pastāvot noteiktam virsspiedienam, t. i., sūknis jānovieto zemāk par iesūcamā šķidruma līmeni;
- 3) jāsamazina zudumi sūcējcaurulē, palielinot tās diametru, samazinot izliekumus, notīrot tās iekšējo virsmu;
- 4) jānovērš neblivas vietas sūcējcaurules savienojumu vietās;
- 5) jāielaiž sūcējcaurulē noteikts gaisa daudzums;
- 6) darba rati jāizgatavo no augstvērtīga materiāla, un tiem jābūt gludiem.

Centrbēdzes sūkņa sūkšanas augstums. Sūkšanas augstumu centrēdzes sūkņiem nosaka tāpat kā virzulsūkņiem, sastādot Bernulli vienādojumu sūkšanas daļai pēc vienādojuma (3.16). Centrbēdzes sūkņiem lielums h_{is} parāda zudumus kavitācijas novēršanai. To var aprēķināt šādi:

$$h_{is} = 0,3(Qn^2)^{2/3},$$

kur h_{is} — augstuma zudums kavitācijas novēršanai, m; n — vārpstas apgriezību skaits, s^{-1} .

Lai nodrošinātu pareizu šķidruma iesūkšanu darba ratā, ietilptošā šķidruma spiedienam jābūt lielākam par šķidruma tvaika parciālo spiedienu sūkņēšanas temperatūrā.

Centrbēdzes sūkņiem sūkšanas augstums ir lielāks nekā virzulsūkņiem, jo centrēdzes sūkņiem nav vārstu, kā arī nav inerces zudumu.

Centrbēdzes sūkņa ražīgums. Centrbēdzes sūkņa ražīgums atkarīgs no darba rata ieplūdes vai izplūdes spraugas laukuma un šķidruma ātruma:

$$Q = (\pi D_1 - \delta z) b_1 v_1 \sin \alpha_1 \eta_0 = (\pi D_2 - \delta z) b_2 v_2 \sin \alpha_2 \eta_0, \quad (3.33)$$

kur Q — centrēdzes sūkņa ražīgums, m^3/s ; D_1, D_2 — darba rata iekšējais un ārējais diametrs, m; b_1, b_2 — darba rata ieplūdes un izplūdes kanālu platums, m; v_1, v_2 — šķidruma absolūtais ātrums, tam ieplūstot darba ratā un izplūstot no tā, m/s; δ — lāpstiņas biezums, m; z — lāpstiņu skaits darba ratā; η_0 — tilpuma lietderības koeficients.

— Reizinājums $(\pi D_1 - \delta z) b_1$ vai $(\pi D_2 - \delta z) b_2$ ir darba rata ieplūdes vai izplūdes spraugas laukums, no kura atņemts lāpstiņu aizņemtais laukums.

$v_1 \sin \alpha_1 = v_{1r}$ vai $v_2 \sin \alpha_2 = v_{2r}$ ir šķidruma absolūtā ātruma rādiālās komponentes (sk. 3.13. att.).

Tilpuma lietderības koeficients η_0 liela ražīguma sūkņiem ir 0,95...0,98, maza ražīguma zemspiediena sūkņiem — 0,90...0,95, maza ražīguma augstspiediena sūkņiem — 0,85...0,90.

Centrbēdzes sūkņa ražīgumu aptuveni var aprēķināt šādi:

$$Q = kd^2,$$

kur Q — sūkņa ražīgums, m^3/s ; d — sūkņa spiedcaurules diametrs, m ; k — proporcionalitātes koeficients ($k=1,3 \dots 1,8$, ja $d < 100$ mm; $k=2,0 \dots 2,5$, ja $d > 100$ mm).

Centrbēdzes sūkņa jauda un lietderības koeficients. Centrbēdzes sūkņiem nepieciešamo *jaudu uz vārpstas* aprēķina pēc tādas pašas formulas kā virzuļsūkņiem:

$$N_v = \frac{Q \rho g H_m}{\eta 1000},$$

kur N_v — sūkņa jauda uz vārpstas, kW ; Q — sūkņa ražīgums, m^3/s ; ρ — pārsūknējamā šķidrums blīvums, kg/m^3 ; H_m — manometriskais celšanas augstums, m ; η — kopējais sūkņa lietderības koeficients pēc rūpnīcas datiem, parasti $\eta=0,6 \dots 0,8$, jaunākā veida centrālās sūkņiem η sasniedz 0,92.

Dzinēja jaudu izvēlas ar rezervi, lai dzinēju nodrošinātu pret neparedzētu pārslodzi. Dzinēja jaudu aprēķina šādi:

$$N_{dz} = k \frac{Q \rho g H_m}{\eta 1000},$$

kur N_{dz} — dzinēja jauda, kW .

Koeficients k atkarībā no jaudas uz vārpstas N_v mainās šādi:

- | | |
|--------------------------|-------------------------|
| ja $N_v < 1$ kW, | tad $k=1,3 \dots 1,4$, |
| „ $N_v = 1 \dots 2$ kW, | „ $k=1,2 \dots 1,3$, |
| „ $N_v = 2 \dots 5$ kW, | „ $k=1,15 \dots 1,20$, |
| „ $N_v = 5 \dots 50$ kW, | „ $k=1,10 \dots 1,15$, |
| „ $N_v > 50$ kW, | „ $k=1,05 \dots 1,10$. |

Ja sūknis nav tieši savienots ar elektromotoru, bet piedziņai izmanto pār vadu, tad jāņem vērā pār vada lietderības koeficients.

Centrbēdzes sūkņa raksturlielumi Q , H un N atkarībā no n (proporcionalitātes likums). Centrbēdzes sūkņu ražīgums, celšanas augstums un jauda atkarīgi no darba rata apgriezību skaita. Šo sakarību izsaka *proporcionalitātes likums*. Ja, vārpstai apgriežoties n_1 reižu sekundē, sūkņa ražīgums ir Q_1 , tad saskaņā ar šo likumu — ja vārpstas apgriezību skaits ir n_2 , sūkņa ražīgums ir Q_2 . Matemātiski šo sakarību izsaka šādi:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad \text{jeb} \quad Q_2 = Q_1 \frac{n_2}{n_1}.$$

Sakarību starp sūkņa celšanas augstumu un vārpstas apgriezību skaitu izsaka vienādojums

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \quad \text{jeb} \quad H_2 = H_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2.$$

Sakarību starp sūkņa jaudu un vārpstas apgriezienu skaitu izsaka vienādojums

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3 \quad \text{jeb} \quad N_2 = N_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3.$$

Proporcionalitātes likums paliek spēkā, ja vārpstas apgriezienu skaits nemainās vairāk kā par 20%.

Precizākus datus par sūkņa ražīgumu, jaudu un celšanas augstumu atkarībā no darba rata apgriezienu skaita var iegūt no centrēdzes sūkņa raksturliņņēm.

Centrēdzes sūkņa raksturliķnes. Grafiski attēlotas sakarības starp lielumiem Q , H , N un η sauc par centrēdzes sūkņa raksturliķņēm.

Teorētiski aprēķinātās sūkņa raksturliķnes nav pietiekami precīzas, tādēļ sūkņa raksturliķnes iegūst, sūkņus praktiski pārbaudot rūpnīcā, kur tos izgatavo. Šīs rūpnīcas katram sūknim pievieno sūkņa raksturdiagrammu.

Centrēdzes sūkņa raksturdiagrammā ir šādas liķnes: celšanas augstums atkarībā no ražīguma $H-Q$ (3.14. att. *a*); jauda atkarībā no ražīguma $N-Q$ (3.14. att. *b*) un lietderības koeficients atkarībā no ražīguma $\eta-Q$ (3.14. att. *c*). Sūkņa raksturojumā dažreiz parāda arī pieļaujamo vakuummētrisko sūkšanas augstumu atkarībā no ražīguma $H_p \nu-Q$.

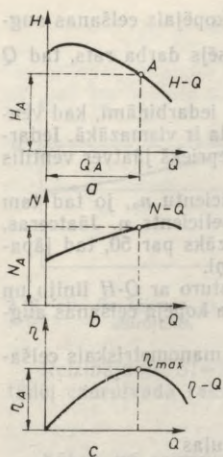
Punkts *A* (3.14. att. *a*) atbilst optimāliem sūkņa darba apstākļiem, jo sūkņa lietderības koeficients (3.14. att. *c*) šinī gadījumā ir maksimālais. Raksturdiagrammā punktu, kas atbilst sūkņa darba parametriem, sauc par *darba punktu*. Sūkni vēlamā darbināt optimālos darba apstākļos. Sūkņa raksturliķnes pieņemts sakopot vienā kopējā diagrammā, norādot apgriezienu skaitu, kuram tās iegūtas.

Centrēdzes sūkņus parasti darbina elektromotori, kuru apgriezienu skaits ir dažāds. Asinhronie elektromotori ir ar šādu apgriezienu skaitu: 2900, 1450, 975, 730, 580, 480, 360 un 290 apgriezienu minūtē. Tādēļ sūkņa darba ratam var būt dažāds apgriezienu skaits atkarībā no tā, ar kādu elektromotoru tas sajūgts.

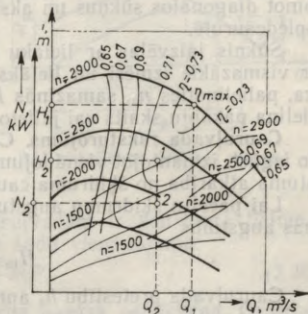
Lai noteiktu sakarību, kāda pastāv starp lielumiem Q , H , N , η un n , lieto sūkņa gliemēzdiagrammu (3.15. att.).

Maksimālais lietderības koeficients η_{\max} atbilst tikai vienam punktam, ja ražīgums ir Q_1 un celšanas augstums H_1 . Ar vienu un to pašu lietderības koeficientu η sūknis var strādāt dažādos apstākļos. Uz to norāda lietderības koeficientu liķnes, kas savieno punktu ģeometriskās vietas, kurām ir vienāds lietderības koeficients.

Gliemēzdiagramma palīdz noskaidrot dažādus sūkņa ekspluatācijas jautājumus. Piemēram, lai nodrošinātu ražīgumu Q_2 un celšanas augstumu H_2 , uz abscisas atliek ražīgumu Q_2 , bet uz ordinātas — celšanas augstumu H_2 un, velkot no šim asim attiecīgos punktus perpendikulus, iegūst punktu *1*, kurš atbilst sūkņa darba punktam un pēc kura var noteikt η_1 un n_1 . Pēc tam kad zināms n_1 , iegūst punktu *2* un nosaka nepieciešamo jaudu N_2 .



3.14. att. Centrālās sūkņa raksturlielnes.



3.15. att. Sūkņa gliemeždiagramma.

Sūkņa ātrgaitas koeficients. Centrālās sūkņus, kas izveidoti dažādiem spiedieniem un ražīgumiem, savstarpēji salīdzina ar tā saucamo *ipatnējo (modeļa) sūkni*, kurš geometriski līdzīgs reālam sūknim un nodrošina celšanas augstumu $H=1$ m un ražīgumu $Q=7,5 \cdot 10^{-2}$ m³/s. Šos parametrus ($H=1$ m, $Q=7,5 \cdot 10^{-2}$ m³/s) ipatnējais sūknis sasniedz tad, kad darba rats izdara n_s apgriezienus minūtē. Lielumu n_s sauc par *ātrgaitas koeficientu*. Tas raksturo ne tikai ipatnējo sūkni, bet arī grupu geometriski līdzīgu sūkņu. Ātrgaitas koeficients ir līdzības kritērijs, kas, vadoties no H un Q vērtībām, rada iespēju izvēlēties attiecīgajam gadījumam vispiemērotāko sūkni.

Sūkņus atkarībā no ātrgaitas koeficienta n_s iedala šādi: *centrālās sūkņi*: lēngaitas — $50 < n_s < 80$; normālgaitas — $80 < n_s < 150$; ātrgaitas — $150 < n_s < 300$; diagonālie — $300 < n_s < 500$ un *aksiālie sūkņi* — $500 < n_s < 1000$.

Katrā sūkņu grupā darba rati ir geometriski līdzīgi, t. i., $\frac{D_2}{D_1} = \text{const}$; $\frac{b_1}{b_2} = \text{const}$; $\frac{\beta_1}{\beta_2} = \text{const}$ (sk. 3.13. att.).

Formulu n_s noteikšanai iegūst no proporcionalitātes likuma:

$$n_s = 0,061 \frac{n \sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad (3.34)$$

Aprēķinot vairākpakāpju sūkņu ātrgaitas koeficientu, celšanas augstuma H vietā jāliek atsevišķa darba rata celšanas augstums.

Piemēram, ja darba ratu skaits ir i un sūkņa kopējais celšanas augstums ir H_k , tad $H = \frac{H_k}{i}$. Ja sūknim ir divpusējs darba rats, tad Q vietā jāliek $Q/2$.

Lēngaitas, normālgaitas un ātrgaitas sūkņi iedarbināmi, kad ventilis spiedcaurulē ir aizvērts, jo, kad $Q=0$, jauda ir vismazākā. Iedarbinot diagonālos sūkņus un aksiālos sūkņus, iepriekš jāatver ventilis spiedcaurulē.

Sūknis jāizvēlas ar lielāku ātrgaitas koeficientu n_s , jo tad tam ir vismazākie izmēri un lielāks lietderības koeficients η . Jāatceras, ka, palielinoties n_s , samazinās H . Ja n_s ir mazāks par 50, tad jāpalielina pakāpju skaits vai jālieto cita veida sūkņi.

Cauruļvada raksturojums. Cauruļvadu raksturo ar Q - H līniju un to iegūst, izmantojot vienādojumu, kurā izteikta kopējā celšanas augstuma atkarība no šķidruma caurteces.

Lai paceltu šķidrumu augstumā H_g , sūkņa manometriskais celšanas augstums

$$H_m = H_g + h_z.$$

Cauruļvada pretestību h_z aprēķina pēc formulas

$$h_z = \Sigma \zeta_{vp} \frac{w^2}{2g} + \lambda \frac{l}{d} \frac{w^2}{2g} = \frac{w^2}{2g} \left(\Sigma \zeta_{vp} + \lambda \frac{l}{d} \right) \quad (3.35)$$

kur h_z — augstuma zudums, m.

Šķidruma ātrumu w var izteikt šādi:

$$w = \frac{4Q}{\pi d^2}. \quad (3.36)$$

Ievietojot vienādojumā (3.35) ātruma izteiksmi (3.36), iegūst, ka

$$h_z = \frac{8Q^2}{\pi^2 d^4 \sigma} \left(\Sigma \zeta_{vp} + \lambda \frac{l}{d} \right).$$

Zudumus vietējo pretestību pārvarēšanai var aizstāt ar ekvivalentu cauruļvada garumu, $\Sigma \zeta_{vp} = k_1 l$, tad

$$h_z = \frac{8Q^2}{\pi^2 d^4 g} \left(k_1 l + \lambda \frac{l}{d} \right) = \left(k_1 + \frac{\lambda}{d} \right) \frac{8lQ^2}{\pi^2 d^4 g}$$

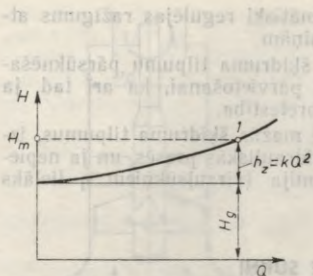
Izteiksme $\left(k_1 + \frac{\lambda}{d} \right) \frac{8}{\pi^2 d^4 g} = S$, tādēļ $h_z = SlQ^2$.

Manometriskais celšanas augstums

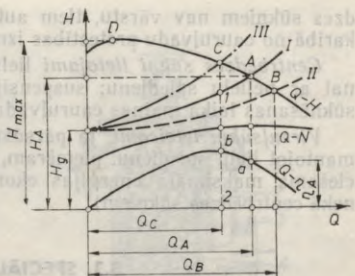
$$H_m = H_g + SlQ^2, \quad (3.37)$$

kur H_m — manometriskais sūkņa celšanas augstums, m.

No vienādojuma (3.37) redzams, ka cauruļvada raksturojuma grafiskais attēlojums ir parabola ar virsotni H_g koordinātas sākumā, jo, kad $Q=0$, tad $H_m = H_g$ (3.16. att.).



3.16. att. Cauruļvada grafiskais raksturojums.



3.17. att. Sūkņa darbības režīms.

Reizinājums $Sl=k$ dotajam cauruļvadam ir konstants lielums, tādēļ cauruļvada raksturošanai lieto šādu vienādojumu:

$$H_m = H_g + kQ^2. \quad (3.38)$$

Sūkņa un cauruļvada kopējā darba punkta noteikšana. Centrēdzes sūkņa darbs atkarīgs no spiedcaurules raksturojuma. Kopējā darba punkta noteikšanai uz sūkņa raksturdiagrammas tādā pašā mērogā uzzīmē cauruļvada raksturliknes.

Sūkņa raksturliknes $Q-H$ un cauruļvada raksturliknes I krustpunktus A (3.17. att.) ir **kopējais darba punkts** ar atbilstošu ražīgumu Q_A un celšanas augstumu H_A . Ja lieto cauruļvadu ar mazāku pretestību (3.17. att. likne II), tad kopējais krustpunkts atrodas pa labi no punkta A punktā B . No tā var secināt, ka sūkņa ražīgums atkarīgs no cauruļvada pretestības ($Q_B > Q_A$). Dotajam cauruļvadam punkts A atbilst sūkņa maksimālajam ražīgumam, jo, pieaugot šķidruma caurtecei, palielinās cauruļvada pretestība (pa labi no punkta A pa likni I), bet sūkņa radītais spiediens samazinās (likne $Q-H$ virzīta uz leju no punkta A). Krustpunkts A atbilst stāvoklim, kad ventiliis spiedcaurulē pilnīgi atvērts. Aizverot ventili, samazinās ražīgums, bet palielinās celšanas augstums, tādēļ punkts A pārvietojas pa kreisi. Ja punkts A atrastos stāvoklī C , tad ražīgums būtu samazinājies līdz Q_C .

Punktā C lietderīgi izmantoto augstumu izsaka nogrieznis $1-2$. Augstumu $1-C$ patērē spiedcaurulē esošā ventiļa pretestības pārvarēšanai. Punkti a, b uz līknes $Q-\eta$ parāda sūkņa lietderības koeficienta izmaiņu. Uz līknes $Q-N$ iegūst jaudas izmaiņu. Ar spiedcaurules ventili iespējams regulēt ražīgumu līdz punktam D (H_{max}). Aiz šī punkta sākas sūkņa nestabilās darbības josla, kurā sūkni ilgstoši darbināt nav ieteicams.

Centrbēdzes sūkņu salīdzinājums ar virzuļsūkņiem. Centrbēdzes sūkņiem salīdzinājumā ar virzuļsūkņiem ir šādas priekšrocības: centrēdzes sūkņi aizņem mazāk vietas, tie tieši savienojami ar elektromotoru, ir lētāki, un to ekspluatācijas izdevumi ir mazāki. Centrbē-

dzes sūkņiem nav vārstu, tiem automātiski regulējas ražīgums atkarībā no cauruļvadu pretestības izmaiņām.

Centrbēdzes sūkņi lietojami lielu šķidruma tilpumu pārsūkņēšanai ar nelielu spiedienu; suspensiju pārvietošanai, kā arī tad, ja sūkņēšanas laikā mainās cauruļvada pretestība.

Virpuļsūkņi ieteicami, ja pārsūkņē mazus šķidruma tilpumus, izmantojot lielu spiedienu, piemēram, hidrauliskās presēs, un ja nepieciešama maksimāla enerģijas ekonomija (virpuļsūkņiem η lielāks nekā centrālās sūkņiem).

3.3. SPECIĀLIE SŪKŅI

Virpuļsūkņi. Pēc konstruktīvā izveidojuma virpuļsūkņi atgādina centrālās sūkņus, bet atšķiras no tiem pēc darbības principa. Virpuļsūkņos šķidruma ievada un aizvada no augšas (3.18. att.). Šķidrums, nokļūstot uz lāpstiņas, centrālās spēka ietekmē iegūst lielu ātrumu (kinētisko enerģiju) un tiek ievadīts kanālā, kur šķidruma kinētiskā enerģija pārveidojas potenciālajā enerģijā (paaugstinās spiediens); pēc tam šķidrums atkal nokļūst uz lāpstiņas, un cikls atkārtojas. Tādējādi darba rata viena apgrieziena laikā viena un tā pati šķidruma daļa atkārtoti nonāk darba ratā un katru reizi paaugstinās šķidruma spiediens (tāpat kā tas ir vairākpakāpju centrālās sūkņos). Virpuļsūkņiem salīdzinājumā ar centrālās sūkņiem celšanas augstums ir 3...5 reizes lielāks.

Sprauga starp darba ratu un apvalku nedrīkst būt lielāka par 0,15...0,2 mm.

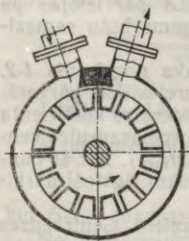
Samazinot ražīgumu, virpuļsūkņiem strauji pieaug celšanas augstums un jauda. Tā rezultātā var rasties elektromotora pārslodze, cauruļvadu un iekārtas bojājumi. Tādēļ šiem sūkņiem izveido papildu cauruli, kura savieno spiedcauruli ar sūcējcauruli un kurā ievieto drošības ventili. Pa šo papildu cauruli lieko šķidrumu novada atpakaļ sūcējcaurulē. Sūkņi iedarbinot, iepriekš atver spiedcaurules ventili.

Virpuļsūkņiem ātrgaitas koeficients $n_s = 10 \dots 25$, t. i., ievērojami zemāks nekā centrālās sūkņiem.

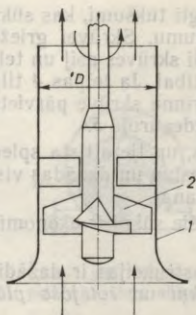
Virpuļsūkņu lietderības koeficients $\eta = 0,25 \dots 0,4$. Zemais lietderības koeficients izskaidrojams ar šķidruma virpuļveida kustību sūkņī.

Virpuļsūkņus lieto mazviskozu šķidrumu sūkņēšanai, kā arī tādu šķidrumu sūkņēšanai, kuri nesatur abrazīvas daļiņas.

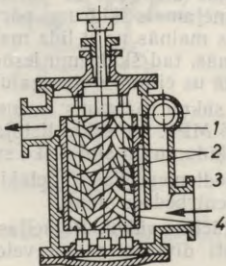
Aksiālie sūkņi. Aksiālos sūkņus (3.19. att.) izgatavo ar horizontālu, vertikālu vai slīpu vārpstu. Atstarpe starp darba ratu 2 un sūkņa apvalku 1 ir 0,001 no apvalka iekšējā dia-



3.18. att. Virpuļsūkņa shēma.



3.19. att. Aksiālā sūkņa shēma.



3.20. att. Skrūvju sūkņa shēma.

metra D . Lieliem sūkņiem izveido grozāmas lāpstiņas; tad iespējams plašā intervālā mainīt sūkņa ražīgumu.

Aksiālie sūkņi lietojami nelieliem spiedieniem (0,1...0,15 MPa). Sūkšanas spiediens tiem mazs, aptuveni 0,01, retāk līdz 0,03 MPa. Kopējo celšanas augstumu iespējams palielināt, iegremdējot sūkni zem šķidruma līmeņa. Sūkņa ražīgums $Q=0,1...50 \text{ m}^3/\text{s}$. Aksiālajiem sūkņiem raksturīgs vislielākais ātrgaitas koeficients n_s . Lietderības koeficients sasniedz 0,9.

Ķīmiskajā rūpniecībā aksiālos sūkņus dažreiz lieto par cirkulācijas sūkņiem ietvaicētajos un netīru šķidrumu pārvietošanai.

Skrūvju sūkņi. Skrūvju sūknis (3.20. att.) sastāv no vadošās skrūves 1 un divām noslēdzošām (vadāmām) skrūvēm 2, kas ievietotas sūkņa apvalkā 4 īpaši izveidotā rotācijas telpā 3.

Noslēdzošo skrūvju diametri ir mazāki par vadošās skrūves diametru. Skrūves ir sazobē un rotācijas telpu garenvirzienā sadala vairākās noslēgtās joslās. Skrūvju vītnes ir īpaša veida un ar dažādu virzienu. Ja vadošā skrūve ir ar labo vītņi, tad noslēdzošajām skrūvēm ir kreisā vītne. Noslēdzošās skrūves rotācijas kustību iegūst pārsūknējamā šķidruma spiediena rezultātā.

Skrūvēm griežoties, pārsūknējamais šķidrums pārvietojas paralēli skrūvju asīm. Noslēdzošās skrūves izmanto par blīvējumu, kas neļauj šķidrumam tieši plūst no iesūknēšanas puses uz spiedcauruļes pusi.

Skrūvju sūkņus lieto viskozu šķidrumu pārsūknēšanai. Šo sūkņa ražīgums sasniedz $8 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ un spiediens — 17,5 MPa. Skrūvēm apgriezīgu skaits ir līdz 50 s^{-1} . Sūkņa ražīgums praktiski nemainās atkarībā no spiediena. Sūkņi darbojas klusi, un to lietderības koeficients sasniedz 0,8.

Vienskrūves sūknis. Sūkņa apvalkā 1 (3.21. att.) izveidots profilēts cilindrs 2, kurā ievietota īpaši izveidota skrūve 3. Starp

skrūves un cilindra virsmām veidojas noslēgti tukšumi, kas sūkņēšanas laikā aizpildās ar pārsūkņējamo šķidrumu. Skrūvei griežoties, pārsūkņējamais šķidrums pārvietojas paralēli skrūves asij un telpas 4 tilpums mainās no 0 līdz maksimālajai vērtībai. Ja telpas 4 tilpums palielinās, tad šķidrumu iesūc. Iesūkto šķidrumu skrūve pārvieto ass virzienā uz cilindra otru galu un ievada spiedcaurulē 5.

Šo sūkņu ražīgums sasniedz $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, un tie attīsta spiedienu līdz 2,5 MPa. Šie sūkņi lietojami netīru, agresīvu un dažādas viskozitātes šķidrumu un sintētisko sveķu pārsūkņēšanai.

Spiedieniem, kas ir lielāki par 1,0 MPa, šie sūkņi ir ekonomiskāki nekā centrālās sūkņi.

Rotācijas sūkņi. Rotācijas sūkņi pēc konstrukcijas ir dažādi. Šeit aplūkoti divi šo sūkņu veidi: *zobratu sūkņi* un *rotējošo plāksņu sūkņi*.

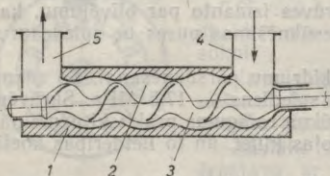
Zobratu sūknis sastāv no apvalka (statora) 1 un diviem sazobē esošiem zobratiem (rotoriem) 2 (3.22. att.). Sūknim darbojoties, zobratī griežas katrs uz savu pusi un sadala iekšējo apvalka veidoto telpu divās daļās. No telpas 3 pārsūkņējamo šķidrumu, kas ietverts starp zobrata zobiem, pārvieto uz augšu — uz telpu 4. Tā kā zobratī cieši piekļaujas apvalkam, šķidrums no telpas 4 nespēj nokļūt atpakaļ telpā 3. Tādēļ telpā 3 rodas retinājums un pārsūkņējamais šķidrums pa sūcējcauruli pieplūst nepārtraukti. Telpā 4 nepārtraukti ieplūst šķidrums, palielinās spiediens, un šķidrums pa spiedcauruli aizplūst patērētājam.

Zobratu sūkņa ražīgumu aprēķina pēc formulas

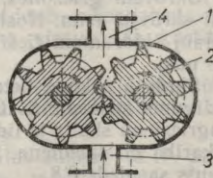
$$Q = 2Vzn\eta_1, \quad (3.39)$$

kur Q — sūkņa ražīgums, m^3/s ; V — iedobumu tilpums starp diviem zobiem, m^3 ; z — starpzobu iedobumu skaits vienam zobratam; n — apgriezību skaits sekundē, s^{-1} ; η_1 — lietderības koeficients, parasti 0,6...0,8, pat līdz 0,95.

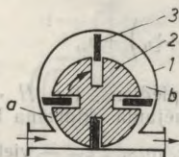
Zobratu sūkņu ražīgums sasniedz $5,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ($20 \text{ m}^3/\text{h}$), bet spiediens — līdz 2,5 MPa. Šie sūkņi ir reversīvi (darbināmi uz abām pusēm). Zobratu sūkņus lieto eļļu un citu viskozu šķidrumu pārsūkņēšanai.



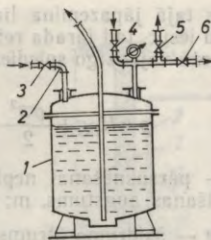
3.21. att. Vienskrūves sūkņa shēma.



3.22. att. Zobratu sūkņa shēma.



3.23. att. Rotējošo plākšņu sūkņa shēma.



3.24. att. Montežū shēma.

Rotējošo plākšņu sūknis sastāv no apvalka 1 un ekscentriski ievietota rotora 2, kura spraugās atrodas plāksnes 3 (3.23. att.). Rotējošo plākšņu sūkņa darbība pamatojas uz to, ka starp rotējošām plāksnēm, apvalku un rotoru izveidojas telpa, kuras daļa a arvien palielinās, un līdz ar to rodas retinājums, bet telpas daļa b samazinās un spiež šķidrumu spiedcaurulē. Šādi sūkņi rada spiedienu līdz 2,0 MPa, un to ražīgums sasniedz $6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ (22 m^3/h).

Rotējošo plākšņu sūkņus lieto tīru, dažādas viskozitātes šķidrumu pārsūkņēšanai. Rotācijas sūkņi šķidrumu pievada vienmērīgi, tiem nav vārstu, un tie ir kompakti.

Montežū (monžusi). Montežū (3.24. att.) lieto agresīvu šķidrumu un suspensiju pārsūkņēšanai. Šīm iekārtām ir vienkārša uzbūve. Montežū var būt periodiskas un nepārtrauktas darbības. Nepārtrauktas darbības montežū sauc par *pulsometriem*.

Montežū sastāv no hermētiski noslēgtas tvertnes 1, kurā ievada pārsūkņēšanai paredzēto šķidrumu. Ja šķidrums tvertnē *ieplūst ar paštecī* pa caurulvadu 2, tad jābūt atvērtiem ventiļiem 3 un 6. Šķidrumam ieplūstot tvertnē, gaiss caur ventiļi 6 izplūst atmosfērā. Ja šķidrumu *iesūc* montežū iekārtā, tad jābūt atvērtiem ventiļiem 3 un 5. Ventilis 5 savieno tvertni ar vakuumsūkni. Kad montežū piepildīts ar pārsūkņējamo šķidrumu, tad, atverot ventiļi 4, tvertnē ievada saspīestu gaisu, līdz sasniedz darba spiedienu 0,3...0,4 MPa.

Pārsūkņējot šķidrumu, kura tvaiki, savienojoties ar gaisu, rada eksplozīvus maisījumus, saspīesta gaisa vietā lieto inertas gāzes — slāpekli, oglekļa dioksīdu u. c. Ja pārsūkņējamam šķidrumam pieļaujama kondensāta piejaukšanās, gaisa vietā lieto ūdens tvaiku. Kad viss šķidrums aizvadīts patērētājam, no tvertnes caur ventiļi 6 jāizvada saspīestais gaiss. Ja pārsūkņē indīgus vai eksplozīvus šķidrumus, tad gāzes, kas satur šķidruma tvaikus, vispirms laiž cauri sorbcijas iekārtai, kura saista šos tvaikus, un tikai pēc tam izvada atmosfērā.

Montežū lietderības koeficients ir zems — 0,15...0,20. Tas ir tādēļ, ka pirms montežū tvertnē ievada pārsūkņējamo šķidrumu

spiediens tajā jāpazemina līdz atmosfēras spiedienam, turpreti, ja šķidrumu iesūc, tad jārada retinājums.

Montežū vajadzīgo spiedienu aprēķina pēc formulas

$$p = H\rho g + \frac{\rho\omega^2}{2} \left(1 + \sum_1^n \zeta_{vp} + \zeta_b \right) + p_1, \quad (3.40)$$

kur p — pārsūkņēšanai nepieciešamais spiediens, Pa; H — šķidruma celšanas augstums, m; ρ — pārsūkņejamā šķidruma blīvums, kg/m³; ω — šķidruma ātrums spiedcaurulē, m/s; $\sum_1^n \zeta_{vp}$ — vietējo pretestību koeficientu summa; ζ_b — berzes koeficients spiedcaurulē; p_1 — virsspiediens tvertnē, kurā pievada šķidrumu, Pa.

Strūklas sūkņi. Strūklas sūkņos darbīgā viela ir ūdens, tvaiks vai gaiss. Atkarībā no tā, kādu vielu lieto, šos sūkņus iedala ūdensstrūklas, tvaika strūklas un gaisa strūklas sūkņos. Strūklas sūkņus, kas šķidrumu tikai iesūc, sauc par *ežektoriem*, bet šķidruma sūkšanai un spiešanai paredzētos sūkņus — par *inžektoriem*.

Ežektorā (3.25. att.) tvaiku (ūdeni) ievada sprauslā 1, kur tas iegūst lielu ātrumu, un, izplūstot no tās, sprauslu aptverošajā telpā 2 rada retinājumu. Tā rezultātā šķidrumu iesūc saplūdes konusā 3 un pa sūcējcauruli 5 šķidrumu nepārtraukti pieplūst klāt, bet pa cauruli 4 pārsūkņejamais šķidrumus kopā ar kondensātu tiek aizvadīts. Šādu sūkņu lietderības koeficients ir zems — 0,10...0,25. Ežektorus lieto ūdens izsūkņēšanai no pagrabjiem, būvbedrēm.

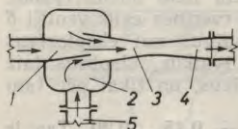
Inžektorā (3.26. att.) pa cauruļvadu 1 ievada tvaiku, tā daudzumu regulējot ar ventili 2. Sprauslā 3 tvaiks iegūst lielu ātrumu un ieplūst saplūdes konusā 4, kur tas sajaucas ar pārsūkņejamo šķidrumu un kopā ar to aizplūst uz difuzoru 5. Tajā plūsmas kinētiskā enerģija pārvēršas potenciālajā enerģijā (palielinās spiediens). Plūsmas spiediens aiz difuzora pārsniedz tvaika spiedienu, tam ieplūstot inžektorā. Tālāk šķidruma plūsma paceļ vārstu 6 un ieplūst spiedcaurulē.

Inžektoram uzsākot darbību, ieplūstošais tvaiks gaisu izpūš pa cauruli 8 caur vārstu 7. Pieplūstošais tvaiks kondensējas, rodas retinājums, un tādēļ pa sūcējcauruli 9 pieplūst pārsūkņejamais šķidrumus. Tvaikam kondensējoties, pārsūkņejamā šķidruma temperatūra pieaug līdz 70...90°C.

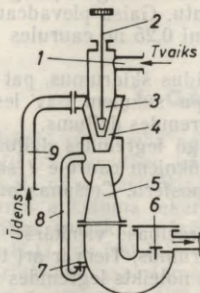
Inžektorus izdevīgi lietot, ja pieļaujama pārsūkņejamā šķidruma sasīšana un sajaukšanās ar kondensātu.

Tādēļ inžektorus parasti lieto tvaika katlu barošanai.

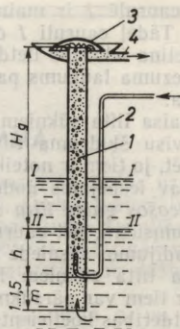
Gaisa lifta sūkņi. Šie sūkņi darbojas pēc savienoto trauku principa. Pārsūkņejamā šķidrumā noteiktā dziļumā iegremdē cauruli 1 (3.27. att.). Tās apakšējā galā ievadīta caurule 2 saspīstā gaisa pievadīšanai. Gaiss, sajaucoties ar šķid-



3.25. att. Ežektora shēma.



3.26. att. Inžektora shēma.



3.27. att. Gaisa lifta sūkņa shēma.

rumu, rada maisījumu, kas mazāk blīvs par to šķidrumu, kurš atrodas ap cauruli 1. Tā rezultātā gaisa un šķidruma maisījums caurulē 1 paceļas noteiktā augstumā. Gaisu var pievadīt sīku burbulišu veidā, laižot to pa caurumotu uzgali vai arī pa vaļēju caurules 2 galu. Ja gaisu pievada pa cauruli 2, tad gaiss, ceļoties pa cauruli 1 uz augšu, līdzīgi virzulim bīda šķidrumu uz augšu. Caurule 1 augšgalā beidzas ar īpašu separatoru 3, kurā paceltais šķidrums atbrīvojas no gaisa un tālāk aizplūst pa cauruli 4.

Lai sūknis normāli darbotos, caurule 1 jāiegremdē noteiktā dziļumā, ko var aprēķināt pēc šādas formulas:

$$\frac{h}{h+H_g}=0,70 \dots 0,35.$$

Sūknēšanai vajadzīgo gaisa tilpumu (reducētu uz atmosfēras spiedienu) kubikmetros gaisa uz 1 m³ ūdens var aprēķināt šādi:

$$V=1,1 \frac{H_g(h+10)}{10h}. \quad (3.41)$$

Formula (3.41) izmantojama, ja H_g+h nepārsniedz 100...150 m.

Nepieciešamo gaisa spiedienu var noteikt pēc formulas

$$p=h\rho g+1000h_z g,$$

kur p — nepieciešamais gaisa spiediens ieklūdē, Pa; h — caurules iegremdes dziļums, m; h_z — hidrauliskie zudumi gaisa liftā, m H₂O; ρ — šķidruma blīvums, kg/m³; g — brīvās krišanas paātrinājums, m/s².

Caurules 1 šķērsriezuma laukumu var noteikt, pieņemot, ka gaisa un šķidruma maisījuma ātrums 3...5 m/s. Plūstošā maisījuma

ātrums caurulē 1 ir mainīgs gaisa izplešanās dēļ — 2,7...7 m/s izplūdē. Tādēļ cauruli 1 dažreiz gatavo ar mainīgu šķērsriezumu; tas palielina iekārtas lietderības koeficientu. Gaisa pievadcaurules 2 šķērsriezuma laukums parasti ir aptuveni 0,25 no caurules 1 šķērsriezuma.

Ar gaisa lifta sūkņiem pārsūknē dažādus šķidrumus, pat skābes. Tomēr visu šķidruma tilpumu ar šī tipa sūkņiem nav iespējams pārsūknēt, jo tiem ir noteikts caurules iegremdes dziļums.

Ja nav iespējams nodrošināt vajadzīgo iegremdes dziļumu, var lietot *sūcošos gaisa lifta sūkņus*. Šiem sūkņiem caurule 1 savienota ar vakuumsūkni, bet caurule 2 — ar atmosfēru. Celšanas augstums šādos gadījumos sasniedz 20 m.

Gaisa lifta sūkņiem ir šādas priekšrocības: vienkāršs izveidojums; ar tiem var pārsūknēt karstus šķidrumus. Tiem ir arī trūkumi: zems lietderības koeficients; nepieciešams noteikts iegremdes dziļums un vajadzīgs kompresors.

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

4. GĀZU SASPIEŠANA

Ķīmiskajā rūpniecībā gāzes vai gaisu saspiež, lai tās uzglabātu, pārvietotu pa caurulēm, kā arī maisīšanai, šķidru materiālu izsmidzināšanai, gāzu sašķidrināšanai, gāzu maisījuma sadalīšanai, izmantošanai aukstuma iekārtās, reakciju norises paātrināšanai u. c. Rūpniecības apstākļos gāzēm spiedienu paaugstina no dažiem milimetriem H_2O līdz 500 MPa un vairāk.

Atkarībā no saspiežamās gāzes beigu spiediena p_2 un sākuma spiediena p_1 attiecības šim nolūkam lietojamās iekārtas iedala:

1) *ventilatoros* — $\frac{p_2}{p_1} = 1 \dots 1,1$, kuros maksimālais spiediens nepārsniedz 0,01 MPa;

2) *gāzpūtējos* — $\frac{p_2}{p_1} = 1,1 \dots 3$, kuros beigu spiediens ir 0,1... 0,3 MPa;

3) *kompresoros* — $\frac{p_2}{p_1} = 3 \dots 2550$, kuros spiediens sasniedz 255 MPa.

Ventilatorus un gāzpūtējus, kas tikai nosūc gāzes vai gaisu, sauc par *ekshaustoriem*. Ekshaustori spēj radīt retinājumu līdz 0,001 MPa (90%). Augstāka vakuuma iegūšanai lieto vakuumsūkņus, kas pēc spiedienu attiecības $\frac{p_2}{p_1}$ pieskaitāmi pie kompresoriem.

Kompresori un gāzpūtēji atkarībā no darbības principa iedalās

- 1) *virzuļkompresoros* (ražīgums līdz 8,3 m³/s, beigu spiediens līdz 255 MPa rūpniecības iekārtās un līdz 500 MPa laboratorijas iekārtās);

- 2) *rotācijas kompresoros* (ražīgums līdz 1,1 m³/s, spiediens 1 MPa);

- 3) *turbokompresors* (liels ražīgums — līdz 25 m³/s, neliels spiediens — līdz 2,5 MPa);

- 4) *strūklas kompresoros*.

4.1. VIRZUĻKOMPRESORI

Pēc darbības veida virzuļkompresori iedalāmi *vienpusējas darbības* un *abpusējas darbības kompresoros*. Abpusējas darbības virzuļkompresori atgādina abpusējas darbības virzuļsūkņus. Virzulim 2 pārvietojoties pa labi (4.1. att.) un cilindra daļā *A* sasniedzot spiedienu p_1 , atveras vārsts *I* un gāze ieplūst cilindrā. Šo procesu sauc par gāzes iesūkšanu. Cilindra daļā *B* šajā laikā gāzi saspiež līdz

spiedienam p_2 . Tad atveras vārsts 3 un gāze nokļūst spiedcaurulē 4. Virzulim pārvietojoties atpakaļ, norisinās pretējs process. Kompresora darbības gaita parādīta indikatora diagrammā.

Kompresora darbības indikatora diagramma. Indikatora diagrammu iegūst, attēlojot gāzu saspišanu virzuļkompresorā p - v koordinātās, kur uz abscisas atlikts gāzes tilpums, bet uz ordinātas — gāzes spiediens (4.2. att.).

Virzuļkompresorā notiek *gāzes iesūkšana, gāzes saspišana un gāzes izplūšana* no cilindra.

Lai iegūtu teorētisko indikatora diagrammu, pieņem, ka kompresoram nav kaitīgās telpas, t. i., pēc saspišanas gājiena cilindrā nepaliek gāze. Gāzi iesūc cilindrā un izspiež no tā konstantos spiedienos p_1 un p_2 .

Ja virzulis maina stāvokli no 1 uz 2 (pa labi), tad gāzi iesūc cilindrā ar spiedienu p_1 ; indikatora diagrammā iesūkšanu attēlo nogrieznis 1-2. Virzuļa stāvoklis 2 ir galējais stāvoklis (pa labi). Sasniedzot šo stāvokli, virzulis sāk pārvietoties pa kreisi un spiež iesūkto gāzi. Kompresoros gāzi iespējams saspiest *izotermiski* (likne 2-a), *adiabātiski* (likne 2-b) un *politropiski* (likne 2-3).

Ja gāzi spiež līdz spiedienam p_2 , vārsts 4 atveras un gāzi ar konstantu spiedienu p_2 izspiež no cilindra spiedcaurulē. Virzulis šinī laikā no stāvokļa 3 (vai stāvokļiem a, b atkarībā no gāzes saspišanas veida) pārvietojas stāvoklī 4. Pēc tam gāzi atkal iesūc (no stāvokļa 1), spiež, izspiež utt.

Darbs, ko patērē kompresorā, vārpstai apgriežoties vienu reizi, summējas šādi:

$$A = A_{ies} + A_{sp} + A_{izs}, \quad (4.1)$$

kur A_{ies} — darbs, kas patērēts, gāzi iesūcot (ekvivalents laukumam 1-2-7-5); A_{sp} — darbs, kas patērēts, gāzi spiežot (ekvivalents laukumam 6-3-2-7); A_{izs} — darbs, kas patērēts, gāzi izspiežot (ekvivalents laukumam 5-4-3-6).

Pieņem, ka virzuļa darbs, kas nepieciešams 1 kg gāzes saspišanai, ir pozitīvs, bet darbs, kas tiek veikts, gāzei izplešoties, ir negatīvs. Tad

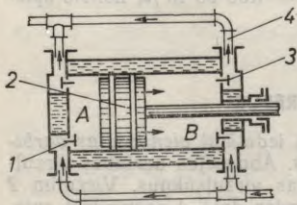
$$A_{ies} = -p_1 v_1 \text{ un } A_{izs} = p_2 v_2,$$

kur A_{ies}, A_{izs} — darbs, kas patērēts, gāzi iesūcot un izspiežot, J/kg; v_1 un v_2 — gāzes īpatnējais tilpums pirms un pēc saspišanas, m^3/kg ; p_1 un p_2 — absolūtais spiediens pirms un pēc saspišanas, Pa; A_{sp} — darbs, kas patērēts, gāzi spiežot, J/kg.

Kopējais darbs, ko patērē gāzes saspišanai no spiediena p_1 līdz p_2 , ir šāds:

$$A = A_{sp} + p_2 v_2 - p_1 v_1, \quad (4.2)$$

kur A — kopējais darbs gāzes saspišanai, J/kg.



4.1. att. Abpusējās darbības kompresora shēma.

Gāzes saspiešanai nepieciešamais darbs A_{sp} atkarīgs no saspiešanas rakstura — vai gāzes saspiešana ir izotermiska, adiabatiska vai politropiska process.

Izotermiskā saspiešana.
Gāzes izotermiskā saspiešana notiek *nemainīgā temperatūrā*, $T = const$.

Termodinamikā gāzes saspiešanas izotermisko procesu raksturo vienādojums

$$pv = const \quad \text{jeb}$$

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 = const.$$

Izotermiskam procesam vienādojums (4.1) iegūst šādu veidu:

$$A = A_{sp}.$$

Darbs, ko patērē, gāzi saspiežot izotermiski, izsakāms šādi:

$$A_{iz} = A_{sp} = p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1}. \quad (4.3)$$

kur A_{iz} — izotermiskai saspiešanai patērētais darbs, J/kg.

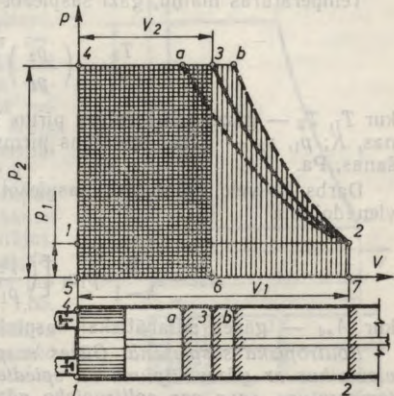
Adiabatiskā saspiešana. Gāzes adiabatiskā saspiešana notiek tad, ja procesā radies *siltums netiek aizvadīts*. Tā rezultātā saspiežamās gāzes temperatūra paaugstinās no T_1 līdz T_2 .

Adiabatisko procesu izsaka vienādojums

$$pv^k = const,$$

kur k ir adiabatās pakāpe, $k = c_p/c_v$ (c_p, c_v — gāzes īpatnējā siltumietilpība *nemainīgā spiedienā un tilpumā*, kJ/(kg·K)). Lielumi c_p un c_v mainās atkarībā no temperatūras, bet reālām gāzēm arī no spiediena, tādēļ arī adiabatās pakāpe k mainās atkarībā no temperatūras un spiediena.

Tehniskos aprēķinos pieņem, ja nelielos temperatūru intervālos lielumi c_p un c_v ir *nemainīgi*, tad arī k ir konstants lielums. Adiabatās pakāpi k nosaka pēc gāzu molārās siltumietilpības c_{Mp} un c_{Mv} . Vienatoma gāzēm $c_{Mv} = 12,6$ kJ/(mol·K), $c_{Mp} = 21$ kJ/(mol·K), $k = c_{Mp}/c_{Mv}$, $k = 21/12,6 = 1,67$; divatomu gāzēm $c_{Mv} = 21$ kJ/(mol·K), $c_{Mp} = 29,4$ kJ/(mol·K), $k = 29,4/21 = 1,4$; trīsatomu un daudzatomu gāzēm $c_{Mv} = 29,4$ kJ/(mol·K), $c_{Mp} = 37,8$ kJ/(mol·K), $k = 37,8/29,4 = 1,29$.



4.2. att. Virzuļkompresora teorētiskā indikatora diagramma.

Temperatūras maiņu, gāzi saspiežot adiabatiski, var izteikt šādi:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (4.4)$$

kur T_1, T_2 — gāzes temperatūra pirms saspiešanas un pēc saspiešanas, K; p_1, p_2 — gāzes spiediens pirms saspiešanas un pēc saspiešanas, Pa.

Darbs, ko veic, adiabatiski saspiežot 1 kg gāzes, aprēķināms pēc vienādojuma

$$A_{ad} = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (4.5)$$

kur A_{ad} — gāzes adiabatiskai saspiešanai patērētais darbs, J/kg.

Politropiskā saspiešana. Gāzes saspiešanas reālo procesu, kurā vienlaikus ar gāzes tilpuma un spiediena maiņu mainās arī gāzes temperatūra, sauc par politropisko gāzes saspiešanu. Politropa indikatora diagrammā parasti atrodas starp adiabatū un izotermu (var būt arī stāvāka par adiabatū). Tās vienādojums

$$p v^n = \text{const},$$

kur n — politropas pakāpe.

Darbs, ko patērē 1 kg gāzes politropiskai saspiešanai, izsakāms šādi:

$$A_{pol} = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (4.6)$$

kur A_{pol} — politropiskai gāzes saspiešanai patērētais darbs, J/kg.

Gāzes temperatūra politropiskās saspiešanas beigās nosakāma pēc vienādojuma

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (4.7)$$

Teorētiskā indikatora diagramma atkarībā no gāzes saspiešanas veida parādīta 4.2. attēlā. Gāzes izotermiskās saspiešanas procesu raksturo laukums 1-2-a-4, politropiskās saspiešanas procesu — laukums 1-2-3-4 un adiabatiskās saspiešanas procesu — laukums 1-2-b-4.

Indikatora diagrammas laukums ekvivalents darbam, ko patērē gāzes saspiešanai. Salīdzinot indikatora diagrammas laukumus, kas atbilst gāzes izotermiskai, politropiskai un adiabatiskai saspiešanai, redzams, ka vislielākais laukums raksturo gāzes adiabatisko saspiešanu un vismazākais laukums — izotermisko saspiešanu. No tā secināms, ka vismazāko darbu patērē, gāzi saspiežot izotermiski, bet vislielāko darbu, — gāzi saspiežot adiabatiski.

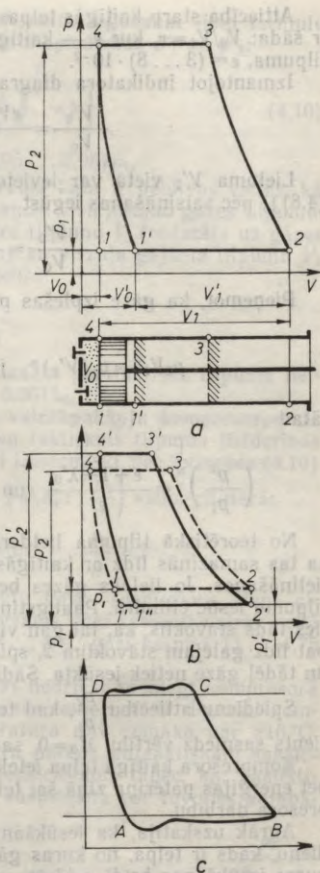
Lai politropu tuvinātu izotermi, kompresora cilindru dzesē, ierīkojot ap cilindru ūdens apvalku. Tas vajadzīgs arī tādēļ, lai augstā temperatūrā cilindrā nedegstu eļļa. Dzesēšanai jābūt nepārtrauktai. Ja dzesēšana noris labi, politropa tuvojas izotermi un politropas pakāpe n ir 1,2... 1,3. Tālāk samazināt politropas pakāpi n neizdodas, jo dzesēšanas virsma ir ierobežota. Gāzspūētājs, ko parasti nedzesē, gaisa saspiešana notiek virs adiabatās un politropas pakāpe $n=1,45 \dots 1,55$.

Par ideālu gāzes saspiešanu kompresoros uzskata izotermisko saspiešanu, bet gāzspūētājs — adiabatisko saspiešanu.

Reālais gāzu saspiešanas process virzuļkompresorā. Kompresora reālā indikatora diagramma atšķiras no teorētiskās, jo starp cilindru vāku un virzuļa galējo stāvokli paliek telpa, kuras tilpums ir 3... 8% no virzuļa aprakstītā tilpuma. Šo telpu V_0 (4.3. att.) sauc par *kaitīgo telpu*, un to veido vārsti, sūcējkanāli, spiedkanāli un telpa starp virzuli un cilindra vāku. Bez tam kompresoros gāzes iesūkšanas un izspiešanas sākumā novērojamas spiediena svārstības. Arī neblīvas vietas vārstos un gar virzuli ietekmē indikatora diagrammu.

Kaitīgās telpas lielumu var noteikt pēc eļļas tilpuma, kuru ievada cilindrā, kad virzulis atrodas pa kreisi galējā stāvoklī I (4.3. att. a). Virzulim pārvietojoties pa labi, iesūkšana tūlīt nesākas, jo gāze, kas palikusi kaitīgajā telpā, izplešas. Iesūkšana sākas tikai tad, kad virzulis atrodas stāvoklī I' . Tādēļ cilindrā iesūktais gāzes tilpums ir V'_1 , nevis virzuļa gājiena tilpums V_1 .

Attiecība $V'_1/V_1 = \lambda'_0$ (4.8) izsaka *teorētisko tilpuma lietderības koeficientu*.



4.3. att. Virzuļkompresora indikatora diagramma.

Attiecība starp kaitīgās telpas tilpumu un virzuļa gājienu tilpumu ir šāda: $V_0/V_1 = \varepsilon$, kur ε — kaitīgās telpas daļa no virzuļa aprakstītā tilpuma, $\varepsilon = (3 \dots 8) \cdot 10^{-2}$.

Izmantojot indikatora diagrammu (4.3. att. a), var rakstīt, ka

$$\frac{V'_0}{V_0} = \frac{\varepsilon V_1 + V_1 - V'_1}{\varepsilon V_1}.$$

Lieluma V'_1 vietā var ievietot izteiksmi $\lambda'_0 V_1$ (no vienādojuma (4.8)); pēc saīsināšanas iegūst

$$\frac{V'_0}{V_0} = \frac{\varepsilon + 1 - \lambda'_0}{\varepsilon}.$$

Pieņemot, ka gāze izplešas politropiski (līnija 4-1'), var rakstīt

$$p_2 V_0^n = p_1 (V'_0)^n \quad \text{jeb} \quad \frac{V'_0}{V_0} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}},$$

tātad

$$\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} = \frac{\varepsilon + 1 - \lambda'_0}{\varepsilon} \quad \text{un} \quad \lambda'_0 = 1 - \varepsilon \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]. \quad (4.9)$$

No teorētiskā tilpuma lietderības koeficienta formulas redzams, ka tas samazinās līdz ar kaitīgās telpas ε un gāzes spiediena p_2 palielināšanos. Jo lielāks gāzes beigu spiediens p_2 , jo mazāku gāzes tilpumu iesūc cilindrā. Paaugstinoties beigu spiedienam, ar izveidoties tāds stāvoklis, ka, lai gan virzulis kustas un pārvietojas pa labi pat līdz galējam stāvoklim 2, spiediens cilindrā nesamazinās līdz p_1 , un tādēļ gāze netaiek iesūkta. Šādā gadījumā $\lambda'_0 = 0$.

Spiedienu attiecību $\frac{p_2}{p_1}$, kad teorētiskais tilpuma lietderības koeficients sasniedz vērtību $\lambda'_0 = 0$, sauc par *saspiežamības robežu*.

Kompresora kaitīgā telpa ietekmē tikai pievadāmās gāzes tilpumu, bet enerģijas patēriņā ziņā šai telpai nav negatīvas ietekmes uz kompresora darbību.

Agrāk uzskatīja, ka iesūkšanas spiediens ir vienāds ar to spiedienu, kāds ir telpā, no kuras gāzi iesūc. Istenībā to pretestību dēļ, kuras iesūkšanas brīdī veidojas sūcējcaurulē, filtrā, vārstos un citās vietās, spiediens cilindrā ir zemāks nekā spiediens telpā, no kuras gāzi iesūc (4.3. att. b). Tādēļ iesūkšana sākas nevis punktā 1, bet punktā 1', līdz ar to samazinot iesūcamās gāzes tilpumu. Spiedvārsta un spiedkanāla pretestības dēļ gāzes spiediens cilindrā ir augstāks par spiedienu spiedcaurulē p_2 . Tādēļ kaitīgajā telpā palikušās gāzes izplešanās sākas no punkta 4', nevis no punkta 4, un iesūkšana sākas no punkta 1''. Kompresora reālā indikatora diagramma parādīta 4.3. attēlā c. Spiediena maiņa stāvoklī A un C saistīta ar vārstu atvēršanos.

Faktiskā tilpuma lietderības koeficienta iegūšanai lieto formulu (4.9), ievietojot spiedienu p_1 un p_2 vietā spiedienus p'_1 un p'_2 :

$$\lambda_0 = 1 - \varepsilon \left[\left(\frac{p'_2}{p'_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right], \quad (4.10)$$

kur $p'_2 = (1,02 \dots 1,03) p_2$ un $p'_1 = (0,95 \dots 0,98) p_1$.

Tā kā vārstos, gar virzuli un virzuļa kātu ir neblīvas vietas, kā arī gāzes mitruma dēļ patērējais nesaņem visu iesūkto gāzes tilpumu. Attiecību starp faktiski saņemto gāzes tilpumu V (reducēts uz gāzes iesūkšanas temperatūru un spiedienu) un virzuļa gājiena tilpumu V_1 sauc par kompresora padeves koeficientu:

$$\lambda = \frac{V}{V_1}.$$

Padeves koeficients ir 4...5% mazāks par faktisko tilpuma lietderības koeficientu, t. i., $\lambda = (0,95 \dots 0,96) \lambda_0$.

Gāzu saspiešana divpakāpju un vairākpakāpju kompresoros. Ja kompresoram kaitīgā telpa $\varepsilon = 0,05$ un faktiskais tilpuma lietderības koeficients $\lambda_0 = 0,7$, tad, saspiežot gāzi izotermiski, pēc formulas (4.10)

iegūst maksimālo gāzes saspiešanas pakāpi $\left(\frac{p_2}{p_1} \right)$ vienā cilindrā:

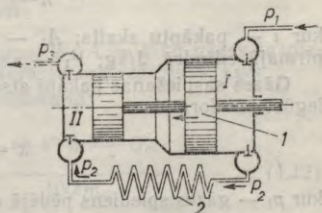
$$1 - 0,05 \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right) = 0,7; \quad \frac{p_2}{p_1} = 7.$$

Tātad, lai tehniski izdevīgāk veiktu gāzes saspiešanu, vienā cilindrā (ja kaitīgā telpa 5%) nav ieteicams gāzi saspiegt vairāk nekā septiņkārt. Ja kaitīgā telpa aizņem 3...8%, gāzi saspiež 11...4,75 reizes.

Gāzes temperatūra pēc saspiešanas nedrīkst sasniegt kompresora eļļošanai lietojamās eļļas uzliesmošanas temperatūru. Parasti kompresoru eļļām uzliesmošanas temperatūra nav zemāka par 216°C. Drošības dēļ gāzes beigu temperatūru paredz adiabatiskam saspiešanas gadījumam: $t_2 < 180^\circ\text{C}$. Tas nepieciešams tāpēc, ka, pasliktinoties kompresora dzesēšanai, gāzes saspiešana var tuvuot adiabatiskam procesam.

Lai iegūtu gāzi ar spiedienu, kas lielāks par 0,7 MPa, to saspiež vairākos cilindros. Šādu saspiešanas veidu sauc par *vairākpakāpju saspiešanu*. Katrs cilindrs veido vienu pakāpi.

Divpakāpju kompresora shēma parādīta 4.4. attēlā. Virzulim *I* pārvietojoties pa kreisi, zemspiediena cilindrā *I* gāzi iesūc ar spiedienu p_1 . Laikā, kad cilindrā *I* gāzi iesūc, cilindrā *II* to saspiež



4.4. att. Divpakāpju kompresora shēma.

līdz spiedienam p_3 un aizvada patērētājam. Virzulim *I* pārvietojoties atpakaļ pa labi, cilindrā *II* gāzi iesūc ar spiedienu p_2 , bet cilindrā *I* pēc gāzes saspišanas līdz spiedienam p_2 to izvada no cilindra. Starp pakāpēm (cilindriem *I* un *II*) novietots gāzes dzesinātājs 2.

Divpakāpju kompresora indikatora diagramma parādīta 4.5. attēlā. Tā sastāv no divām daļām — *A* un *B*. Daļa *A* aizņem laukumu 1-2-3-4 un attēlo gāzes saspišanu zemspiediena cilindrā (sk. 4.4. att. *I*). Līkne 2-*a* parāda gāzes izotermisku saspišanu no spiediena p_1 līdz spiedienam p_2 . Laukums *B* attēlo gāzes saspišanu augstspiediena cilindrā (sk. 4.4. att. *II*).

Ja gāzi starp cilindriem nedzesē, tad gāzes tilpums, kas izspiests no zemspiediena cilindra (4.5. att. nogrieznis 3-4), ir vienāds ar augstspiediena cilindrā iesūktās gāzes tilpumu. Darbs, kas jāpatērē gāzes saspišanai līdz spiedienam p_3 , ir ekvivalents laukumam 4-3-8-7.

Dzesējot gāzi starp pakāpēm, kā tas parādīts 4.4. attēlā, gāzes tilpums samazinās par lielumu, kas 4.5. attēlā atbilst nogrieznim 3-5. Augstspiediena cilindrā iesūktā gāzes tilpumu attēlo nogrieznis 4-5. Dzesēšana gāzes saspišanas līkni 5-6 tuvina izotermi un ietaupa enerģiju, kas ekvivalenta laukumam 3-5-6-8.

Kopējo darbu, kas patērēts, gāzi saspižot vairākpakāpju kompresorā, iegūst, summējot darbu, kas patērēts atsevišķās pakāpēs. Tā kā saspišanas pakāpe visos cilindros parasti ir vienāda, tad kopējo darbu, saspižot gāzi vairākās pakāpēs, aprēķina pēc formulas

$$A_{\text{kop}} = iA_1 = i \frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]^*$$

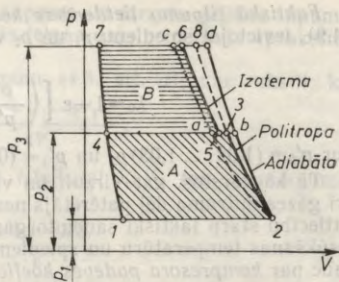
kur i — pakāpju skaits; A_1 — darbs, kas patērēts, gāzi saspižot pirmajā cilindrā, J/kg; V_1 — saspižamās gāzes tilpums, m^3 .

Gāzes saspišanas pakāpi atsevišķos cilindros, ja cilindru skaits i , iegūst pēc formulas

$$x^i = \frac{p_i}{p_1}; \quad (4.11)$$

kur p_i — gāzes spiediens pēdējā cilindrā.

Vairākpakāpju kompresoros ar vienādu virzuļa gājienu cilindru diametri samazinās pēc šādas sakarības: $D_2 = D_1/\sqrt{x}$; $D_3 = D_2/\sqrt{x}$ utt.,



4.5. att. Divpakāpju kompresora indikatora diagramma.

kur D_1, D_2, D_3 — pirmā, otrā, trešā cilindra diametri, x — gāzes saspiešanas pakāpe atsevišķos cilindros.

Saspiežot gāzi vairākpakāpju kompresoros, samazinās kaitīgās telpas ietekme, gāzes saspiešanai patērētais darbs un pazeminās saspiešanās gāzes beigu temperatūra.

Pēc konstruktīvā izveidojuma vairākpakāpju kompresorus iedala *tandēma kompresoros* (4.4. att.) — cilindri novietoti virknē; *kompāunda kompresoros* — cilindri novietoti paralēli un *diferenciālos kompresoros*. Kompresora cilindri var būt novietoti arī dažādos leņķos — V veidā, W veidā, zvaigznes veidā.

Virzuļkompresora ražīgums. Virzuļkompresora ražīgumu izsaka ar gāzes tilpumu (kas reducēts uz atmosfēras spiedienu), ko kompresors pievada patērētājam laika vienībā.

Vienpusējas darbības kompresora teorētisko ražīgumu, tāpat kā virzuļsūkņa ražīgumu, nosaka pēc formulas

$$Q = Sln,$$

kur Q — virzuļkompresora ražīgums, m^3/s ; S — virzuļa šķērsgriezuma laukums, m^2 ; l — virzuļa gājiņa garums, m ; n — vārpstas apgriezienu skaits, s^{-1} .

Faktiski pievadītais gāzes tilpums ir mazāks, jo tas atkarīgs no padeves koeficienta λ :

$$Q = \lambda Sln.$$

Abpusējas darbības kompresoru ražīgumu aprēķina pēc formulas

$$Q = \lambda(2S - S_k)ln,$$

kur S_k — virzuļa kāta šķērsgriezuma laukums, m^2 .

Konstrūējot kompresorus, jāievēro šāda sakarība: $l/D \leq 2$.

Virzuļa vidējais ātrums $\omega = 2ln$, kur ātrumu izsaka vienībā metri sekundē. Lēngaitas kompresoriem vidējais ātrums ir aptuveni 1 m/s, ātrgaitas kompresoriem — līdz 4 m/s. Abpusējas darbības kompresoriem $2S - S_k \approx (1,95 \dots 1,97)S$.

Kompresora jauda. Kompresoram nepieciešamo jaudu aprēķina pēc formulas

$$N_t = \frac{AQ_m}{1000n}$$

kur N_t — kompresora teorētiskā jauda, kW; A — 1 kg gāzes saspiešanai patērētais darbs, J/kg; Q_m — kompresora ražīgums, kg/s.

Jauda uz vārpstas izotermiskā saspiešanā:

$$N_v = \frac{N_t \eta_{iz}}{\eta_{iz}} = \frac{A_{iz} Q_m}{1000 \eta_{iz}} = \frac{p_1 V_1 \ln \frac{p_2}{p_1} Q_m}{1000 \eta_{iz}}, \quad (4.12)$$

kur $\eta_{iz} = 0,60 \dots 0,80$ — kopējais izotermiskais lietderības koeficients; $\eta'_{iz} = \eta'_{iz} \eta_{meh}$; η_{iz} — indicētais izotermiskais lietderības koeficients,

0,75...0,85; η_{meh} — mehāniskais lietderības koeficients, 0,79...0,95. Mehāniskais lietderības koeficients saistīts ar jaudas patēriņu berzes pārvarēšanai no virzuļa līdz vārpstai.

Jauda uz vārpstas adiabatiskā saspiešanā, ja iekārta darbojas bez dzesēšanas:

$$N_v = \frac{N_{t,ad}}{\eta_{ad}} = \frac{A_{ad} Q_m}{1000 \eta_{ad}} = \frac{\frac{k}{k-1} p_1 V_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] Q_m}{1000 \eta_{ad}} \quad (4.13)$$

kur $\eta_{ad} = 0,70 \dots 0,85$ — kopējais adiabatiskais lietderības koeficients.

Ja kompresora darbināšanai lieto pārvadu, kura lietderības koeficients η_p (siksna pārvadam $\eta_p = 0,95$); bet dzinēja lietderības koeficients η_{dz} , tad kopējais kompresora iekārtas lietderības koeficients

$$\eta = \eta_{ad}^1 \eta_{\text{meh}} \eta_{dz} \eta_p,$$

kur η_{ad}^1 — indicētais adiabatiskais lietderības koeficients, 0,90...0,94.

Ja gāzi saspiež izotermiski

$$\eta = \eta_{iz}^1 \eta_{\text{meh}} \eta_{dz} \eta_p.$$

Indicētais izotermiskais η_{iz}^1 un adiabatiskais η_{ad}^1 lietderības koeficients raksturo kompresoru no siltuma aizvadišanas viedokļa un neietver enerģijas zudumus mehānismos.

Var pieņemt, ka kopējais kompresora iekārtas lietderības koeficients $\eta = 0,45 \dots 0,62$.

Dzinēja jaudu parasti izvēlas ar 10...20% lielu rezervi: $N_{dz} = (1,1 \dots 1,2) N_v$.

Kompresora patērēto jaudu var noteikt arī pēc indikatora diagrammas.

Kompresoru darbināšanai lieto trīsfāžu sinhronos un asinhronos elektrodzinējus. Jaudām, kas lielākas par 100 kW, ieteicams lietot sinhronos dzinējus, jo tiem ir lielāks jaudas koeficients ($\cos \varphi$).

Gāzes dzesēšana kompresoros. Saspiesto gāzi kompresorā dzesē, dzesējot kompresora cilindru. Vairākpakāpju iekārtās gāzi dzesē arī starp pakāpēm.

Kompresorus ar nelielu ražīgumu (0,05...0,08 m³/s) parasti dzesē tikai ar gaisu. Dzesēšanas virsmas palielināšanai cilindra ārpusē izveido ribas. Mazu gāzes tilpumu dzesēšanai (pēdējām pakāpēm) lieto glodeņu dzesinātājus. Parasti gāzi ievada glodenē, kuru apskalo ūdens. Lielu gāzes tilpumu dzesēšanai lieto cauruļveida dzesinātājus. Gāzi ievada starpcauruļu telpā, kur pa caurulēm plūst ūdens (var būt arī otrādi). Kompresora dzesēšanai jāseko nepārtraukti, vērojot, vai ūdens plūst apvalkā un dzesinātājā un kāda ir tā temperatūra.

Ja kompresors iedarbināts, bet dzesēšana nav bijusi ieslēgta, tad kompresors jāaptur, jāatdzesē un tikai pēc tam to drīkst atkal ieslēgt, iepriekš pievadot ūdeni apvalkā un starppakāpju dzesinātājos. Dze-

sēšanas sistēmai jābūt automatizētai, kura signalizē, ja samazinās vai izbeidzas ūdens pievadišana kompresorā.

Faktiskais ūdens patēriņš uz 1 m^3 saspiežamās gāzes, ja spiediens zemāks par $0,8 \text{ MPa}$, ir $(3 \dots 5) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^3$, vienpakāpes kompresoros ne vairāk kā $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^3$.

4.2. ROTĀCIJAS KOMPRESORI UN GĀZPŪTĒJI

Rotācijas kompresoriem salīdzinājumā ar virzuļkompresoriem ir priekšrocības: tiem ir mazāki izmēri un masa, lielāks apgriezienu skaits ($700 \dots 1500$ apgr./min), vienmērīgāka gāzes padeve, nav vārstu. Taču tos grūtāk izgatavot un remontēt, tiem ir zemāks lietderības koeficients (aptuveni par 5%).

Rotācijas kompresors sastāv no cilindriska apvalka 1, kurā ekscentriski griežas rotors 2 (4.6. att.). Rotorā ir radiālas spraugas 3. Šajās spraugās brīvi ievietotas tērauda (kompresoriem) vai tekstilīta (gāzpūtējiem) plāksnes 4. Rotoram griežoties, centrālās spēka ietekmē plāksnes izbīdās no spraugām un kopā ar apvalka iekšējo virsmu veido starp divām plāksnēm noslēgtu telpu, kurā ieplūst gāze (kompresora kreisajā pusē). No viduslīnijas pa labi telpa starp plāksnēm (rotācijas virzienā) samazinās, tādēļ starp plāksnēm ietvērto gāzi saspiež. Pēc tam tā nonāk spiedcaurulē.

Rotācijas kompresoru ražīgums ir $0,1 \dots 1,7 \text{ m}^3/\text{s}$ un spiediens līdz $0,5 \text{ MPa}$. Saslēdzot virknē divus šādus kompresorus, spiedienu var paaugstināt līdz 1 MPa . Lai plāksnes strauji nenodiltu, kā arī lai novērstu rotora troksni, rotora lineārajam ātrumam jābūt ne lielākam par $10 \dots 12 \text{ m/s}$. Parasti šie kompresori tieši sajūgti ar elektrodzinēju.

Kompresora ražīgumu aprēķina pēc formulas

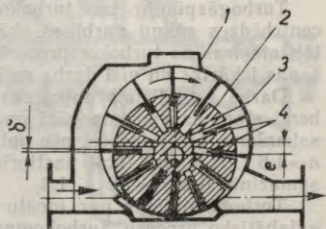
$$Q = 120 \lambda e (\pi D - z \delta) \ln,$$

kur Q — kompresora ražīgums, m^3/s ; e — ekscentricitāte, parasti $e = (0,05 \dots 0,1) D$, m; D — apvalka iekšējais diametrs, m; l — plāksņu garums, m; n — rotora apgriezienu skaits, s^{-1} ; δ — plāksņu biezums, $\delta = 8 \cdot 10^{-4} \dots 4 \cdot 10^{-3}$, m; z — plāksņu skaits, $z = 8 \dots 24$; λ — padeves koeficients, ko nosaka pēc empīriskas formulas

$$\lambda = 1 - (0,05 \dots 0,1) \frac{p_2}{p_1},$$

kur koeficients 0,05 attiecas uz liela ražīguma kompresoriem (ja $Q > 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$), koeficients 0,1 — uz maza ražīguma kompresoriem (ja $Q < 0,2 \text{ m}^3/\text{s}$). Aptuveni aprēķiniem pieņem, ka $\lambda = 0,8 \dots 0,85$.

Nepieciešamo jaudu uz vārpstas nosaka pēc formulas (4.12).



4.6. att. Rotācijas kompresora shēma.



4.7. att. Rotācijas gāzpūtēja shēma.

Rotācijas kompresorus bieži lieto arī par vakuumsūkņiem. Ar tiem iespējams sasniegt vakuumu līdz 95%, bet, saslēdzot divus virknē, — pat 99%.

Plākšņu kompresoriem ar spiedienu līdz $5 \cdot 10^{-2}$ MPa un vakuumsūkņiem retinājumam līdz $3,5 \cdot 10^{-2}$ MPa nav īpašas dzesēšanas; pārējie kompresori apgādāti ar ūdens apvalkiem un divpakāpju iekārtas — ar starppakāpju dzesēšanu. Ūdens patēriņš uz 1 m^3 saspiežamā gaisa, ja ūdens sasilst par 15°C , vienpakāpes plākšņu kompresorā ir 1,5... 2 kg, divpakāpju kompresorā aptuveni 3 kg.

Ķīmiskajā rūpniecībā lieto rotācijas gāzpūtējus ar īpašas konstrukcijas rotoriem. Rotori šķērs griezumā atgādina ciparu astoņi (4.7. att.). Cilindriskajā apvalkā 1 ievietoti divi rotori 2, kuriem rotējot gaiss no sūcējcaurules 3 pārvietojas uz spiedcauruli 4. Gaisu saspiež adiabatiski.

Sādu gāzpūtēju ražīgums sasniedz $6,7 \text{ m}^3/\text{s}$ un to aprēķina pēc formulas:

$$Q = 120\lambda \left(\frac{\pi D^2}{4} - S \right) \ln,$$

kur D — rotora diametrs, m; S — rotora šķērs griezuma laukums, m^2 ; l — rotora garums, m; n — rotora apgriezienu skaits, parasti $n = 3,3 \dots 7,5 \text{ s}^{-1}$; λ — padeves koeficients, parasti $\lambda = 0,57 \dots 0,7$. Šos gāzpūtējus lieto spiedienam līdz $8 \cdot 10^{-2}$ MPa.

Nepieciešamo jaudu uz vārpstas aprēķina pēc formulas (4.13), kur $\eta_{\text{ad}} = 0,6 \dots 0,75$.

4.3. TURBOGĀZPŪTĒJI UN TURBOKOMPRESORI

Lieli gāzes tilpumu nelielai saspiešanai lieto iekārtas, kas darbojas pēc centrālās sūkņa principa. Atkarībā no radītā spiediena tās iedala 1) ventilatoros (spiediens nepārsniedz $0,01 \dots 0,015$ MPa); 2) turbogāzpūtējos (spiediens līdz $0,2 \dots 0,3$ MPa) un 3) turbokompresoros (spiediens lielāks par $0,3$ MPa).

Turbogāzpūtēju un turbokompresoru darbības shēma līdzīga centrālās sūkņa darbības shēmai. Pēc konstrukcijas turbogāzpūtēji atšķiras no turbokompresoriem ar to, ka gāzpūtējiem nav dzesēšanas iekārtas un visi darba rati ir vienādi.

Darba rata lielais apgriezienu skaits ($50 \dots 167 \text{ s}^{-1}$) rada lielu berzi starp saspiežamo gāzi un darba ratu; tādēļ pastiprinās gāzes sakaršana. Gāzi saspiež pēc politropas (virs adiabatās), kurai $n > k$, $n = 1,6 \dots 1,8$, un, tikai pastiprināti dzesējot, politropas pakāpi var samazināt līdz $n = 1,2 \dots 1,3$.

Turbogāzpūtējos par ideālu gāzes saspiešanas procesu uzskata adiabatisko procesu, turbokompresoros ar dzesēšanu — izotermisko procesu.

Lai gāzes beigu spiediens būtu augstāks par 0,01 MPa, nepieciešami vairāki darba rati un lieli ātrumi. Tādēļ turbogāzspūtējos un turbokompresoros gāzi saspiež vairākās pakāpēs. Nepieciešamo pakāpju skaitu turbokompresoriem nosaka tāpat kā virzulkompresoriem (pēc formulas (4.11)); var būt 3...16 pakāpes, parasti ir 3...7 pakāpes.

Spiedienu attiecība $\frac{p_2}{p_1}$ vienā pakāpē (darba ratā un difuzorā) ir 1,2...1,8. Jo lielāka šī attiecība, jo lielākam jābūt darba rata lineārajam ātrumam, parasti $u_2=200\text{...}280$ m/s (gāzspūtējiem 150...200 m/s, speciāliem turbokompresoriem — 300...450 m/s). Visbiežāk darba ratu diametri ir 700...1400 m. Darba rati ar vienādu diametru veido atsevišķas sērijas. Katrā sērijā ir līdz 4 darba ratiem. Starp darba ratu sērijām novietoti dzesinātāji saspīestās gāzes atdzesēšanai, pirms to aizvada uz nākamo darba ratu sēriju. Divpakāpju turbogāzspūtējs parādīts 4.8. attēlā.

Turbogāzspūtējos un turbokompresoros darba rati ir ar atpakaļ atliktām lāpstiņām. Zema spiediena turbogāzspūtējiem lāpstiņu galus izplūdes pusē veido radiālus. Ja ir lieli lineārie ātrumi (līdz 450 m/s), tad frēzētiem darba ratiem veido radiālas lāpstiņas. Atkarībā no darba rata diametra ir 16...32 lāpstiņas.

Darba ratā gāze ieplūst ar ātrumu 35...80 m/s.

Kompresora radītais spiediens. Turbogāzspūtējiem un kompresoriem gāzes celšanas augstumu nosaka pēc formulas (3.29). Ja $\alpha_1=90^\circ$, tad

$$H = \frac{u_2 c_2 \cos \alpha_2}{g}, \quad (4.14)$$

kur H — gāzes celšanas augstums, m.

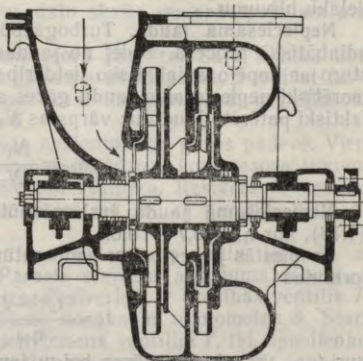
Turbokompresoriem gāzes celšanas augstumu, kas atbilst $\alpha_1=90^\circ$, sauc par normālo celšanas augstumu.

Kompresora radīto spiedienu izsaka šādi:

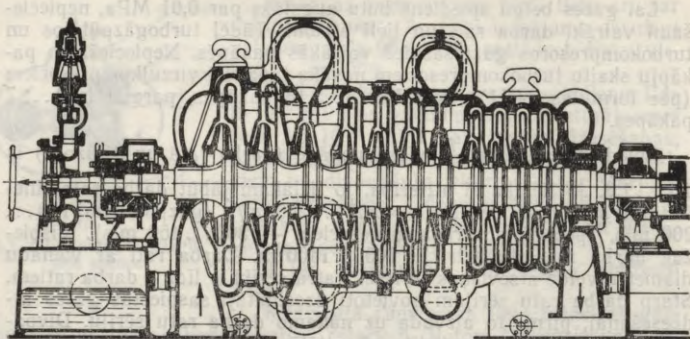
$$\Delta p = H \rho g, \quad (4.15)$$

kur Δp — kompresora radītais spiediens, Pa; ρ — saspīestās gāzes vidējais blīvums, kg/m³. Gāzes blīvums, ieplūstot darba ratā, ir mazāks, nekā izplūstot no tā, tādēļ, nosakot Δp , jālieto gāzes vidējais blīvums.

Virknē saslēgtiem vienāda diametra darba ratiem visiem ir vienāds gāzes celšanas augstums, ko aprēķina pēc



4.8. att. Divpakāpju turbogāzspūtēja shēma.



4.9. att. Daudzpakāpju turbokompresora shēma.

formulas (4.14). Gāzes spiediena izmaiņu izsakot paskālos (pēc formulas (4.15)), katrā darba ratā spiediens ir citāds, jo līdz ar spiediena izmaiņu mainās gāzes blīvums, un tas palielinās, pārejot no viena darba rata uz otru. Tādēļ turbokompresoros gāzes plūsmas virzienā samazina darba ratu diametru un platumu (4.9. att.).

Kompresora radītais spiediens ir jo lielāks, jo lielāks gāzes blīvums.

Izvēloties kompresoru, jāievēro, ka vienādam vārpstas apgriezību skaitam beigu spiediens p_2 gāzei ar mazāku blīvumu ir mazāks nekā gāzei ar lielāku blīvumu. Lai saspiestu gāzi, kurai lielāks blīvums, nemainot vārpstas apgriezību skaitu, vajadzīga lielāka jauda. Tādēļ, aprēķinot kompresora jaudu, to nosaka gāzei ar iespējami lielāku blīvumu.

Nepieciešamā jauda. Turbogāzpūtējos ideāla saspiešana notiek adiabatiskā procesā. Tādēļ no jaudas viedokļa turbogāzpūtējus raksturo ar kopējo adiabatisko lietderības koeficientu — attiecību starp teorētiski nepieciešamo jaudu gāzes adiabatiskai saspiešanai $N_{t^{ad}}$ un faktiski patērēto jaudu uz vārpstas N_v —

$$\eta_{ad} = \frac{N_{t^{ad}}}{N_v}$$

Nepieciešamā jauda turbogāzpūtējiem nosakāma pēc formulas (4.13), kur $\eta_{ad} = 0,7 \dots 0,8$.

Saspiestās gāzes beigu temperatūru turbogāzpūtējiem nosaka pēc formulas

$$t_2 = \frac{t_2^{ad} - t_1}{\eta_{ad}} + t_1,$$

kur t_2 — saspiestās gāzes beigu temperatūra, °C; $t_2^{ad} = T_2 - 273$, T_2 aprēķina pēc formulas (4.4); t_1 — gāzes sākuma temperatūra, °C.

Tā kā turbokompresoros ir augsts spiediens, gāze sakarst un ir nepieciešams to dzesēt. To veic, 1) izveidojot dzesēšanas apvalkus; 2) ar īpašiem dzesinātājiem starp atsevišķām darba ratu sērijām.

Ja dzesēšana turbokompresorā ir laba, gāzi saspiež pēc politropas ($n=1,2 \dots 1,3$). Tādēļ turbokompresora darbu vērtē ar kopējo izotermisko lietderības koeficientu jeb ar attiecību starp teorētiski nepieciešamo jaudu izotermiskai saspiešanai un faktiski patērēto jaudu uz vārpstas

$$\eta_{iz} = \frac{N_{t,iz}}{N_v}$$

Jaudu uz vārpstas kompresoriem aprēķina pēc formulas (4.12), kur $\eta_{iz}=0,55 \dots 0,70$.

Saspiestās gāzes beigu temperatūru aprēķina pēc formulas (4.7).

Lai turbokompresorus (gāzpūtējus) iedarbināšanas brīdī nepārslogotu, tie jāiedarbina ar aizvērtu ventili. Turbokompresorus un turbogāzpūtējus var saslēgt gan paralēli, gan virknē.

Turbokompresoru un gāzpūtēju darbināšanai lieto sinhronos (lieljaudas turbokompresoriem) un asinhronos (gāzpūtējiem) elektromotorus. Ja nepieciešams liels apgriezīnu skaits, izveido zobratu pārvadus. Ērts turbokompresoru un turbogāzpūtēju darbinātājs ir tvaika turbīna, jo, mainot tvaika daudzumu, viegli iespējams mainīt arī apgriezīnu skaitu. Lieto arī līdzstrāvas elektromotorus.

Proporcionalitātes likums ir spēkā turbogāzpūtējiem, bet turbokompresoriem tas nav piemērojams.

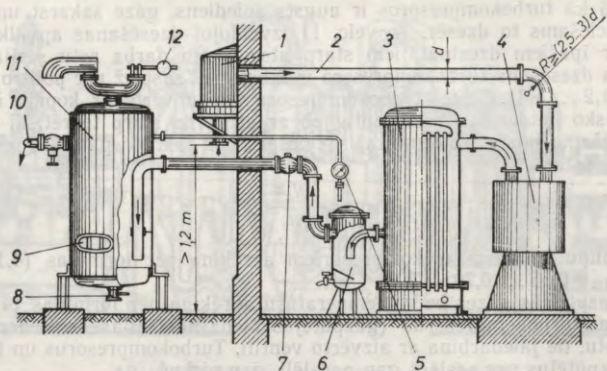
4.4. KOMPRESORU STACIJU IEKĀRTOJUMS

Kompresorus izvēlas tādā skaitā, lai viens vai divi kompresori būtu rezervē. Ieteicams lietot vienāda veida kompresorus, jo tad samazinās nepieciešamo rezerves daļu skaits un apkalpojošam personālam tos vieglāk uzraudzīt.

Gaiss pirms iesūkšanas kompresorā jāattīra. Sajā nolūkā lieto filtrus (4.10. att. 1), no kuriem gaiss pa sūcējcauruli 2 ieplūst kompresorā 4. Pēc saspiešanas gaisu dzesē dzesinātājā 3, bet eļļas un ūdens pilienus atdala atdalītājā 6.

Virzuļkompresoriem raksturīga nevienmērīga gāzes padeve. Vienmērīgākas saspiestās gāzes plūsmas iegūšanai kompresora tuvumā novieto gāzes uzkrājēju, ko sauc par *resiveru*. Resiveris 11 savieno kompresoru ar saspiestās gāzes patērētāju 10, kā parādīts 4.10. attēlā.

Resiveru atkarībā no spiediena gatavo no katlu tērauda ar 6...20 mm biežām sienām. Parasti resivera augstums $H=(2 \dots 2,7)D$, kur D — resivera diametrs. Resiveriem ir drošības ventīlis 12 un nopūšanas ventīlis 8. Spiedienu nosaka ar manometru 5. Starp kompresoru un resiveru jābūt vienvirziena ventilim 7, lai, spiedienam mainoties, saspiestā gāze neplūstu atpakaļ. Resivera tīrīšanai un pārbaudei izmanto lūku 9.



4.10. att. Kompresora iekārtas shēma.

Resivera tilpumu nosaka pēc formulas:

$$V = 12,4\sqrt{Q},$$

kur V — resivera tilpums, m^3 ; Q — kompresora maksimālais ražīgums, m^3/s . Resivera tilpumam jābūt vismaz 20 reizu lielākam par kompresora pēdējā cilindra tilpumu.

Eļļas tvaiku sakrāšanās resiverā var izraisīt eksploziju. Tādēļ resiverus novieto ēkas ārpusē (zem klajas debess). Kompresora darbināšanas laikā tie jāuzrauga. Drošības ventili uzstāda, paredzot 10% lielu spiediena rezervi. Resiveri periodiski jānopūš. Pēc zināma laika resiverus no iekšpuses tvaicē, lai tos atbrīvotu no eļļas, kas sakrājas uz sienām.

Turbogāzpūtējiem, ja ir konstants gāzes patēriņš, resiveri nav vajadzīgi. Turbokompresoru iekārtās nav vajadzīgi arī eļļas atdalītāji, jo saspiežamā gāze ar eļļu nesaskaras un tādēļ saspiegtā gāze eļļas pilienus nesatur.

4.5. VAKUUMSŪKŅI

Ķīmiskajā rūpniecībā vairākus procesus veic retinājumā, piemēram, ietvaicēšanu, pārtvaicēšanu, filtrēšanu, molekulāro žāvēšanu un destilāciju. Vakuums nepieciešams dažām spēkiekārtām, sūkņiem.

Iekārtās sasniedzamo retinājumu var iedalīt šādi:

- 1) *zems vakuums* — no $1 \cdot 10^{-1}$ līdz $1 \cdot 10^{-3}$ MPa
jeb no $7,5 \cdot 10^2$ līdz 7,5 mm Hg;
- 2) *vidējs vakuums* — no $1 \cdot 10^{-3}$ līdz $1 \cdot 10^{-7}$ MPa
jeb no 7,5 līdz $7,5 \cdot 10^{-4}$ mm Hg;
- 3) *augsts vakuums* — no $1 \cdot 10^{-7}$ līdz $1 \cdot 10^{-11}$ MPa
jeb no $7,5 \cdot 10^{-4}$ līdz $7,5 \cdot 10^{-8}$ mm Hg.

Attiecību starp retinājumu iekārtā un barometrisko spiedienu sauc par *vakuuma pakāpi*:

$$B_{\text{vak}} = \frac{p_{\text{ret}}}{p_{\text{bar}}} \cdot 100,$$

kur B_{vak} — vakuuma pakāpe, %; p_{ret} — retinājums iekārtā, Pa; p_{bar} — barometriskais spiediens, Pa.

Absolūtais spiediens iekārtā:

$$p = p_{\text{bar}} - p_{\text{ret}},$$

kur p izteikts paskālos.

Dažādu vakuumsūkņu salīdzināšanai attiecīgo vakuumu reducē uz normālo barometrisko spiedienu (101 325 Pa), iegūstot tā saucamo reducēto vakuumu

$$B_{\text{vak r}} = \frac{101\,325 - (p_{\text{bar}} - p_{\text{ret}})}{101\,325} \cdot 100,$$

kur $B_{\text{vak r}}$ izteikts procentos.

Vakuuma radīšanai un uzturēšanai lieto vakuumsūkņus. Vakuumsūkņi iedalāmi

1) atkarībā no radītā retinājuma: a) *vakuumsūkņi zemam vakuumam*, b) *vakuumsūkņi augstam vakuumam*;

2) atkarībā no konstrukcijas: a) *virzuļveida vakuumsūkņi*, b) *rotācijas vakuumsūkņi*, c) *strūklas vakuumsūkņi* (ējektorveida);

3) *sausie vakuumsūkņi*, kas izsūknē no iekārtām tikai gaisu vai gāzes;

4) *slāpjie vakuumsūkņi*, kas kopā ar gāzi izsūknē arī šķidrumu.

Vakuumsūkņi zemam vakuumam. Vakuumsūkņi iesūknē gāzi ar nīcīgu spiedienu un saspiež to līdz atmosfēras spiedienam, tādēļ tos var uzskatīt par kompresoriem.

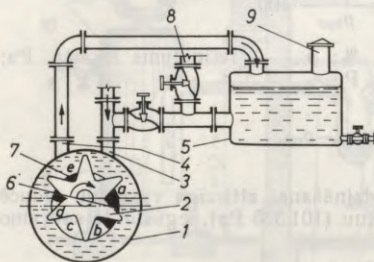
Jaudu uz vārpstas vakuumsūkņiem aprēķina pēc formulas (4.13).

Virzuļvakuumsūkņiem kaitīgās telpas ietekme uz tilpuma lietderības koeficienta λ_0 skaitlisko vērtību ir lielāka nekā kompresoriem. Sevišķi tā palielinās, pieaugot vakuumam. Tādēļ vakuumsūkņus parasti konstruē ar iespējami mazu kaitīgo telpu; dažreiz to iespējams samazināt līdz 1...2%. Lielākam retinājumam, lai palielinātu λ_0 , lieto divpakāpju vakuumsūkņus.

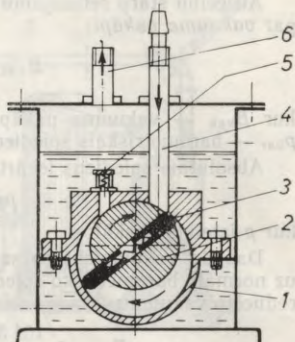
Vakuumsūkņa ražīgumu izsaka ar iesūcamās gāzes tilpumu dotajā spiedienā vai normālā atmosfēras spiedienā. Tādēļ, izvēloties vakuumsūkni pēc ražīguma, jāievēro, kādā spiedienā tas sasniedzams. Virzuļvakuumsūkņa darbība ir līdzīga virzuļkompresora darbībai.

Bez virzuļvakuumsūkņiem vakuuma radīšanai plaši lieto *rotācijas vakuumsūkņus*.

Ķīmiskajā rūpniecībā bieži sastopami ūdensgredzena rotācijas vakuumsūkņi PMK (4.11. att.). Sāds sūknis sastāv no cilindriska apvalka 1, zvaigznesveida rotora 2, kas ievietots apvalkā ekscentriski, sūcējaurules 3, spiedcaurules 4, ūdens tvertnes 5, ielplūdes



4.11. att. Ūdensgredzena rotācijas vakuumsūkņa shēma.



4.12. att. Rotējošu plāksņu vakuumsūkņa shēma.

atveres 6 un izplūdes atveres 7. No tvertnes 5 sūkni līdz zināmam līmenim piepilda ar ūdeni. Rotoram griežoties, ūdens izveido gredzenu gar visu apvalku. Rotorā labajā pusē starp diviem rotora stariem veidojas telpa, kas, rotoram griežoties pulksteņa rādītāju kustības virzienā, palielinās ($a < b$), tādēļ šīnī pusē gāzi iesūknē no sūcējcaurules. Turpretī kreisajā pusē telpa starp rotora stariem tā kustības virzienā samazinās ($c > d > e$), tādēļ tur gāzi spiež un izvada pa atveri 7 spiedcaurulē 4, no kurienes tā nokļūst tvertnē 5. Pa izplūdes cauruli 9 to izvada atmosfērā. Caurule 8 paredzēta ūdens papildināšanai.

Ūdensgredzena vakuumsūknis ir vienkāršs, tas neaizsērē, un tam nav vārstu.

Vakuumsūkņi vidējam un augstam vakuumam. Augsta vakuuma vakuumsūkņi rada retinājumu pat līdz 10^{-9} mm Hg.

Liela retinājuma iegūšanai lieto rotācijas sūkņus un tvaikstrūklas vakuumsūkņus. Rotācijas vakuumsūkņi var uzsākt darbību tieši no atmosfēras spiediena. Tvaikstrūklas vakuumsūkņiem vispirms jārada priekšvakuums — $1,0 \dots 5 \cdot 10^{-2}$ mm Hg.

Rotācijas vakuumsūkņi. Atkarībā no konstrukcijas rotācijas vakuumsūkņi iedalās 1) rotējošu plāksņu vakuumsūkņos; 2) stacionārās plāksnes vakuumsūkņos.

Rotējošu plāksņu vakuumsūknis parādīts 4.12. attēlā. Cilindrā 1 ekscentriski ievietots rotors 2. Rotorā šķēlumā atrodas plāksne 3, kas, rotoram griežoties, centrālās spēka, kā arī atsperu ietekmē nepārtraukti pieskaras cilindra sienām. Līdz ar to pa cauruli 4 iesūknē gāzi, bet rotora kreisajā pusē, paceļot lodveida vārstu 5, gāzi no sūkņa izvada pa cauruli 6.

Hermetizācijas nolūkā viss sūknis iegremdēts eļļā. Lai iegūtu lielu retinājumu, šādus sūkņus saslēdz virknē (līdz divpadsmit sūkņiem kopējā eļļas vannā). Vienpakāpes vakuumsūknis spēj radīt re-

tinājumu līdz $2 \cdot 10^{-3}$ mm Hg, divpakāpju vakuumsūknis — līdz 10^{-4} mm Hg. Sāda vakuumsūkņa ražīgums ir $5 \cdot 10^{-4} \dots 2,5 \cdot 10^{-2}$ m³/s.

Stacionārās plāksnes vakuumsūknis redzams 4.13. attēlā. Sūkņa rotors 1 novietots cilindriā ekscentriski. Atspere 4 rotoram piespiež plāksni 2. Līdz ar to cilindra telpa sadalās divās daļās: labajā pusē rodas retinājums un gāzi pa cauruli 3 iesūknē, bet kreisajā pusē gāzi pa kanālu 5 izvada no sūkņa.

Difūzijas vakuumsūknī. Difūzijas vakuumsūkņos darba viela ir dzīvsudraba vai eļļas tvaiki. To darbības princips izprotams, aplūkojot *dzīvsudraba difūzijas vakuumsūkņa darbību* (4.14. att.), kurš *izgatavots no stikla*. Kolbā 2 ieliets dzīvsudrabs, ko ar sildītāju 1 daļēji iztvaicē. Tvaiks pa cauruli 4 ceļas uz augšu un izplūst pa sprauslu 6. Nosūknējamā gāze difundē tvaika strūklā un pa difuzoru 5 pārvietojas uz leju, kur dzīvsudraba tvaiki kondensējas. Kondensāts pa cauruli 3 nokļūst atpakaļ iztvaikotājā, bet difundējošo gāzi, kas nekondensējas, ar priekšvakuuma sūkni 8 izsūknē pa cauruli 8. Difundējošās gāzes vietā pa cauruli 7 ieplūst gāze no iekārtas, kurā uztur retinājumu. Sādu difūzijas vakuumsūkņu ražīgums ir $5 \cdot 10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-3}$ m³/s. Tie darbojas, ja priekšvakuums mazāks par 0,1 mm Hg.

Līdzīgs darbības princips ir arī *dzīvsudraba difūzijas vakuumsūkņiem, kuri izgatavoti no metāla* un kuriem parasti nepieciešams priekšvakuums, kas mazāks par 1 mm Hg.

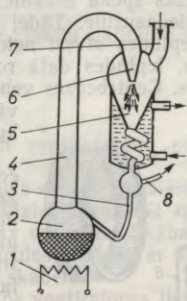
Atomtehnikas vajadzībām lieto *vairāksprauslu dzīvsudraba vakuumsūknus* ar ražīgumu līdz 50 m³/s. Tie sasniedz retinājumu līdz 10^{-7} mm Hg. Šiem sūkņiem nepieciešams priekšvakuums 10^{-3} mm Hg.

Ežektorveida vakuumsūknī. Ar šiem sūkņiem iespējams kopā ar gāzēm no sistēmas aizvadīt arī ūdens tvaiku. Tādējādi dažreiz var nelietot kondensācijas iekārtu.

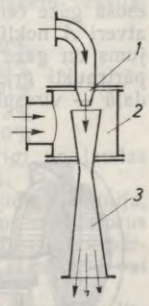
Ežektorveida tvaikstrūklas vakuumsūkņa darbības princips parādīts 4.15. attēlā. Tvaiks ar lielu ātrumu izplūst no sprauslas 1 un,



4.13. att. Stacionārās plāksnes vakuumsūkņa shēma.



4.14. att. Dzīvsudraba difūzijas vakuumsūkņa shēma.



4.15. att. Ežektorveida tvaikstrūklas vakuumsūkņa shēma.

plūstot uz difuzoru 3, rauj līdz kamerā 2 esošo gāzi un tvaiku. Difuzorā strūklas kinētiskā enerģija pāriet potenciālajā enerģijā (pieaug spiediens).

Vienpakāpes ežektorveida vakuumsūkņi spiedienā 0,5 mm Hg spēj nosūkt 0,5...1,0 m³/s gāzes. Šādu vakuumsūkņu darbināšanai vajadzīgs ūdens tvaiks ar 1,0...1,5 MPa lielu spiedienu. Lielāka ražīguma un augstāka vakuuma iegūšanai šāds vakuumsūkņus sašlēdz virknē pa pieci un vairāk. Piecpakāpju ežektorveida vakuumsūkņi, kuram ir liels ražīgums, spēj radīt retinājumu līdz 5·10⁻² mm Hg.

4.6. VENTILATORI

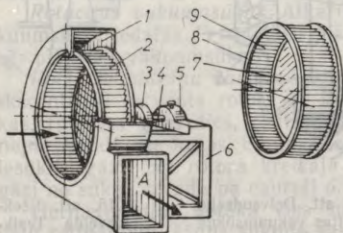
Ventilatorus lieto gaisa vai kādas citas gāzes pārvietošanai, ja jāpārvar spiediens, kas mazāks par 15 kPa.

Pašreiz ventilatorus izgatavo ar ražīgumu, kas lielāks par 280 m³/s (>10⁶ m³/h). Pēc konstruktīvā izveidojuma ventilatorus iedala *centrbēdzes ventilatoros* un *aksiālos* (propellerveida) *ventilatoros*.

Centrbēdzes ventilatori. Centrbēdzes ventilatoru (4.16. att.) veido apvalks 1, darba rats (rotors) 2, statnis 6, vārpsta 4, skriemelis 3 un gultnis 5. Rotors var būt arī tieši sajūgts ar elektromotoru. Darba rats izveidots no diska 7, gredzena 8 un lāpstiņām 9, kas novietotas starp gredzenu un disku. Darba ratā ir 6...64 lāpstiņas. Šī veida ventilatoriem lāpstiņas visbiežāk noliekta uz priekšu, retāk — radiāli vai atpakaļ. Atkarībā no izmēriem, radītā spiediena un ventilatora konstrukcijas vārpstas apgriezību skaits sekundē ir 3,3...50 un lielāks.

Centrbēdzes ventilatoros, griežoties darba ratam, starp lāpstiņām esošā gāze centrālās spēka ietekmē pārvietojas un caur izplūdes atveri A nokļūst spiedcaurulē. Tādēļ darba ratā izveidojas retinājums un gāze pa ieplūdes atveri nokļūst ventilatorā. Rotoram nepārtraukti griežoties, ieplūdes daļā rodas retinājums, bet izplūdes daļā — virsspiediens. Centrbēdzes ventilatoros gāze ieplūst paralēli vārpstai, bet izplūst perpendikulāri tai.

Atkarībā no radītā spiediena centrālās ventilatori iedalās *zemspiediena* (līdz 1 kPa), *vidēja spiediena* (1...4 kPa), *augstspiediena* (>4 kPa) ventilatoros. Šis iedalījums ir relatīvs, jo, samazinot rotora apgriezību skaitu sekundē, vidēja spiediena ventilators darbojas kā zemspiediena ventilators. Zemspiediena ventilators var



4.16. att. Centrbēdzes ventilatora shēma.

darboties kā vidēja spiediena ventilators, ja palielina vārpstas apgriezību skaitu.

Ventilatora radītais spiediens. Centrbēdzes ventilatoros spiediena izmaiņas ir niecīgas, tādēļ pieņem, ka gāzes blīvums pirms darba rata un aiz tā ir vienāds. Ventilatora radīto kopējo celšanas augstumu aprēķina pēc formulas, ko lieto centrālās sūkņiem (sk. formulu (3.30)):

$$H = \frac{u_2 c_2 \cos \alpha_2}{g} \eta_2 K,$$

kur H — ventilatora radītais kopējais celšanas augstums, m; u_2 , c_2 — lineārais un absolūtais gāzes ātrums, izplūstot no darba rata, m/s; α_2 — leņķis starp lineārā un absolūtā ātruma vektoriem; η_2 — aerodinamiskais lietderības koeficients; K — proporcionalitātes koeficients.

Lai ventilators ilgstoši darbotos, jāievēro pareizs darba rata lineārais ātrums. Katra veida ventilatoriem šis ātrums ir noteikts (vidēji 30...50 m/s).

Ar rotora lineāro ātrumu saistīts ventilatora darba troksnis. Tādēļ zemspiediena centrālās ventilatoriem darba rata lineārais ātrums nepārsniedz 25...30 m/s.

Ventilatora jauda. Ventilatora darbināšanai nepieciešamo jaudu uz vārpstas aprēķina pēc formulas

$$N_v = \frac{Q \Delta p}{1000 \eta_v}, \quad (4.16)$$

kur N_v — jauda uz ventilatora vārpstas, kW; Q — ventilatora ražīgums, m³/s; Δp — spiediens ventilatora kopējās pretestības pārvarēšanai, Pa; η_v — ventilatora lietderības koeficients.

Ventilatora elektrodzinēja jauda jāizvēlas ar rezervi:

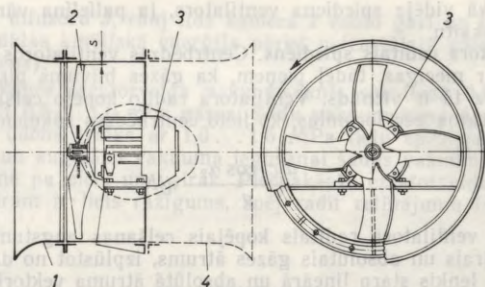
1) centrālās ventilatoriem un reversīviem aksiāliem ventilatoriem (pēc formulas (4.16)),

ja N_v līdz 0,5 kW, jaudu palielina par 50%
„ „ „ 1,0 „ „ „ „ 30%
„ „ „ 2,0 „ „ „ „ 20%
„ „ „ 5,0 „ „ „ „ 15%
„ „ „ > 5,0 „ „ „ „ 10%

2) nereversīviem aksiāliem ventilatoriem neatkarīgi no jaudas vērtības to palielina par 10%.

Ventilatorus gatavo no dzelzs skārda, speciāla tērauda, alumīnija, čuguna, viniplasta un citiem materiāliem, bet speciālos ventilatorus izgatavo no fajansa, keramikas vai koka. Skāba rakstura gāzu pārvietošanai ventilatoru un caurules pārklāj ar svinu, plastmasu vai arī ar krāsu, kas izturīga pret skābēm.

Aksiālie ventilatori. Aksiālos ventilatorus lieto, lai pārvietotu lielus gāzes tilpumus (līdz 500 m³/s) ar nelielu spiedienu (līdz 250 Pa). Daži šā veida ventilatori rada spiedienu, kas lielāks par 3000 Pa. Atšķirībā no centrālās ventilatoriem gāzes plūsma aksiālos venti-



4.17. att. Aksiālā ventilatora shēma:

1 — apvalks (stators), 2 — darba rats, 3 — elektromotors, 4 — difuzors.

lators ir paralēla vārpstai, tādēļ uz pārvietojamo gāzi neiedarbojas centrālās spēks un pārvaramā pretestība nav tik liela kā centrālās ventilatoros.

Ventilatorus MIĻ (4.17. att.) izgatavo savstarpēji ģeometriski līdzīgus, ar dažādiem darba rata diametriem — 250...1200 mm. Maksimālais lineārais ātrums 60 m/s. Sprauga s starp apvalku un darba ratu ietekmē ventilatora īpašības, parasti tā ir 0,4...0,6% no darba rata diametra. Ventilatora ražīgums sasniedz 14 m³/s (5 · 10⁴ m³/h), pārvaramā pretestība 450...500 Pa. Lietderības koeficients 0,62...0,7.

Lai palielinātu spiedienu, lieto divpakāpju ventilatorus, t. i., uz vienas vārpstas vienu aiz otra novieto divus darba ratus. Divpakāpju ventilatori, kam darba rata diametrs 1,2...2,8 m, pārvieto līdz 140 m³/s gaisa un pārvār pretestību līdz 3000 Pa. Liela ražīguma ventilatoriem darba ratu izveido ar grozāmām lāpstiņām (0...45°). Tad iespējams mainīt ventilatora ražīgumu un spiedienu. Aksiālo ventilatoru ražīgumu maina arī, mainot vārpstas apgriezību skaitu. Sakarība starp ražīgumu, darba rata diametru un apgriezību skaitu izsakāma ar šādu formulu:

$$Q = 4,5 \cdot 10^{-1} D^3 n,$$

kur Q — ventilatora ražīgums, m³/s; D — darba rata diametrs, m; n — darba rata apgriezību skaits, s⁻¹.

Ventilatora celšanas augstums atkarīgs no lineārā ātruma:

$$H = \frac{u^2}{7,8\varphi^2},$$

kur H — kopējais celšanas augstums, m; u — lineārais ātrums, m/s; φ — koeficients, kas atkarīgs no lāpstiņu veida, plakanām lāpstiņām $\varphi = 2,8...3,5$, izliektām lāpstiņām $\varphi = 2,2...2,9$.

Aksiāliem ventilatoriem parasti ir nesimetriska profila lāpstiņas. Sādi ventilatori pievada gaisu vienā virzienā. Darba rati ar simetrisku lāpstiņu profilu atkarībā no griešanās virziena pievada gaisu jebkurā virzienā. Sādus ventilatorus sauc par *reversīviem ventilatoriem*.

Kinētiskās enerģijas pārvēršanai potenciālajā enerģijā apvalkam pievieno difuzoru (sk. 4.17. att. 4).

Aksiālajiem ventilatoriem ražīguma maiņa maz ietekmē jaudu, tādēļ šiem ventilatoriem atšķirībā no centrālās ventilatoriem elektromotori nav jāizvēlas ar lielu jaudas rezervi. Elektromotorus tieši savieno ar ventilatoru. Liela ražīguma ventilatoru darbināšanai dažreiz lieto pārvadus.

Ventilatora izvēle. Ventilatoru izvēlas atkarībā no paredzamiem darba apstākļiem, pārvietojamā gaisa (gāzes) tilpuma un spiediena, kāds ventilatoram jānodrošina gaisam. Ventilatoru izvēlas pēc individuālām raksturdiagrammām.

5. NEVIENDABĪGO SISTĒMU SADALĪŠANAS HIDROMEHĀNISKĀS METODES

Nevien dabīga sistēma ir vielu maisījums, kurā komponenti atrodas dažādos agregātstāvokļos, pie tam vismaz viens no komponentiem ir sīku daļiņu veidā. Sīkās daļiņas (cietas, šķidrās, gāzveida) sistēmā veido *disperso fāzi*. Vidi, kurā daļiņas izkliedētas, sauc par *dispersijas vidi*.

Ķīmijas tehnoloģijā sastopamas divējādas neviendabīgas sistēmas: gāzveida neviendabīgās sistēmas un šķidrās neviendabīgās sistēmas.

Gāzveida neviendabīgās sistēmās dispersijas vide ir gāze, šķidrās neviendabīgās sistēmās — šķidrums. Hidromehāniskās sadalīšanas metodes abām neviendabīgajām sistēmām ir analogas.

A. GĀZVEIDA NEVIENDABĪGO SISTĒMU SADALĪŠANA. DISPERSĀS SISTĒMAS AR GĀZVEIDA VIDI

Dažos ķīmijas tehnoloģijas procesos rodas gāzveida neviendabīgi maisījumi (dūmi, putekļi, miglas), kas jāsadala, lai izdalītu gatavo produktu vai arī lai nepieļautu lielus izejvielu un pusfabrikātu zudumus. Piemēram, iegūstot 1 t cementa pēc slapjā paņēmiena, dūmgāzes no rotācijas krāsns aiznes ap 0,165 t sausas izejvielas, no ogļu žāvēšanas un smalcināšanas iekārtas — līdz 0,018 t ogļu putekļu un, klinkeru maļot un cementu fasējot ar gaisu, ja to neatputekļo, — līdz 0,05 t cementa.

Dispersās daļiņas no gāzveida neviendabīgā maisījuma parasti atdala, lai iegūtu tīru gāzes fāzi.

Gāzveida neviendabīgo maisījumu sadalīšanai ir vēl arī ekoloģiska nozīme, jo lieli to daudzumi, izvadīti atmosfērā, kaitē cilvēku veselībai un augiem ne tikai rūpniecības uzņēmumu telpās un to teritorijā, bet plašā apkārtnē. Termoelektrostacijās, kur diennakti sadedzina 1000 t putekļveida akmeņogļu, kas satur 1,5% sēra, atmosfērā izvada līdz 15 t sēra vai 30 t sēra dioksida un arī līdz 80 t pelnu. Ja neizdara atputekļošanu, no 100 m augsta dūmeņa daļiņas ar izmēru 10 ... 20 μ m izplatās līdz 16 km rādiusā.

Gāzveida nevienveidīgo sistēmu raksturojums un sadalīšana. Gāzveida neviendabīgās sistēmas sastāv no dispersijas vides (gāzes) un dispersās fāzes, kas var būt cietas vielas daļiņas vai šķidrums pilieni.

Pēc disperso daļiņu lieluma sistēmas iedala 1) *putekļos* — cieto daļiņu izmērs $>0,3 \mu\text{m}$; 2) *dūmos* — cieto daļiņu izmērs $<0,3 \mu\text{m}$; 3) *miglās* — šķidruma pilieni izmērs aptuveni $30 \mu\text{m}$ un mazāks. Šāds gāzveida neviendabīgo sistēmu iedalījums ir relatīvs.

Atkarībā no rašanās veida gāzveida neviendabīgās sistēmas iedala šādi:

1) *mehāniskās gāzveida sistēmas*, kas rodas, smalcinot cietas vielas, izsmidzinot šķidrumus un citos procesos. Parasti daļiņu izmērs šīm sistēmām ir $5 \dots 50 \mu\text{m}$;

2) *kondensētās gāzveida sistēmas*, kas rodas, kondensējoties gāzēm vai tvaikiem vai arī savstarpēji reaģējot gāzēm, pie tam rodas cietas vai šķidrās daļiņas ar izmēru $0,3 \dots 0,001 \mu\text{m}$.

Putekļu, dūmu un miglu sadalīšanai izmanto divējādus paņēmienus: 1) *sauso sadalīšanu* un 2) *slapjo sadalīšanu*.

Sausā putekļu, dūmu un miglu sadalīšana ietver

1) *gāzu mehānisko attīrīšanu*, kurā ietilpst a) daļiņu nogulsnešana smaguma spēka ietekmē atputekļošanas kamerās; b) daļiņu atdalīšana inerces spēka ietekmē, mainot gāzes virzienu atputekļošanas kamerās (kamerās ar šķērssienām, ar stieplēm, žalūzijām u. c.); c) daļiņu nodalīšana centrālās spēka ietekmē dažādos ciklonos; d) daļiņu nošķiršana, filtrējot putekļainās gāzes;

2) *gāzu elektrisko attīrīšanu*, kas pamatojas uz daļiņu atdalīšanu augstsprieguma elektriskajā laukā dažāda veida elektrofiltrās.

Slapjā putekļu, dūmu un miglu sadalīšana pamatojas uz to, ka, putekļainām gāzēm saskaroties ar šķidrumu, daļiņas vai nu izšķīst, vai arī slapinās un aizplūst līdz ar šķidrumu. Daļiņas saskaras ar šķidrumu galvenokārt inerces vai centrālās spēku ietekmē. Slapjai gāzu attīrīšanai lietojamās iekārtas: a) torņi (skruberi), kuros izsmidzina šķidrumu vai aprasina pildījumu; b) cikloni, kuros gar sienām plūst šķidrums; c) iekārtas, kurās gāze plūst cauri šķidrums slānim; d) mehāniskie gāzu attīrītāji (dezintegratorveida).

Pēdējā laikā gāzu attīrīšanai lieto arī ultraskaņu. Tā veicina dūmu un miglas sīko daļiņu aglomerāciju, kuras pēc tam nodala pēc viena no iepriekš minētajiem veidiem. Daļiņas var arī nogulsnēt uz šķidrums pilieniem, kurus iegūst, kondensējot tvaiku.

Izvēloties konkrētu attīrīšanas veidu, vadās no gāzes fāzes un daļiņu īpašībām, daļiņu lieluma, koncentrācijas un vēlamās attīrīšanas pakāpes. Atkarībā no daļiņu lieluma un attīrīšanas pakāpes

5.1. tabula

Atputekļošanas iekārtās atdalāmo daļiņu lielums un to attīrīšanas pakāpe

Iekārtas veids	Atdalāmo daļiņu lielums, μm	Attīrīšanas pakāpe, %
Atputekļošanas kameras	5...2000	40...70
Cikloni	3...100	45...95
Gāzu filtri	2...10	85...99
Elektrofiltri	0,005...10	85...99
Slapjie atputekļotāji	0,01...10	85...99

atputeļošanas iekārtas var izvēlēties pēc 5.1. tabulā sakopotajiem datiem. Šie skaitļi rāda, ka vispilnīgāk daļiņas nodala ar elektrofiltriem, slāpajiem attīrītājiem un gāzu filtriem. Atputeļošanas kamerās un cikloni lietojami iepriekšējai attīrīšanai.

5.1. SAUSĀ GĀZVEIDA NEVIENDABĪGO SISTĒMU SADALĪŠANA

5.1.1. Mehāniskā gāzu attīrīšana

Gāzu attīrīšana smaguma spēka ietekmē. Gāzu attīrīšanu smaguma spēka ietekmē izdara dažāda veida atputeļošanas kamerās.

Atputeļošanas kamerās. Atputeļošanas kamerās daļiņas smaguma spēka ietekmē nogulsnējas uz grīdas vai plauktiem.

Daļiņu nogulsnēšanās ātrumu nosaka pēc 2. nodaļā dotajām formulām.

Lai daļiņas kamerā nogulsnētos un nogulsnējušās daļiņas netiktu paceltas, gāzes plūsma nedrīkst pārsniegt noteiktu ātrumu, ko var aprēķināt pēc šādas formulas:

$$\omega_{\max} \leq 3,6 \sqrt{\frac{d(\rho_d - \rho_v)}{\rho_v}}, \quad (5.1)$$

kur ω_{\max} — maksimālais gāzes plūsmas ātrums, m/s; d — daļiņas diametrs, m; ρ_d — daļiņu blīvums, kg/m³; ρ_v — gāzes blīvums, kg/m³.

Faktiski gāzes plūsmas ātrumu ω izvēlas ievērojami mazāku par ω_{\max} :

$$\omega = (0,2 \dots 0,3) \omega_{\max}.$$

Kad daļiņa A (5.1. att.) nonākusi atputeļošanas kamerā, gāzes plūsma to virza horizontāli uz priekšu ar ātrumu ω (gāzes plūsmas ātrums). Tā kā uz daļiņu darbojas smaguma spēks, kas vērsts vertikāli uz leju, tad šī spēka ietekmē daļiņa pārvietojas ar ātrumu ω_n . Tādēļ pēc sekundes daļiņa A atradīsies punktā 3.

Lai daļiņa, kas iekļuvusi kamerās sākumdaļas visaugstākajā vietā H , varētu nogulsnēties, tai jāatrodas kamerā noteiktu laiku

$$\tau_1 = \frac{H}{\omega_n}.$$

Ja kameras garums ir L , gāzes uzturēšanās laiks kamerā ir

$$\tau = \frac{L}{\omega}.$$

Lai atputeļošanas kamera darbotos apmierinoši, tad $\tau \geq \tau_1$. Kameras normāla darbība ir iespējama, ja $\tau = \tau_1$; tad

$$\frac{H}{\omega_n} = \frac{L}{\omega}.$$

Gāzes plūsmas ātrums $w = \frac{Q}{bH}$, kur Q — atputeķlošanas kameras ražīgums, m^3/s ; b un H — kameras platums un augstums, m.

Var rakstīt, ka

$$\frac{H}{w_n} = \frac{LbH}{Q}$$

Tātad atputeķlošanas kameras ražīgums

$$Q = w_n L b = w_n S, \quad (5.2)$$

kur S — atputeķlošanas kameras grīdas laukums, m^2 .

Formula (5.2) rāda, ka atputeķlošanas kameras ražīgums atkarīgs no grīdas laukuma un daļiņu nogulsnešanās ātruma, bet nav atkarīgs no kameras augstuma. Tādēļ atputeķlošanas kameras izveido tā, lai nogulsnešanās laukums būtu pēc iespējas lielāks (kameras grīdu izveido slīpu vai arī kamerā ievieto vairākus plauktus).

Atputeķlošanas kameras platumu aprēķina šādi:

$$b = \frac{S}{L}$$

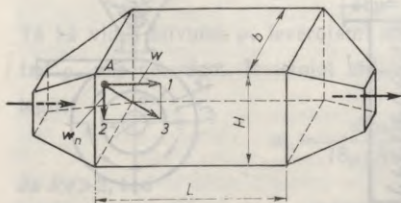
Kameras augstums $H = \tau w_n$.

Daži atputeķlošanas kameras konstruktīvie izveidojumi. Atputeķlošanas kameras parasti ir lielas būves, kuras lieto iepriekšējai rupjāko daļiņu atdalīšanai. Tajās iespējams nogulsnēt līdz 70% disperso daļiņu.

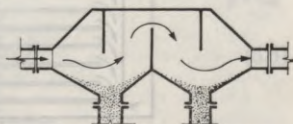
Vienkārša atputeķlošanas kamera parādīta 5.2. attēlā. Tajā izveidota slīpa nogulsnešanās virsma. Šķērssienas palielina gāzes nioto ceļu, kā arī aiztur puteķļus.

Gāzu atputeķlošanai lieto arī plauktveida atputeķlošanas kameras (5.3. att.), kas parasti saslēgtas pa divām paralēli. Tikmēr, kamēr vienu kameru tīra, otra darbojas. Šajās atputeķlošanas kamerās nogulsnešanās virsmas palielināšanai novietoti citi virs cita vairāki plaukti 1. Gāzes plūsmas ātrums starp plauktiem parasti ir 0,3... 0,4 m/s. Atputeķlošanas kameras tīrīšanai preti katram plauktam ir lūkas. Kameras garums ir vismaz 4 m.

Atputeķlošanas kameras pozitīvā īpašība ir necīgā pretestība (gāzes ātrumi tajās ir mazi).



5.1. att. Atputeķlošanas kameras shēma.



5.2. att. Vienkāršākās atputeķlošanas kameras shēma.

Gāzu attīrīšana centrālās spēka ietekmē. Neviendabīgo gāzveida sistēmu sadalīšanu var ievērojami intensificēt, izdarot atputekļošanu centrālās spēka laukā. Šim nolūkam izmanto *ciklonus*.

Cikloni. Cikloni pieder pie vienkāršākajām atputekļošanas iekārtām. Putekļainās gāzes ciklonā ievada pa cauruli 1, kas piestiprināta ciklona cilindriskās daļas augšpusē un veido pieskari tās virsmai (5.4. att.). Tas nepieciešams, lai gāze ciklonā virzītos pa spirāli uz leju. Rotācijas kustības dēļ cietās daļiņas centrālās spēka ietekmē koncentrējas pie ciklona sienām. Centrālās spēks, kas darbojas uz gāzes daļiņu, ir

$$F'_c = \frac{mu_1^2}{R_{vid}}, \quad (5.3)$$

bet uz tāda paša izmēra cieto daļiņu tas ir

$$F''_c = \frac{m_1u_2^2}{R_{vid}}, \quad (5.4)$$

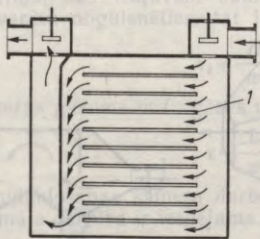
kur F'_c , F''_c — centrālās spēks, kas darbojas uz gāzes daļiņu un cieto daļiņu, N; m — gāzes daļiņas masa, kg; m_1 — tāda paša izmēra cietās daļiņas masa, kg; $u_1 = u_2$ — daļiņu lineārais ātrums ciklonā, m/s; R_{vid} — ciklona vidējais rādiuss, m.

Tā kā $m < m_1$, tad arī $F'_c < F''_c$ un cietās daļiņas virzīsies pret ciklona virsmu ar lielāku spēku nekā gāzes daļiņas.

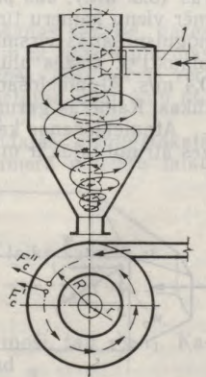
Neviendabīgo sistēmu sadalīšanas efektivitāti centrālās spēka laukā raksturo Frūda kritērijs — attiecība starp centrālās spēku $F_c = \frac{mu^2}{R_{vid}}$ un smaguma spēku $F_s = mg$.

$$Fr_c = \frac{F_c}{F_s} = \frac{mu^2}{R_{vid}mg} = \frac{u^2}{R_{vid}g}$$

So attiecību sauc arī par *atdales faktoru* un apzīmē ar K_a . Jo skaitliski lielāks atdales faktors, jo labāk atdalās cietās daļiņas. Vienlaikus



5.3. att. Plauktveida atputekļošanas kameras shēma.



5.4. att. Ciklona shēma.

ar rotācijas kustību gāzes pārvietojas arī paralēli ciklona asij pa spirāli uz leju, pie tam gar ciklona cilindriskās un koniskās daļas sienām gāzes plūsma virzās uz konusa virsotni, bet ciklona centrālajā daļā gāzes plūsma virzās pa spirāli uz augšu.

Parasti cikloni novietoti vertikāli — ar konisko daļu uz leju.

Ciklonā atdalāmās daļiņas minimālo diametru var noteikt pēc šādas formulas:

$$d_{\min} = 0,96 \sqrt{\frac{\mu g R}{\pi n u \rho_d}}, \quad (5.5)$$

kur μ — vides viskozitāte, Pa·s; g — brīvās krišanas paātrinājums, m/s²; R — ciklona rādiuss, m; n — gāzes apgriezieni ciklonā, parasti 1,5 reizes; u — gāzes ātrums ciklonā, m/s, parasti tas par 15...20% mazāks nekā gāzes ātrums, ieplūstot ciklonā; ρ_d — disperso daļiņu blīvums, kg/m³.

Ciklona darbību ievērojami ietekmē cieto daļiņu izmērs un blīvums. Daļiņas ar izmēru 5 μ m un mazākas cikloni aiztur vāji, bet daļiņas, kas mazākas par 1 μ m, cikloni praktiski neatdala.

Pieaugot daļiņu koncentrācijai gāzē, palielinās ciklona attīrīšanas spēja. Gāzes temperatūra un viskozitāte atputekļošanu jūtami neietekmē. Taču to ievērojami ietekmē mitrums. Ja kāda iemesla dēļ ciklonā kondensējas ūdens tvaiks, atputekļošana pasliktinās.

Ciklona darbību būtiski ietekmē ieplūstošās gāzes ātrums. Gāzes optimālais ātrums atkarīgs no ciklona konstrukcijas, kā arī no cieto daļiņu granulometriskā sastāva. Ieplūdes ātrums ir 18...20 m/s. Nav vēlams, ka ieplūdes ātrums ir mazāks par 12 m/s, jo tad atputekļošana pasliktinās. Gāzes lineārais ātrums ciklonā ir 12...14 m/s, izplūdes caurulē — 4...8 m/s. Gāzes ātrums ciklonā ietekmē daļiņu nogulsnešanās ātrumu.

Cikloniem daļiņu nogulsnešanās ātrumu ω_n nosaka pēc formulām (2.82) un (2.83), ko lieto atputekļošanas kamerām, tikai nogulsnešanās ātrums jāpareizina ar atdales faktoru K_a .

Ciklonos atkarībā no Reynoldsa kritērija vērtības izšķir trīs gāzes plūsmas veidus (lamināro, pārejas un turbulento plūsmu).

Ja $Re < 2$, tad aprēķiniem lieto Stoksa formulu:

$$\omega_n = \frac{d^2(\rho_d - \rho_v)}{18\mu} K_a.$$

Tā kā vides blīvums ρ_v ievērojami mazāks par daļiņas blīvumu ρ_d , tad ρ_v var neievērot. Ievietojot atdales faktora K_a izteiksmi $\frac{u^2}{gR_{vid}}$, iegūst

$$\omega_n = \frac{d^2 \rho_d u^2}{18\mu g R_{vid}}. \quad (5.6)$$

Ja $Re > 2$, tad

$$\omega_n = \sqrt{\frac{4d(\rho_d - \rho_v)u^2}{3\zeta \rho_v R_{vid}}}.$$

Koeficients $\zeta=f(Re)$; lai iegūtu šo koeficientu, jāiegūst Reynoldsa kritērijs. Reynoldsa kritēriju iegūst līdzīgi kā nostādīnāšanā, kas notiek smaguma spēka ietekmē atkarībā no Arhimēda kritērija, ievērojot atdales faktoru (sk. 85. lpp.):

$$\text{ja } Ar K_a < 36, \text{ tad } Re = \frac{Ar K_a}{18};$$

$$\text{ja } 36 < Ar K_a < 84 \cdot 10^3, \text{ tad } Re = \left(\frac{Ar K_a}{13,9} \right)^{1,4} \text{ un,}$$

$$\text{ja } Ar K_a > 84 \cdot 10^3, \text{ tad } Re = 1,71 \sqrt{Ar K_a}.$$

Ja Reynoldsa kritērijs ir zināms, nogulsnešanās ātrumu var aprēķināt pēc formulas:

$$\omega_n = \frac{Re \mu}{d_{pv}}$$

No formulas (5.6) redzams — jo lielāks gāzes ātrums ciklonā u , jo lielāks daļiņu nogulsnešanās ātrums ω_n . Gāzes ātruma pieaugums ciklonā palielina tā pretestību, tādēļ parasti gāzes ieplūdes ātrums nepārsniedz 20 m/s.

Gāzes apgriezienu skaits, spriežot pēc formulas (5.5), ietekmē attīrīšanas pakāpi. Eksperimenti rāda, ka liels gāzes plūsmas apgriezienu skaits nevis uzlabo atputekļošanu, bet pasliktina to.

Ciklona izmēriem ir liela nozīme putekļu atdalīšanā. Attīrot gāzi dažāda izmēra ģeometriski līdzīgos ciklonos, attīrīšana uzlabojas, ja samazina ciklona rādiusu. Tas izprotams arī no formulas (5.6), jo, samazinoties R_{vid} , pieaug daļiņu nogulsnešanās ātrums ω_n , bez tam samazinās ceļš, kas jāveic daļiņām radiālā virzienā līdz ciklona sienai. Pēdējā laikā vairs nelieto liela izmēra ciklonus, bet mazus ciklonus komplektē vienā iekārtā, iegūstot tā saucamo *ciklonu bateriju (multiciklonu)*.

Ciklona atsevišķo elementu izmēru maiņa atputekļošanu ietekmē dažādi. Piemēram, eksperimenti rāda, ka gāzes attīrīšana uzlabojas līdz ar gāzes izplūdes caurules diametra d_c un ciklona cilindriskās daļas D attiecības samazināšanos. Šāda ciklona izmēru maiņa ievērojami paaugstina pretestību. Parasti dažādās ciklonu konstrukcijās $\frac{d_c}{D} = 0,55 \dots 0,65$. Putekļu izvadāmās caurules diametra d_1 attiecība pret ciklona diametru D parasti ir $0,13 \dots 0,18$. Pagarinot cilindrisko daļu, attīrīšana kaut cik jūtami neuzlabojas. Liela nozīme ir savlaicīgai putekļu izvadišanai no ciklona.

Ļoti nelabvēlīgi ciklona darbību ietekmē gaisa pieplūdums caur neblīvām vietām. Ja gaisa pieplūdums ir $10 \dots 15\%$ no kopējā gāzes tilpuma, ciklona darbība tiek pilnīgi dezorganizēta.

Atdalāmajām daļiņām beržoties gar ciklona iekšējo virsmu, tā nolietojas. Tādēļ ciklonus izgatavo no $3 \dots 5$ mm bieza tērauda skārda, šuves sametinoš. Vēlams, lai ciklona iekšpuse būtu pulēta, kā arī bez iesitumiem.

Ciklona hidraulisko pretestību nosaka pēc šādas formulas:

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho_v \omega^2}{2}, \quad (5.7)$$

kur Δp — ciklona hidrauliskā pretestība, Pa; ζ — ciklona pretestības koeficients; ω — gāzes ātrums, tai ieplūstot ciklonā, m/s; ρ_v — gāzes (vides) blīvums, kg/m³.

Ciklonu pretestība ir samērā liela: 400...850 Pa (40...85 mm H₂O). Šīs pretestības pārvarēšana saistīta ar noteiktu enerģijas patēriņu. Nosakot ciklona pretestību, formulā (5.7) ievieto vai nu *gāzes ieplūdes ātrumu*, vai arī gāzes fiktīvo ātrumu ciklonā, t. i., ātrumu, kāds būtu gāzei, ja tā plūstu caur visu cilindriskās daļas šķērsriezumu. Katram no šiem gadījumiem atbilst savs pretestības koeficients ζ , tādēļ, nosakot ciklona pretestību, jāzina, attiecībā uz kādu gāzes ātrumu ir lietojams pretestības koeficients ζ .

Ciklona lietderības koeficients η atkarīgs no putekļu īpašībām, ciklona diametra, kā arī no gāzes ātruma ω , t. i., no attiecības $\frac{\Delta p}{\rho_v}$.

Ciklona darbības efektivitāti raksturo ar lietderības koeficientu, ko izsaka procentos. To sauc par *atputeķļošanas pakāpi* un aprēķina šādi:

$$\eta = \frac{C_1 - C_2}{C_1} 100,$$

kur C_1 — putekļu koncentrācija gāzē pirms ciklona, kg/m³; C_2 — putekļu koncentrācija gāzē aiz ciklona, kg/m³.

Atputeķļošanas pakāpe cikloniem vidēji ir 70...80% un var ievērojami mainīties atkarībā no putekļu īpašībām un atputeķļošanas apstākļiem.

Ciklonu veidi. Ķīmiskajā rūpniecībā gāzveida neviendabīgo maisījumu sadalīšanai lieto galvenokārt šādus ciklonus: *koniskos* ciklonus; *НИИОГаз*¹ ciklonus; *ciklonu baterijas (multiciklonus)*.

Parasti ciklonus novieto pirms ventilatora. Dažreiz tie var būt novietoti arī aiz ventilatora.

Zāvēšanas tehnikā dūmgāzu attīrīšanai, ja to temperatūra ir augstāka par 450°C, ciklona cilindrisko un konisko virsmu veido no ugunsizturīgiem ķieģeļiem, bet izvadcauruli izgatavo no tērauda, kas izturīgs pret augstu temperatūru, vai no keramikas.

Koniskie cikloni. Tie ir vieni no vienkāršākajiem cikloniem. To augšējā daļa izveidota kā vītnes virsma (5.5. att.); tas aizkavē gāzes plūšanu uz augšu. So ciklonu atputeķļošanas pakāpe ir 40...70%, bet atkarībā no attīrāmās gāzes īpašībām var sasniegt pat 85...90%. Ciklona pretestības koeficients $\zeta = 6,1...7,7$ attiecas uz gāzes ieplūdes ātrumu ciklonā.

¹ Научно-исследовательский институт по промышленной и санитарной очистке газов.

НИИОГАЗ cikloni. Šā veida ciklonos gāzi ievada pa slīpu cauruli leņķī $\alpha=11 \dots 24^\circ$ pret horizontu (5.6. att.). Bez tam tiem ir pagarināta cilindriskā daļa. Šo ciklonu lietderības koeficients palielinās, ja attiecība starp ciklona pretestību un gāzes blīvumu $\frac{\Delta p}{\rho v} \approx 550 \dots 750$.

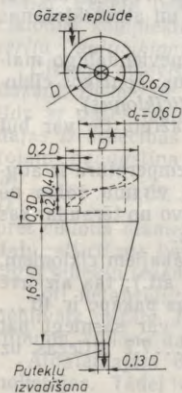
НИИОГАЗ ciklonu pamatveidi ir cikloni ЦН-11, ЦН-15 un ЦН-24. Parasti to cilindriskās daļas diametrs $400 \dots 800$ mm. Šie cikloni labi aiztur daļiņas ar mazu diametru, piemēram, ciklons, kuram $D=600$ mm, aiztur daļiņas pat ar izmēru $10 \mu\text{m}$ (līdz 94%). Izdevīgos ekspluatācijas apstākļos НИИОГАЗ ciklonos atputekļošanas pakāpe ir pat 90...95%.

Sos ciklonus 1 bieži uzstāda virs putekļu krātuves 2, bet virs gāzes izplūdes caurules novieto gliemežveida elementu 3, kā tas parādīts 5.6. attēlā. Gliemežveida elements samazina ciklona pretestību. Ražīguma palielināšanai НИИОГАЗ ciklonus komplektē pa 2...6 cikloniem vienā agregātā.

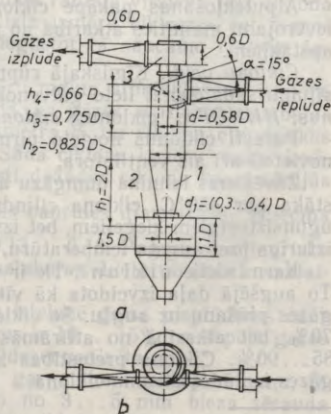
Ciklonu baterija. Atputekļošanas efektu ciklonos iespējams ievērojami palielināt (sk. formulu (5.6)), samazinot cilindriskās daļas rādiusu (palielinās nogulsnešanās ātrums w_n).

Lai ar maza diametra cikloniem atputekļotu lielus gāzes tilpumus, vairākus šāds ciklona elementus saslēdz paralēli vienā iekārtā — ciklonu baterijā (multiciklonā).

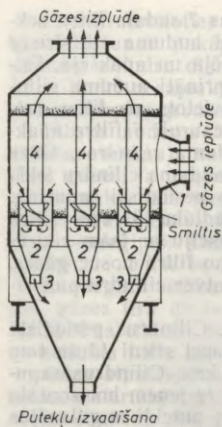
Ciklonu baterija parādīta 5.7. attēlā. Putekļainās gāzes ievada pa cauruli 1. Tās nokļūst atsevišķos ciklona elementos 2, kuros sāk virzīties pa spirāli. Šeit putekļus nodala, un tie izbirst pa konusa apakšu 3. Atputekļotās gāzes ceļas augšup pa centrālo izplūdes cauru-



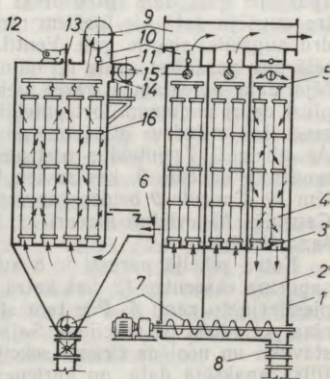
5.5. att. Koniskā ciklona shēma.



5.6. att. НИИОГАЗ ciklona shēma.



5.7. att. Ciklonu baterijas shēma.



5.8. att. Auduma filtra shēma.

ruli 4, un tās izvada no ciklonu baterijas. Sādu elementu skaits ciklonu baterijās ir dažāds: iekārtās PIC-25 ir līdz 60 elementu.

Atputekļošanas pakāpe ciklonu baterijās sasniedz vidēji 80...90%, un tā atkarīga no iekārtas izmēriem, gāzes blīvuma, disperso daļiņu lieluma un gāzes padeves vienmērīguma. Šos ciklonus lieto gāzēm ar temperatūru līdz 500°C.

Ciklonu bateriju trūkumi: dažreiz atsevišķi elementi vai pat veselas to grupas aizsērē (biežāk tas gadās, ja gāzi pievada nevienmērīgi vai arī ja gāze ir mitra); nodalot abrazīvās daļiņas, ātri nolietojas ciklona elementi; līdz ar to ievērojami pasliktinās atputekļošana.

Gāzu filtrēšana. Gāzveida nevienmērīgās sistēmas iespējams attīrīt, laižot putekļainās gāzes cauri kokvilnas, vilnas, stikla un tamliudzīgiem audumiem. Audums aiztur cietās daļiņas, bet gāze izplūst tam cauri.

Atkarībā no konstrukcijas auduma filtrus iedala *rāmju filtrus* un *cilindriskajos filtrus*.

Rāmju filtrus putekļainās gāzes plūst caur audumu, kas uzstiepts uz rāmja; *cilindriskajos filtrus* gāzes laiž cauri audumam, kas sašūts cilindru veidā, kuru augšējie gali ir slēgti, bet apakšējie vaļēji. Rāmju filtrus lieto reti, jo tie ir daudz lielāki par cilindriskajiem filtriem.

Ja ir augsta putekļu koncentrācija, lieto auduma filtrus, kurus periodiski caurpūš ar gaisu pretēji gāzes plūšanas virzienam.

5.8. attēlā parādīts cilindriskais auduma filtrs ar auduma caurpūšanas iekārtu. Filtra apvalku 1 izgatavo no 3...5 mm biezas

metināta tērauda loksnes. Vertikālās šķērssienas 2 sadala filtru sekcijās. Horizontālais režģis 3, kurā iestiprināti auduma cilindru 4 apakšējie gali, dala filtru divās daļās — augšējā un apakšējā. Filtra augšējā daļā pie īpašiem rāmjiem 5 piestiprināti auduma cilindru augšējie, slēgtie gali. Ventilators, kurš novietots aiz filtra (attēlā nav parādīts), rada retinājumu, tādēļ pa cauruli 6 filtra apakšējā daļā putekļainās gāzes tiek iesūktas auduma cilindros. Gāze plūst cauri audumam, bet putekļi nogulsņējas auduma cilindru iekšpusē. Lai cilindrus atbrīvotu no putekļiem, tos periodiski sapurina. Ar gliemezi 7 putekļus aiztransportē uz izvadlūku 8. Virs filtra novietota caurule 9, kas savienota ar katru sekciju ar īsām caurulēm 10. Caurule 9 beidzas ar ventilatoru, kas no filtra nosūc gāzes. Caurulēs 10 ievietoti aizvari 11, ko aizver vai atver cilindru pūrināšanas iekārta.

Katrā sekcijā parasti ir 8 auduma cilindri. Cilindrus periodiski sapurina ekscentrs 12, kas katrā apgriezienā paceļ stieni 13 un tam piestiprināto rāmi 5. Pēc tam stienis ar rāmi krit. Cilindrus sapurina periodiski pa sekcijām. Sajā laikā aizvari 11 ieņem horizontālu stāvokli un noslēdz tīrāmo sekciju no pārējām; putekļi nogulsņējas filtra apakšējā daļā, no kurienes tos aizvāc. Atvienojot sekciju no ventilatora, vienlaikus atveras aizvars 14 un sekcijā pa cauruli 15 tiek ievadīts tīrs gaiss, kas caurpūš audumu. Auduma periodiska caurpūšana veicina cieto daļiņu atdalīšanos no auduma cilindra sapūrināšanas laikā.

Sekcijas darba ciklā ietilpst atputekļošana (parasti 5...8 min) un cilindru atbrīvošana no putekļiem (20...30 s).

Rūpniecības apstākļiem piemērotāki *filtri, kas darbojas retinājumā*. Maza ražīguma filtriem dažreiz putekļainās gāzes ventilators pievada ar spiedienu (ventilators novietots pirms filtra). Ja ventilators novietots pirms filtra, tas ātri nolietojas un neattīrītā gāze var izplūst no filtra apkārtējā telpā.

Filtra normālas darbības nodrošināšanā liela nozīme ir iekārtas blīvumam un gāzes ātrumam. Palielinot gāzes ātrumu, filtra ražīgums pieaug. Taču, ja gāzes ātrums liels, auduma cilindri ātri nolietojas, tādēļ vēlams gāzes ātrums ir 0,25...3 m/min atkarībā no cieto daļiņu veida un koncentrācijas. Parasti gāzes ātrumu nosaka eksperimentāli. Piemēram, cinka oksīda atdalīšanai bez filtra caurpūšanas, ja putekļu koncentrācija 25...50 g/m³, gāzes ātrums ir 0,25...0,35 m/min. Turpreti, ja filtru caurpūš, tad gāzes ātrumu iespējams palielināt līdz 0,9...1,0 m/min. Jo šķautņainākas daļiņas un lielāka to koncentrācija, jo pieļaujams mazāks ātrums.

Cilindru audumu izvēlas atkarībā no gāzes un daļiņu īpašībām. Šķiedrveida daļiņām noderīgs kokvilnas audums, noapaļotām daļiņām — vilnas audums. Gāzes filtrēšanu nelabvēlīgi ietekmē mitrums, jo tas izraisa filtra aizsērēšanu. Tādēļ gāzes temperatūrai jābūt vismaz 10...20°C augstākai par rasas punktu. Lai gāzes temperatūra nepazeminātos, filtru caurpūšot, ievada siltu gaisu.

Atkarībā no gāzes ātruma auduma filtra pretestība ir 600...1200 Pa (60...120 mm H₂O).

Pareizi izvēloties audumu un ieturot vienmērīgu darba režīmu, atputekļošanas pakāpe gāzes filtros sasniedz 95...98%. Filtros auduma cilindru diametrs ir 190...220 mm un garums 2...3,5 m. Lai cilindri nesaplaktu, ik pēc 300...500 mm tajos iešuj 3...5 mm resnas stieples gredzenus 16.

Filtros audums ātri nolietojas un, ja nelieto speciālu audumu (stikla audumu), nav iespējams atputekļot agresīvas gāzes, kā arī citas gāzes, ja to temperatūra ir augstāka par 125°C. Vilnas audumiem maksimālā pieļaujamā gāzes temperatūra ir 125°C, bet kokvilnas audumiem — 90°C. Filtru lielās pretestības dēļ jāpatērē daudz elektroenerģijas. Auduma filtru iekārtu elektromotoru darbināšanai patērē 2...5 kW uz 10 000 m³ attīrāmās gāzes.

Lai iegūtu tīrāku gāzi un filtrējošais audums tik ātri nenolietotos, gāzes tīra divās pakāpēs. Vispirms attīra gāzi, laižot to cauri НИИОГаз ciklonu baterijai, kurā gāzi atputekļo līdz 95%; pēc tam ar auduma filtru aiztur sīkās daļiņas, kas izgājušas cauri ciklonam.

Gāzu atputekļošanai bez auduma filtriem lieto arī dažādus šķiedrainā materiāla (azbesta, stikla vates u. c.) slāņus, porainas keramikas čaulītes, plāksnes, metālkeramikas izstrādājumus.

5.1.2. Elektriskā gāzu attīrīšana

Elektriskai gāzu attīrīšanai lieto *elektrofiltrus*. Elektrofiltriem salīdzinājumā ar atputekļošanas ziņā līdzīgiem auduma filtriem pretestība ir 6...8 reizes mazāka. Ar elektrofiltriem var atputekļot agresīvas un karstas gāzes (pat ja to temperatūra līdz 500°C). Atputekļošanu elektrofiltrus iespējams pilnīgi automatizēt. Elektrofiltru ražīgums 1,8...111 m³/s (6500...400 000 m³/h).

Taču auduma filtri salīdzinājumā ar elektrofiltriem ir 3...4 reizes lētāki un aizņem mazāku telpu.

Elektrofiltru darbības princips un uzbūve. Elektrofiltru iekārta sastāv no divām daļām: no atputekļošanas kameras (elektrofiltra), caur kuru laiž attīrīšanai paredzētās gāzes, un augstsprieguma agregāta, kas pārveido maiņstrāvu ar spriegumu 220, 380, 500 V augstsprieguma (līdz 90 000 V) līdzstrāvā, kuru pievada elektrofiltram.

Elektrofiltru darbība pamatojas uz to, ka, laižot puteļainās gāzes cauri augstsprieguma elektriskajam laukam, kas izveidojas starp diviem dažādi uzlādētiem elektrodiem, notiek gāzes jonizācija. Joni adsorbējas uz daļiņu virsmas, uzlādē tās un līdz ar to nosaka šīs daļiņas tālāko kustību virzienā uz pretēji lādēto elektrodu — šķēršām gāzes plūsmai.

Gaisa (gāzes) jonizācija starp elektrodiem var notikt jonizatoru vai augstsprieguma strāvas ietekmē.

Jonizatori ir elektromagnētiskie viļņi, kuru darbības enerģija uz molekulu ir lielāka par jonizācijas potenciālu (enerģija, kas jāpieļiek, lai jonizētu molekulu). Vājāk saistītiem ārējās čaulas elektroniem jonizācijas darbs ir 4...25 elektronvolti.

Gāzes jonizē *kosmiskie stari, rentgenstari un ultravioletie stari*. Jonizatori no gāzes molekulas atrauj vienu vai vairākus elektronus. Līdz ar to molekulu pozitīvais (kodola) lādiņš pārsniedz elektronu lādiņu un molekula uzlādējas pozitīvi — kļūst par pozitīvu jonu. Atrautie elektroni (kā arī elektroni, ko izdala jonizatori) saistās ar neitrālām molekulām un veido negatīvus jonus. Radušos jonu ietekmē gāze kļūst par strāvas vadītāju.

Ja starp elektrodiem, kas atrodas gaisā (gāzē), kurā ir joni, rada spriegumu starpību, tad elektriskā lauka ietekmē joni sāk pārvietoties¹. Jo spēcīgāks elektriskais lauks, jo lielāku paātrinājumu iegūst joni, zināmā spriegumā (gaisam normālos apstākļos aptuveni 16 kV/cm) tie, virzoties ar lielu ātrumu, gāzes molekulas sašķel jonus (pozitīvos jonus) un elektronus, kuri tālāk turpina gāzes jonizāciju. Šādu jonizāciju sauc par *triecienjonizāciju*.

Elektrofiltra darbības pamatā ir elektriskā izlāde gāzēs: *koronas izlāde* un *dzirksteļizlāde*. *Koronas izlāde* notiek nelielā apvidū ap vadītāju, nesasniedzot otru elektrodu. Šāda izlāde uzskatāma par nepilnīgu gāzes slāņa caursiti. *Dzirksteļizlāde* notiek neatkarīgi no elektrodu konfigurācijas un ir gāzes slāņa pilnīga caursite starp elektrodiem. Atkarībā no strāvas avota jaudas dzirksteļizlāde var pāriet lokizlādē.

Koronas izlādei raksturīgs īpatnējs, bāli zils spīdums ap mazākās virsmas elektrodu. Šajā izlādē joni no jonizācijas vietas, kas sakrīt ar spīduma robežām, pārvietojas uz pretējo elektrodu, tādēļ starp elektrodiem rodas strāvas plūsma. Elektriskā izlāde gāzē atkarīga no strāvas sprieguma, gāzes spiediena, temperatūras un elektrodu izmēriem.

Normālai elektrofiltra darbībai nepieciešama koronas izlāde. Koronas izlādi var iegūt ar līdzstrāvu vai maiņstrāvu. Elektrofiltros galvenokārt izmanto līdzstrāvu, jo ar to var panākt augstāku atputekļošanas pakāpi. Normālu koronas izlādi sasniedz, ja spriegums 40...70 kV.

Atkarībā no konstrukcijas elektrofiltros iedala *cauruļu* (5.9. att. a) un *plākšņu elektrofiltros* (5.9. att. b).

Elektrofiltru pamatā ir koronas elektrodi 1, nogulsnešanās elektrodi 2 un izolatori 3. Koronas elektrods ir apaļa vai profilēta stieple. Parastajos elektrofiltros stieples diametrs ir 1,5...2 mm. Izmanto arī stieples ar kvadrātveida šķērs griezumumu (4×4 vai 6×6 mm). Sērskābes miglas atdalīšanai lieto tērauda stiepli, kuras diametrs 2 mm un kura pārklāta ar svina kārtu (kopējais diametrs 5...6 mm). Koronas izlādes veicināšanai elektrodus izgatavo arī ar sešstūrainu vai zvaigzņveida šķērs griezumumu.

Koronas elektrodu savieno ar strāvas ģeneratora negatīvo polu, tādējādi sekmējot putekļu izdališanos. Negatīvie joni kustas aptuveni 1,37 reizes ātrāk nekā pozitīvie joni.

¹ Gaisā vienmēr sastopami joni, kas rodas radioaktīvu vielu sabrukšanā. Tādēļ virs Zemes gaisā vidēji ik sekundi rodas 8...9 joni uz 1 cm³, virs jūras — 5 joni uz 1 cm³.

Nogulsnēšanās elektrodu savieno ar pozitīvo polu un iezemē. Šāda elektrības pievadīšana elektrofiltriem rada jonu plūsmu no koronas elektroda uz nogulsnēšanās elektrodu.

Cietās vai šķidrās daļiņas, nokļūstot starp koronas elektrodu un nogulsnēšanās elektrodu, adsorbē jonus, iegūst negatīvu lādiņu un pārvietojas uz nogulsnēšanās elektrodu.

Neliela daļa putekļu vai pilienu koronas izlādes laukā iegūst pozitīvu lādiņu un izdalās uz koronas elektroda.

Atputekļošanas pakāpe elektrofiltrā atkarībā no strāvas veida un koronas elektroda lādiņa ir šāda: negatīvi lādētai līdzstrāvai — 95...99%; pozitīvi lādētai līdzstrāvai — 70...80%; maiņstrāvai — līdz 50%.

Putekļu kārtā uz koronas elektroda samazina koronas izlādes intensitāti (elektrofiltram pieplūstošās strāvas stiprumu) un palielina stieples diametru; tas rada dzirkstejlādi. Tādēļ koronas elektrodā apgādāti ar iekārtu, kas periodiski nokrata sakrājušos putekļus.

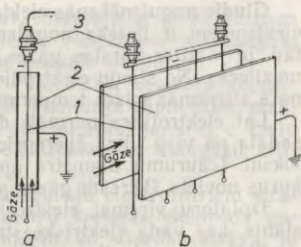
Cauruļu elektrofiltrā (5.9. att. a) nogulsnēšanās elektrodā ir apaļa vai sešstūrīga šķērsriezuma caurule. Cauruļu diametri 0,15...0,3 m, to garums 3...4 m. Garākas caurules nelieto, jo tad grūti koronas elektrodus iecentrēt un novērst to šūpošanos.

Putekļu kārtā uz nogulsnēšanās elektrodā traucē pieplūstošajām daļiņām atdot savu lādiņu. Uz virsmas sablīvētās negatīvi lādētās daļiņas atgrūž tāda paša lādiņa putekļi, kas virzās uz nogulsnēšanās elektrodu. Šāda parādība rada dzirkstejlādi un neļauj uzturēt vajadzīgo darba spriegumu. Tādēļ arī nogulsnēšanās elektrodā jāapgādā ar iekārtu, kas satricina to sienas un veicina putekļu nobīršanu.

Cauruļu filtru negatīvās īpašības — lieli izmēri, liels metāla patēriņš, cauruļu satricināšanai vajadzīga sarežģīta iekārta. Lai ietaupītu metālu un iegūtu mazāka izmēra iekārtas, caurules filtriem izgatavo ar sešstūrveida šķērsriezumu un novieto tās elektrofiltrā citu pie citas līdzīgi kā bišu šūnas.

Plāksņu elektrofiltrā (5.9. att. b) nogulsnēšanās elektrodus izgatavo no gludām vai viļņotām metāla plāksnēm, no metāla sieta, kas uzstiepts uz rāmja, vai arī no atsevišķiem cits citam blakus pakarinātiem tērauda stieņiem (diametrs 6...10 mm). Lai būtu vieglāk iecentrēt koronas elektrodus, nogulsnēšanās elektrodu augstumu izvēlas līdz 4 m.

Ja plāksņu elektrofiltrā gāzi ievada perpendikulāri koronas elektrodā, nogulsnēšanās elektroda platums (gāzes plūsmas virzienā) reti kad ir lielāks par 2,5 m. Attālums starp nogulsnēšanās elektrodā ir 200...400 mm.



5.9. att. Elektrofiltru veidi.

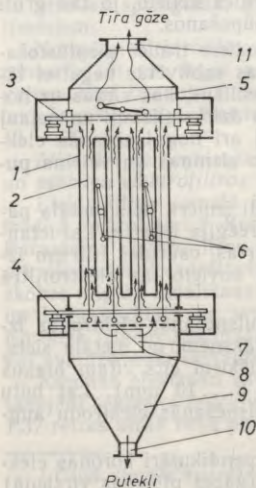
Gludie nogulsnešanās elektrodi ir viegli izgatavojami. Viņņotajiem elektrodiem ir lielāka nogulsnešanās virsma. Sieta elektrodus lieto tad, ja jāattīra karstas gāzes, jo šie elektrodi augstās temperatūrās neizliecas. No stieņu elektrodiem ērti nokratīt puteklus, un paaugstinātā attīrāmās gāzes temperatūrā tie neizliecas.

Lai elektrofiltrs normāli darbotos, gāzes plūsma vienmērīgi jāsadala pa visu filtra šķērsriezumu. To panāk ar caurumotu skārda loksni (caurumu diametrs aptuveni 50 mm) vai īpašiem režģiem, kurus novieto šķērsām gāzes plūsmai.

Izolatoru virsmai elektrofiltrs jābūt tīrai. Pat nēcīgs putekļu slānis, kas vada elektrisko strāvu, vai skābes slānis uz izolatoriem pasliktina un pat pilnīgi pārtrauc elektrofiltru darbību.

Atdalot elektrofiltrs puteklus, kas elektrisko strāvu nevada, galvenokārt metālu oksīdus, atputekļošanu veicina, ja paaugstina gāzes relatīvo mitrumu. Mitrinot gāzi, jāraugās, lai elektrofiltrā gāzes temperatūra nepazeminātos zemāk par rasas punktu, jo tad ūdens tvaiks kondensēsies.

5.10. attēlā redzama cauruļu elektrofiltra shēma. Elektrofiltrs sastāv no metāla vai grafīta caurulēm 1, kas darbojas kā nogulsnešanās elektrodi. Cauruļu centrā nostieptas stieples 2 — koronas elektrodi. Tās nostiprinātas uz augšējā 3 un apakšējā 4 rāmja. Uz nogulsnešanās elektrodu un koronas elektrodu virsmām sakrājušos puteklus nokrata, elektrodus tricīnot ar veseriem 5 un 6. Puteklaino gāzi ievada pa lūku 7. Režģis 8 nodrošina vienmērīgāku gāzes sadali pa visu filtra šķērsriezumu laukumu. Putekļu nobēršanai režģis izveidots no kustināmām daļām vai arī puteklus nobēr, satricīnot režģi ar īpašu veseri.



5.10. att. Cauruļu elektrofiltra shēma.

Puteklainā gāze ieplūst caurulēs, kur starp cauruli un koronas elektrodu izveidojas augstsprieguma elektriskais lauks. Šeit putekļi adsorbē jonus un virzās uz caurules sienām, pa kurām slid uz leju, sabirst tvirtnē 9 un tālāk pa izvadlūku 10 izkļūst no filtra. Attīrītā gāze pa cauruļu augšējiem galiem un tālāk pa lūku 11 aizplūst no filtra.

Puteklainā gāze elektrofiltrs var virzīties no apakšas uz augšu vai horizontāli. Tādēļ elektrofiltrus iedala *vertikālajos elektrofiltrs*, kur gāze plūst paralēli koronas elektrodiem, un *horizontālajos elektrofiltrs*, kur gāze plūst perpendikulāri koronas elektrodiem.

Elektrofiltrus iedala arī *sausajos elektrofiltrs*, kuros attīra cietās daļiņas, un *slapjajos elektrofiltrs*, kurus lieto galvenokārt miglas atdalīšanai. Principi-

ālas atšķirības starp šiem filtriem nav. Slapjajiem elektrofiltriem nepieciešama pastiprināta elektroizolācija. Nogulumu aizvākšanai dažos slapjajos elektrofiltrus elektrodus noskalo ar ūdeni.

Elektrofiltrus plaši lieto sērskābes rūpniecībā, cementa rūpniecībā, melnajā un krāsainajā metalurģijā, alumīnija rūpniecībā, mākslīgās gāzes rūpniecībā darvas un eļļas pilienu atdalīšanai u. c. Lielu nozīmi elektrofiltri ieguvuši arī termoelektrostacijās dūmgāzu attīrīšanai.

Projektējot elektrofiltrus, pieņem, ka cauruļu elektrofiltriem strāvas stiprums $I=0,3 \dots 0,5$ mA uz 1 metru koronas elektroda garuma; plākšņu filtriem — $0,1 \dots 0,35$ mA/m. Jo stiprāka strāva, jo labāk daļiņas izdalās no gāzes. Spriegums parasti ir $35 \dots 70$ kV.

5.2. SLAPJĀ GĀZVEIDA NEVIENDABĪGO SISTĒMU SADALĪŠANA

Slapjajām gāzes atputeļošanas iekārtām raksturīga disperso daļiņu saskare ar šķidrums virsmu. Daļiņas, saskaroties ar ūdens virsmu, pielīp tai un atkarībā no daļiņu īpašībām vai nu slapinās un nogrimst ūdenī, vai arī paliek uz virsmas. Ja daļiņas slapinās nepietiekami, tās pārklāj šķidrums virsmu un var pasliktināt atputeļošanu; tad šķidrums bieži jāmaina.

Lai gāzē esošās dispersās daļiņas labāk pieliptu šķidrums virsmai, slapjajos gāzu atputeļotājos plaši izmanto inerces un centrālās spēkus. Slapjajos gāzu attīrītājos ar nelieliem kapitālieguldījumiem un ekspluatācijas izdevumiem sasniedz augstu atputeļošanas pakāpi.

Slapjās gāzu attīrīšanas iekārtas noliecjas mazāk nekā sausie atputeļotāji. Slapjo gāzu attīrītāju negatīvās īpašības: gāzes atdziest, samitrinās, cietās daļiņas izdalās suspensiju vai šķīdumu veidā, atputeļojot agresīvas gāzes, iekārta ļoti korodē.

5.2.1. Iekārtas slapjai gāzu attīrīšanai

Slapjajai gāzu attīrīšanai lieto dažādas iekārtas: 1) *skruberus* bez pildījuma un ar to; 2) *ciklonus ar aprasināmām sienām* (centrālās spēkus skruberus); 3) *putu atputeļotājus un barbotāžas iekārtas* un 4) *mehāniskos atputeļotājus* jeb *dezintegratorveida atputeļotājus*.

Skruberi. Šīs iekārtas ir vertikāli cilindriski vai taisnstūrveida torņi. Skruberi var būt bez pildījuma un ar pildījumu.

Skruberos bez pildījuma (tie lielākoties ir cilindriski) no apakšas ievada puteļainās gāzes. Tās ceļas uz augšu un saskaras ar šķidrums pilienu, ko caur sprauslām izsmidzina gāzes telpā. Pilieni aplīp ap cietajām puteļainām, tās samitrinot. Daļiņas kļūst smagas un slīd uz leju. No skrubera apakšas tās izvada kopā ar ūdeni. Atputeļotā gāze aizplūst no skrubera augšas. Lai šķidrums pilienus gāze neaizrautu līdzī, tās ātrums nedrīkst pārsniegt $1 \dots 1,5$ m/s.

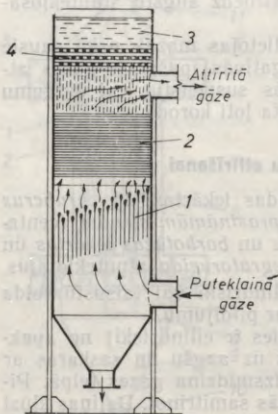
Pilnīgāk putekļus atdala *skruberis ar pildījumu*. Pildījumam jāuzlabo gāzē esošo disperso daļiņu saskare ar šķidrumu.

Atputekļošanas pakāpe skruberis bez pildījuma ir 60...75%, ar pildījumu — 75...85%. Putekļu koncentrācija attīrītājā gāzē nepārsniedz 1...2 g/m³.

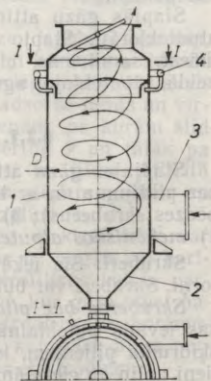
5.11. attēlā parādīts skruberis, kuru izmanto dūmgāzu atputekļošanai un sēra dioksīda saistīšanai. Skruberis ir ar taisnstūrveida šķērsriezumu, un tajā ir trīs pildījuma kārtas. Pildījuma pirmajā kārtā 1 gāzi vienmērīgi sadala pa skruberi šķērsriezumu. Šī kārtā sastāv no vertikālām listēm (garums 1,5 m un šķērsriezums 45×45 mm). Listu augšējie gali paplatināti, lai šķidrums tecētu pa to virsmu, nevis pa spraugām starp tām. Pildījuma otrā kārtā 2 sastāv no pamīšus saliktām koka listītēm un uzskatāma par galveno pildījumu, jo tur gāze saskaras ar kaļķu pienu, kuru rasina no tvertnes 3, kas novietota tieši virs skruberi. Pildījuma trešā kārtā 4, kas novietota zem šķidruma krātuves, vienmērīgi sadala kaļķu pienu pa skruberi šķērsriezumu.

Šāda veida skruberis ne tikai saista SO₂, bet arī teicami atputekļo gāzi; putekļu koncentrācija pēc atputekļošanas — 0,258 g/m³. Iekārtas pretestība 550 Pa (55 mm H₂O).

*Centrbēdzes skruberis BTH*¹. Šis atputekļotājs veidots no vertikāla cilindra 1 ar konisku dibenu 2 (5.12. att.). Putekļaino gāzi ievada pa cilindriskās daļas apakšā tangenciāli piestiprinātu cauruli 3. No augšas pa piedavu 4 skruberi sienas aprasina ar ūdeni, kas apskalo visu skruberi iekšējo virsmu un plānā slānī plūst uz leju.



5.11. att. Skruberis ar pildījumu.



5.12. att. Centrbēdzes skruberi BTH shēma.

¹ Всесоюзный теплотехнический институт.

Tā kā putekļaino gāzi ievada pa pieskari, skruberī tā pārvietojas uz augšu pa spirālveida līniju. Šādas gāzes kustības dēļ dispersās daļiņas centrālās spēka iedarbībā pārvietojas radiālā virzienā. Sasniegušas ūdens virsmu, daļiņas pielīp pie tās un kopā ar ūdeni izplūst no skruberā.

Gāzei ieplūstot skruberī, tās maksimālajam ātrumam jābūt 23 m/s. Lai gāzes plūsma neaizrautu līdzīgu ūdens pilienus, gāzes ātrums pašā skruberī (attiecinot uz visu šķēsgriezuma laukumu) nedrīkst pārsniegt 6 m/s. Aprašīnāmās daļas augstumam jābūt 3...4 reizes lielākam par skruberā diametru. Ūdens patēriņš skruberiem, kuru diametrs 0,6...1,5 m, ir 0,22...0,78 kg/s.

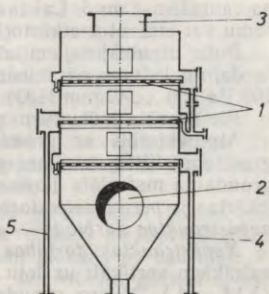
Atputekļošana šādos skruberos ir labāka, ja daļiņu izmēri un blīvums ir lielāki, kā arī gāzes ātrums, tai ieplūstot skruberī, ir lielāks. Atputekļošanas pakāpe var sasniegt pat 98%. So skruberu hidrauliskais pretestības koeficients atkarīgs no iekārtas izmēriem: ja skruberā diametrs $D=0,6$ m, tad $\zeta=3,38$, ja $D=1,5$ m, tad $\zeta=2,65$, attiecinot uz ātrumu, kāds ir gāzei, ieplūstot skruberī.

Putu atputekļotāji. Putu atputekļotāji labi atdala putekļus, dūmus un miglu. Tos lieto ne tikai gāzu attīrīšanai, bet arī dzesēšanai un dažu masas apmaiņas procesu realizēšanai.

Putu atputekļotāja shēma dota 5.13. attēlā. Tas sastāv no apaļa vai taisnstūrveida šķēsgriezuma kameras, kurā ievietots viens vai vairāki režģi. Ja nepieciešama augsta atputekļošanas pakāpe vai jāatdala migla, tad kamerā citu virs cita novieto vairākus režģus 1. Putekļaino gāzi ievada pa lūku 2, kas atrodas zem apakšējā režģa. Gāze plūst cauri visiem režģiem un izplūst pa izvadu 3 kameras augšgalā. Uz režģiem pievada šķidrumu. Gāzei saskaroties ar šķidrumu, rodas putas. Gāzes ātrumam (attiecinot uz visu aparāta šķēsgriezumu) jābūt 0,7...3,5 m/s. Ja gāzes ātrums ir mazāks par 0,7 m/s, gāze, plūstot cauri režģim, sadalās atsevišķos burbulīšos, kas izplūst cauri šķidrumam, neradot putas. Ja gāzes ātrums pārsniedz 3,5 m/s, gāze aizrauj līdzīgu ievērojamu šķidruma daļu sīku pilienveidā. Tādēļ putu atputekļotājos gāzes ātrums ir 1...3 m/s.

Režģi veido vai nu 4...6 mm bieza perforēta tērauda loksne ar caurumu diametru 3...8 mm (caurumu veids var būt dažāds), vai arī īpaši ārdi. Režģa aktīvais šķēsgriezums atkarīgs no vēlamās atputekļošanas pakāpes un ir 10...40% no aparāta kopējā šķēsgriezuma. Ja aparāts paredzēts miglas atdalīšanai, tad tā aktīvais šķēsgriezums ir mazāks nekā putekļu atdalīšanai.

Daļa režģim pievadāmā šķidruma (aptuveni 20%) iztek tam cauri un aiznes līdzīgu lielāko daļu cieto daļiņu (aptuveni 90%). Vieglākās, sīkākās un sliktāk slapināmās daļiņas aizplūst kopā ar šķidrumu



5.13. att. Putu atputekļotāja shēma.

pa caurulēm 4 un 5. Lai taupītu šķidrumu, no režģa noplūstošo šķidrumu var izmantot atkārtoti.

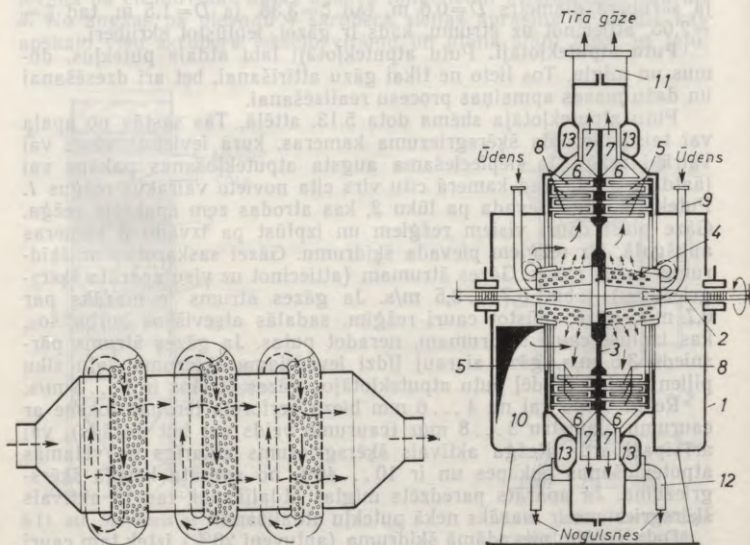
Putu atputekļotājiem atputekļošanas pakāpe var būt pat 99%, ja daļiņu lielums pārsniedz 5 μm . Hidrauliskā pretestība ir 300... 400 Pa (30... 40 mm H₂O).

Pie aparāta trūkumiem pieskaitāms lielais ūdens patēriņš.

Atputekļotājs ar graudainu filtrējošo slāni. Atputekļotājos ar graudainu filtrējošo slāni gāze atbrīvojas no daļiņām, plūstot cauri graudaina materiāla (kokss, oļi, grants, smiltis u. c.) slānim. Šādas iekārtas ir *periodiskas darbības* — ar *stacionāru graudaino slāni* un *nepārtrauktas darbības* — ar *plūstošu graudaino slāni*.

Nepārtrauktas darbības iekārtās putekļainā gāze filtrējas cauri vairākiem vertikāli uz leju plūstošiem mitriem graudainiem slāņiem (5.14. att.). Netīro graudaino materiālu pēc izplūdes no aparāta skalo, un tas atkal atgriežas (ar elevatoriem) uz filtrējošām sekcijām.

Mehāniskais atputekļotājs jeb dezintegratorveida atputekļotājs. Šis atputekļotājs darbojas teicami, ja putekļu koncentrācija gāzē nav liela (līdz 2 g/m³). Tādēļ šīs iekārtas lieto kā pēdējo atputekļošanas stadiju. Pēc attīrīšanas putekļu koncentrācija ir 0,02... 0,05 g/m³.



5.14. att. Atputekļotājs ar graudainu filtrējošo slāni.

5.15. att. Dezintegratorveida atputekļotāja shēma.

Mehāniskais atputekļotājs (5.15. att.) sastāv no apvalka 1 un vārpstas 2, uz kuras uzstādīts disks 3. Ap vārpstu izveidots caurums skārda konuss 4. Gar diska perifēriju koncentriski vairākās rindās zināmos attālumos diskam piestiprināti perpendikulāri stieņi 5. Starp konusu 4 un stieņiem, ūdenim izplūstot, rodas migla, kas saslapina gāzē esošos putekļus. Bez tam pie diska gar perifēriju piestiprinātas lāpstiņas 6 un 7, kas veicina gāzes plūsmu un tās nodalīšanu no ūdens. Lāpstiņas 7 rada spiedienu (līdz 5000 Pa), kas nepieciešams gāzes tālākai pārvietošanai.

Pie apvalka koncentrisku riņķu veidā piestiprināti horizontāli stieņi 8 tā, lai to rindas būtu pamišus ar diskam piestiprinātajiem stieņiem. Atputekļošanai nepieciešamo ūdeni pievada pa caurulēm 9. Putekļainā gāze ieplūst apvalkā pa lūku 10. Attīrītā gāze aizplūst pa cauruli 11. Putekļi kopā ar ūdeni ieplūst kanālā 13 un aiztek pa caurulēm 12.

Dezintegratorveida atputekļotājus plaši lieto metalurģijā stāvepļu gāzu attīrīšanai. Šiem atputekļotājiem ir liels ražīgums, maksimālā gāzes temperatūra 60 °C, ūdens patēriņš — 0,5...1,5 m³ uz 1000 m³ gāzes, jaudas patēriņš — 5...6 kW uz 1000 m³ gāzes.

B. ŠĶIDRU NEVIENDABĪGO SISTĒMU SADALĪŠANA. DISPERSĀS SISTĒMAS AR ŠĶIDRU VIDI

Šķidrās neviendabīgās sistēmas sastāv vismaz no divām fāzēm. Viena no tām ir dispersijas vide, kas dotajā gadījumā vienmēr ir šķidrums, otra — dispersā fāze, kas var būt cietā, šķidrā vai gāzveida stāvoklī. Dispersijas vide ir nepārtraukta, dispersā fāze — izklidēta ļoti sīku daļiņu veidā.

Atkarībā no izklidētās vielas un vides agregātstāvokļa izšķir šādas šķidrās neviendabīgās sistēmas: *suspensijas* — cietu vielu daļiņas izklidētas šķidrumā; *emulsijas* — šķidru vielu sīkie pilieni izklidēti šķidrumā; *putas* — gāze burbuliņu veidā izklidēta šķidrumā.

No minētajām šķidro neviendabīgo sistēmu grupām ķīmijas tehnoloģijā bieži jāsadala *suspensijas*.

Atkarībā no daļiņu lieluma suspensijas iedala *rupjās suspensijās*, ja daļiņu izmēri lielāki par 100 μm; *smalkās suspensijās*, ja daļiņu izmēri 0,5...100 μm; *ļoti smalkās suspensijās*, ja daļiņu izmēri 0,1...0,5 μm (novērojama Brauna kustība; daļiņas smaguma spēka ietekmē nenosēžas); *koloīdos šķīdumos*, ja daļiņu izmēri mazāki par 0,1 μm.

Rūpniecībā iegūtās suspensijas sastāv no dažāda izmēra daļiņām.

Šķidrās neviendabīgās sistēmas sadala 1) *nostādinot*; 2) *filtrējot* (parasti tikai suspensijas); 3) *centrifugējot* (separējot).

5.3. NOSTĀDINĀŠANA

Iekārtas, ko lieto suspensiju sadalīšanai smaguma spēka ietekmē, sauc par *nostādinātājiem*. Rūpniecībā nostādinātājus lieto rupjo suspensiju sadalīšanai un suspensiju koncentrēšanai pirms to filtrēšanas, jo nostādinātāju ierīkošana un ekspluatācija ir lētāka par filtru izgatavošanu un ekspluatāciju. Nepārtrauktas darbības nostādinātājus lieto arī nogulšņu mazgāšanai, kā arī ūdens saimniecībā. Bez tam nostādinātājus izmanto par šķīrotājiem dispersās vielas sadalīšanai pēc daļiņu lieluma un blīvuma.

Suspensiju nostādinot, iegūst nogulsnes, kurās ir aptuveni 50% cietās fāzes. Dažām suspensijām cietās fāzes masa nogulsnēs var sasniegt pat 60...70%.

Nostādinātājā suspensijas koncentrēšanas pakāpe atkarīga no cietās fāzes granulometriskā sastāva un blīvuma. Nostādinot rupjas suspensijas, izveidojas krasi izteikta robeža starp nogulsnēm un dzidro šķidrumu. Ja suspensijas ir smalkas, tad starp nogulsnēm un dzidro šķidrumu ir pārejas josla. Nostādinot ļoti smalkās suspensijas, īstas nogulsnes nerodas, suspensija vienīgi sabiezē.

Ja izdodas veicināt daļiņu salīpšanu (*flokulāciju*), tad smalki dispersās daļiņas nogulsņējas ātrāk. Praksē to panāk, 1) izmantojot elektrolītus, piemēram, pievienojot suspensijai kalcija hidroksīda, magnija sulfāta, fosforskābes sāļu šķīdumus, 2) pievienojot koloīdas vielas, piemēram, limi, 3) ievērojot optimālu suspensijas koncentrāciju, 4) uzturot optimālu suspensijas temperatūru; tas paātrina nogulsņēšanos par 10...20%.

5.3.1. Nostādinātāju konstruktīvie izveidojumi

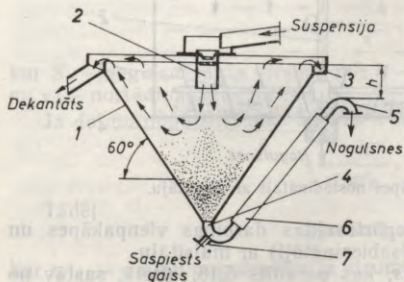
Pēc darbības principa nostādinātājus iedala *periodiskas*, *kombinētas* un *nepārtrauktas darbības nostādinātājos*.

Periodiskas darbības nostādinātājos pēc zināma suspensijas nostādināšanas laika dzidro šķidrumu aizvada un periodiski aizvāc nogulsnes. Vienkāršākie periodiskās darbības nostādinātāji ir diķi vai baseini, kuru vienā galā pievada suspensiju, bet pretējā galā aizvada dzidro šķidro fāzi. Šādu nostādināšanas veidu lieto notekūdeņu attīrīšanai.

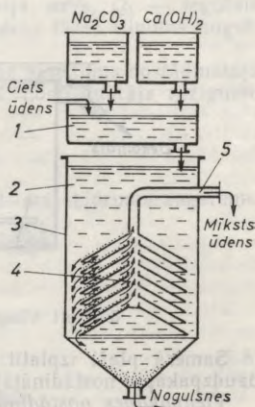
Kombinētas darbības nostādinātājos nepārtraukti pievada suspensiju un aizvada šķidro fāzi, bet nogulsnes aizvāc periodiski.

Nepārtrauktas darbības nostādinātājos nepārtraukti pievada suspensiju, kā arī nepārtraukti aizvāc šķidro fāzi (dekantātu) un nogulsnes.

5.16. attēlā parādīts nepārtrauktas darbības *koniskais nostādinātājs*, ko plaši lieto rūdu bagātināšanai. Tas sastāv no konusa 1, kura malu slīpums līdz 60°. Suspensiju pievada pa cauruli 2 zemāk par šķidruma līmeni. Suspensijai plūstot uz augšu, tās ātrums samazinās (pieaug konusa šķērsriezuma laukums) un tā vairākkārt maina virzienu. Tas veicina cieto daļiņu nogulsņēšanos. Dzidro



5.16. att. Koniskā nostādinātāja shēma.



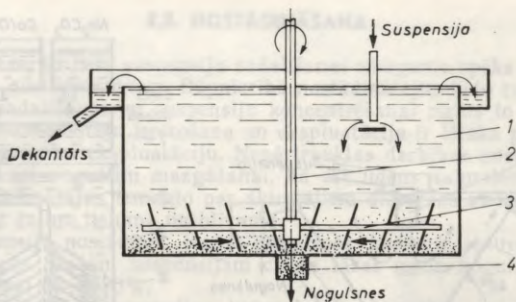
5.17. att. Vairākstāvu nostādinātāja shēma.

šķidro fāzi aizvada gar visu konusa pamata perimetru, un tā satek ap to esošajā kolektorā 3.

Konusa virsotnē nogulsņējas cietā fāze, kuru periodiski vai nepārtraukti izvada pa cauruli 4. Nepārtrauktai izvadišanai lieto cauruli 5, ko ar nostādinātāju savieno gumijas šļūtene 6. Tādēļ caurules augšgalu var pārvietot zemāk vai augstāk (mainīt h) un līdz ar to mainīt nogulšņu noplūdes ātrumu un daudzumu. Ja caurule aizsērējusi, tad pa vadu 7 pievada saspiestu gaisu caurules izpūšanai. Šā nostādinātāja konstrukcija piemērota smalko suspensiju nostādināšanai, ja cietās fāzes koncentrācija nepārsniedz 20%. Nostādinot rupjās suspensijas, caurule 5 ātri aizsērē. Ja nepieciešams suspensijas cieto fāzi šķīrot pēc rupjuma, koniskos nostādinātājus savieno virknē.

Lai nostādināšanas iekārta neaizņemtu lielu grīdas laukumu, nogulsnēšanās virsmu izvieto citu virs citas vairākos stāvos. 5.17. attēlā parādīts nostādinātājs ar lielu nogulsnēšanās virsmu, kuru lieto ūdens mikstināšanai. Mikstināšanai paredzēto ūdeni ievada tvertnē 1, kur ūdenim pievieno noteiktu tilpumu nātrija karbonāta un kalcija hidroksīda šķīduma. Rodas kalcija karbonāta un magnija hidroksīda nogulsnes, kuras atdala nostādinātājā 2.

Nostādinātājs sastāv no tvertnes 3 ar konisku dibenu, kurā ievietota caurule 4 ar koniskām virsmām. To slīpums lielāks par nogulšņu dabisko nobiruma leņķi. Šķidrās fāzes pārvietošanās virzieni attēlā parādīti ar bultām (gar koniskajām virsmām uz augšu). Dzidro (mikstināto) ūdeni izvada pa cauruli 5. Nogulsnes no koniskajām virsmām slīd uz leju un sakrājas aparāta apakšā, no kurienes tās periodiski aizvada.



5.18. att. Vienpakāpes nostādinātājs ar maisītāju.

Samērā plaši izplatīti nepārtrauktas darbības vienpakāpes un daudzpakāpju nostādinātāji (sabiezinātāji) ar maisītāju.

Vienpakāpes nostādinātājs, kas parādīts 5.18. attēlā, sastāv no lielas tvertnes — baseina 1 (līdz 100 m diametrā), kura centrā atrodas vārpsta 2 ar maisītāju 3. Šāda nostādinātāja augstums ir 2,5... 7,0 m.

Atkarībā no tvertnes diametra un suspensijas īpašībām maisītāju apgriezību skaits ir 2,5...20 apgr./h. Maisītāja ātrumam jābūt tādā, lai tas neuzduļķotu nogulsnes, bet veicinātu to atūdeņošanu un pārvietošanu no perifērijas uz centru, kur tās izvada no nostādinātāja pa izvadu 4. Lielāki maisītāja ātrumi izmantojami rupjo suspensiju nostādināšanā.

Maisītāja elektromotoru izvēlas ar lielu jaudas rezervi, jo iedarbināšanas brīdī tam jāpārvar liela nogulšņu pretestība. Suspensijas pievadīšanas dziļumam jābūt ieregulētam tā, lai neuzduļķotu nogulsnes.

Šādus nostādinātājus (sabiezinātājus) izgatavo ar lielu ražīgumu. Ja nogulsnešanās virsma ir 2918 m², tas diennaktī spēj dot līdz 5000 t cietās fāzes.

Nepārtrauktas darbības vienpakāpes nostādinātāji patērē maz enerģijas un ir ērti apkalpojami. Viens cilvēks var apkalpot līdz 40 šādu nostādinātāju. To negatīvās īpašības — lieli izmēri un mazs ražīgums no 1 m² virsmas; nogulsnēs paliek daudz šķidrās fāzes.

Izdevīgāki ir *dauzpakāpju nostādinātāji*, jo tie aizņem mazāku grīdas laukumu un to konstrukcija pieļauj veikt arī nogulšņu mazgāšanu.

5.3.2. Nostādinātāja ražīgums un izmēri

Nostādinātāja ražīgumu izsaka ar dzidrā šķidrums tilpumu, ko iegūst laika vienībā. To parasti izsaka vienībā kubikmetri sekundē.

Nostādinātāja materiālo bilanci izsaka vienādojums

$$Q_0 = Q_1 + Q_2,$$

kur Q_0 — šķidrās fāzes tilpums suspensijā, m^3/s ; Q_1 — iegūtais dzidrā šķidrums tilpums, m^3/s ; Q_2 — šķidrās fāzes tilpums nogulsnēs, m^3/s .

Pieņemot, ka pēc laika τ dzidrā šķidrums augstums nostādinātājā ir h un ka tā nogulsnēšanās virsma ir S , nostādinātāja ražīgumu izsaka šādi:

$$Q_1 = \frac{Sh}{\tau}.$$

kur S — nogulsnēšanās virsma, m^2 ; h — dzidrā šķidrums augstums, m ; τ — nostādināšanas ilgums, s .

Ja daļiņu nogulsnēšanās ātrums ir w'_n , tad

$$\tau = \frac{h}{w'_n}.$$

Tādēļ

$$Q_1 = Sw'_n. \quad (5.8)$$

kur w'_n — daļiņu nogulsnēšanās ātrums, m/s .

Nostādinātāja ražīgums, tāpat kā atputeļošanas kameru ražīgums, atkarīgs no nogulsnēšanās virsmas S un faktiskā nogulsnēšanās ātruma w'_n , bet nav atkarīgs no tā augstuma. Tādēļ, konstruējot nostādinātājus, tos cenšas izveidot ar lielāku nogulsnēšanās virsmu un nelielu augstumu.

Nogulsnēšanās virsmu S var noteikt pēc formulas (5.8):

$$S = \frac{Q_1}{w'_n} = \frac{Q_0 - Q_2}{w'_n}. \quad (5.9)$$

Nogulsnēšanās virsmas aprēķiniem formulu (5.9) pārveido šādi: suspensijas cietās fāzes masu kilogramos uz 1 kg šķidrās fāzes apzīmē ar x_0 , bet cietās fāzes masu kilogramos uz 1 kg šķidrās fāzes nogulsnēs — ar x_2 un šķidrās fāzes blīvumu ar ρ_1 . Ja nostādināšanas laikā visa cietā fāze pāriet nogulsnēs, tad

$$Q_0 \rho_1 x_0 = Q_2 \rho_1 x_2 \quad \text{jeb} \quad (5.10)$$

$$Q_2 = Q_0 \frac{x_0}{x_2}.$$

No vienādojumiem (5.9) un (5.10) var aprēķināt nostādinātāja nogulsnēšanās virsmu

$$S = Q_0 \frac{x_2 - x_0}{x_2 w'_n}.$$

Tā kā suspensija pa nostādinātāja šķērssgriezumu sadalās nevienmērīgi, tad faktiski nepieciešamā nostādinātāja nogulsnēšanās virsma ir lielāka un to aprēķina pēc formulas

$$S = 1,33 Q_0 \frac{x_2 - x_0}{x_2 w'_n}. \quad (5.11)$$

Formula (5.11) izmantojama tad, ja nepārtraukti pievada suspensiju un aizvada dekantātu; nogulsnes var aizvadīt nepārtraukti vai periodiski.

Daļiņu nogulsnešanās ātrumu smaguma spēka ietekmē šķidrumiem nosaka pēc tām pašām formulām, pēc kurām aprēķina daļiņu nogulsnešanās ātrumu gāzēm (sk. formulas (2.82) ... (2.84)).

Dažāda veida un izmēra daļiņām vienlaikus nogulsnejoties, rodas triecieni un berze starp atsevišķām daļiņām. Tādēļ faktiskais nogulsnešanās ātrums ir mazāks par teorētisko. Praktiskām vajadzībām daļiņu nogulsnešanās ātrumu aprēķina pēc formulas $w'_n = 0,5w_n$, kur w_n — nogulsnešanās ātrums, m/s.

Nepārtrauktas darbības nostādinātājā izšķir šādas joslas: dzidrā šķidruma josla, daļiņu brīvas nogulsnešanās, pārejas, nogulšņu sablīvēšanās un maisītāja darbības josla.

Pirmo trīs joslu augstums $h_1 = 0,4 \dots 0,75$ m. Koncentrēto suspensiju nostādināšanai lieto lielāko augstumu.

Nogulšņu sablīvēšanās joslas augstumu nepārtrauktās darbības nostādinātajos aprēķina pēc formulas

$$h_2 = \frac{m_v}{m_s},$$

kur h_2 — sablīvēšanās joslas augstums, m; m_v — cietās fāzes masa, kas nogulsnējas stundā uz 1 m^2 virsmas, kg/m^2 ; m_s — cietās fāzes masa 1 m^3 suspensijas, kg/m^3 .

Maisīšanas joslas augstumu var noteikt pēc formulas $h_3 = 0,073D$, kur D — nostādinātāja diametrs, m.

Apaļa šķērsriezuma nostādinātāja diametru iegūst šādi:

$$D \approx 1,127\sqrt{S}.$$

Nepārtrauktas darbības nostādinātāja kopējais augstums

$$H = h_1 + h_2 + h_3.$$

Periodiskas darbības nostādinātāja augstums ir dekantāta un nogulšņu augstumu summa.

5.4. FILTRĒŠANA

5.4.1. Filtrēšanas procesa raksturojums

Filtrēšana ir viens no šķidro neviendabīgo sistēmu sadalīšanas veidiem. Iekārtas, kurās suspensiju sadala filtrējot, sauc par *filtriem*.

Suspensijas sadalīšanai filtrējot lieto porainu slāni, kas aiztur disperso fāzi un laiž cauri šķidrumu.

Filtrēšanas iekārta un tās ekspluatācija izmaksā dārgi. Tādēļ tehnoloģisko norišu gaitā jācenšas iegūt labi filtrējamas suspensijas.

Suspensiju filtrēšanas praksē sastopami divi raksturīgi filtrēšanas veidi.

Pirmais filtrēšanas veids saistīts ar nogulšņu slāņa izveidošanos. Tas izveidojas, filtrējot koncentrētas suspensijas, kurām ir neliela

šķidrās fāzes viskozitāte. Filtrēšanas sākumā daļa nogulšņu izkļūst cauri filtra porām, jo filtrējošā slāņa poras ir lielākas par disperso daļiņu izmēriem. Ar laiku virs filtrējošā slāņa kapilāru vaļējiem galiem izveidojas nogulšņu velves, kas sīkajām daļiņām neļauj iekļūt kapilāros. Virs filtrējošā slāņa rodas nogulšņu slānis, kuram tālākajā filtrēšanas gaitā ir svarīga nozīme, jo tas aiztur cieto fāzi. Turpinot filtrēšanu, nogulšņu slāņa augstums nepārtraukti palielinās un vienlaikus palielinās tā pretestība, un samazinās filtrēšanas ātrums.

Otrs filtrēšanas veids saistīts ar smalku atšķaidītu suspensiju filtrēšanu vai tādu suspensiju filtrēšanu, kurām ir liela šķidrās fāzes viskozitāte. Šajā gadījumā disperso daļiņu nogulsnēšanās ātrums ir mazs un nogulšņu slānis neveidojas. Tādēļ cietās daļiņas iekļūst filtrējošā slāņa kapilāros un tur pielīp pie sienām vai paliek kapilāru izliekumu vietās. Daļa disperso daļiņu var izkļūt cauri. Arī šādā gadījumā, aizsērējot filtrējošam slānim, pieaug tā pretestība un samazinās filtrēšanas ātrums.

Filtrēšanas režīms atkarīgs no nogulšņu veida. Nogulsnes iedala 1) *kristāliskās nogulsnēs*, kuras sastāv no nedeformējamām daļiņām un kuras sauc par *nesaspiežamām nogulsnēm*, un 2) *amorfās nogulsnēs*, kuras, mainot spiedienu, deformējas un kuras sauc par *saspiežamām nogulsnēm*.

Nesaspiežamām nogulsnēm poru īpatnējo tilpumu neietekmē spiediens un nogulšņu slāņa biezums. Saspiežamām nogulsnēm, paaugstinot spiedienu, kapilāri deformējas, un līdz ar to filtrēšanas ātrums samazinās.

Filtrējošais slānis. Filtrējošais slānis var būt graudaina materiāla slānis (vai arī nogulšņu slānis, kas izveidojies filtrēšanas gaitā), audums, metāla sieti, poraini keramikas, metālkeramikas, stikla izstrādājumi, porainas plastmasas, gumija un citi materiāli. Labam filtrējošam slānim jābūt ar lielu dispersās fāzes aizturēšanas spēju un mazu pretestību.

Filtrējošā slāņa izvēle atkarīga no suspensijas agresivitātes, cieto daļiņu dispersitātes un suspensijas koncentrācijas.

Graudaino materiālu filtrējošā slāņa veidošanai skābām suspensijām lieto kvarca smiltis, koksu, bet sārmainām suspensijām — sasmalcinātu dolomītu, kaļķakmeni, marmoru u. c. Darvas emulsijas filtrēšanai izmanto sasmalcinātu kokogli. Par filtrējošo materiālu lieto arī celulozi, papīrmasu, koka miltus, infuzoriju zemi u. c.

Filtrējošā slāņa izveidošanai izmanto dažādus *audumus* (kokvilnas, vilnas, zīda, perhlorvinila, fluoroplasta, stikla) un dažādas *šķiedras* (azbesta, sārņu, stikla vates).

Skābu suspensiju filtrēšanai līdz 40...50°C temperatūrā lieto vilnas audumus, jo tie ir izturīgāki par kokvilnas audumiem. Lai kokvilnas audumi kļūtu izturīgāki pret skābi, tos nitrē. Skābu un karstu suspensiju filtrēšanai lieto arī minerālšķiedru, galvenokārt azbesta audumus. Vāji skābu, sārmainu un neitrālu suspensiju filtrēšanai lieto kokvilnas audumus.

Pret skābēm un sārmiem izturīgi ir *porainie keramikas* un *mētāleramikas izstrādājumi*, ko izgatavo dažādu plāksnišu, cilindru, čaulišu un gredzenu veidā.

Stipri sārmainām, karstām suspensijām lieto *tērauda* vai *niķeļa sietus*. Filtrēšanai lieto arī sietus, kas izgatavoti no alumīnija, misiņa, bronzas u. c.

Filtrēšanas pamatvienādojums. Filtrēšanas procesu pētīšanā liels skaits eksperimentu rāda, ka rūpniecības filtros nogulšņu slāņa un filtrējošā auduma poru niecīgo izmēru dēļ šķidrās fāzes plūsma vienmēr ir lamināra. Tādēļ filtrēšanas pamatā var likt Hāgena—Puazeija vienādojumu (sk. vienādojumu (2.26)), pēc kura šķidrums caurteci var aprēķināt šādi:

$$Q_1 = \frac{\pi d^4 \Delta p}{128 \mu l},$$

kur Q_1 — šķidrums caurtece, m^3/s ; Δp — spiedienu starpība filtrēšanas laikā, Pa; μ — šķidrās fāzes dinamiskā viskozitāte, Pa·s; l — kapilāra garums nogulsnēs un filtrējošā audumā, m; d — kapilāra diametrs, m.

Ja $1 m^2$ filtrējošās virsmas ir n kapilāru, tad kopējais filtrāta tilpums, kas laika vienībā iztek caur kapilāriem:

$$Q = nQ_1 = \frac{n\pi d^4 \Delta p}{128 \mu l},$$

kur Q — filtrāta caurtece sekundē uz $1 m^2$ filtrējošās virsmas, $m^3/(m^2 \cdot s)$.

Pieņemot, ka spiediens filtrēšanas laikā ir nemainīgs, t. i., $\Delta p = \text{const}$, tad filtrāta caurtece ir mainīgs lielums un jebkuram laika momentam uz $1 m^2$ filtrējošās virsmas izsakāms šādi:

$$\frac{dQ}{d\tau} = \frac{n\pi d^4 \Delta p}{128 \mu l}. \quad (5.12)$$

Vienādojumu (5.12) aprēķinos lieto nesaspiežamām nogulsnēm.

Attiecību $\frac{dQ}{d\tau}$ filtrēšanas tehnikā sauc par *filtrēšanas ātrumu*. Tas rāda to filtrāta tilpumu (m^3), ko iegūst no filtrējošās virsmas vienības ($1 m^2$) laika vienībā ($1 s$). Par filtrēšanas ātrumu to sauc tāpēc, ka, saīsinot tā vienības ($\frac{m^3}{m^2 \cdot s} = \frac{m}{s}$), iegūst ātruma vienību. Tas rāda, par cik pāvirzās šķidrā fāze caur filtrējošo slāni sekundē.

Ja nogulšņu slāņa biezums (augstums) ir h_1 (5.19. att.), filtrējošā slāņa biezums h_2 , tad katram no šiem slāņiem vienādojumu (5.12) var uzrakstīt šādi:

$$\text{nogulšņu slānim } \frac{dQ}{d\tau} = \frac{n_1 \pi d^4 \Delta p_1}{128 \mu \alpha_1 h_1}, \quad (5.13)$$

$$\text{filtrējošam slānim } \frac{dQ}{d\tau} = \frac{n_2 \pi d^4 \Delta p_2}{128 \mu \alpha_2 h_2}, \quad (5.14)$$

kur α_1 un α_2 — koeficienti, kas izsaka kapilāru garumu ar nogulšņu slāņa un filtrējošā slāņa biezumu, jo reālos gadījumos kapilāri ir izlocīti, t. i., $l_1 = \alpha_1 h_1$ un $l_2 = \alpha_2 h_2$. Koeficienti α_1 un α_2 vienmēr lielāki par vienu.

Vienādojuma (5.13) izteiksmi $\frac{128\alpha_1}{n_1\pi d_1^4}$ apzīmē ar R_n un sauc par *nogulšņu slāņa īpatnējo pretestību*, bet vienādojuma (5.14) izteiksmi $\frac{128\alpha_2}{n_2\pi d_2^4}$ apzīmē ar R_f un sauc par *filtrējošā slāņa īpatnējo pretestību*.

Vienādojumus (5.13) un (5.14) var izteikt šādi:

$$\frac{dQ}{d\tau} \mu h_1 R_n = \Delta p_1 \quad \text{un} \quad \frac{dQ}{d\tau} \mu h_2 R_f = \Delta p_2.$$

Saskaitot šos vienādojumus, iegūst

$$\frac{dQ}{d\tau} \mu (h_1 R_n + h_2 R_f) = \Delta p_1 + \Delta p_2 = \Delta p,$$

no kurienes

$$\frac{dQ}{d\tau} = \frac{\Delta p}{\mu (h_1 R_n + h_2 R_f)}.$$

Izsakot filtrējošā slāņa pretestību ar nogulšņu slāņa īpatnējo pretestību, iegūst sakarību:

$$h_2 R_f = R_n h_{ekv},$$

kur h_{ekv} — nogulšņu slāņa augstums, kas ekvivalents filtrējošā slāņa augstumam.

Tādēļ var rakstīt, ka

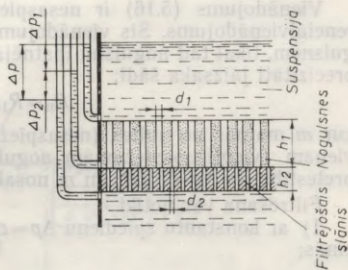
$$\frac{dQ}{d\tau} = \frac{\Delta p}{\mu R_n (h_1 + h_{ekv})}. \quad (5.15)$$

Ja, izplūstot caur filtru 1 m³ šķidrās fāzes, rodas X m³ nogulšņu uz 1 m² filtrējošās virsmas, tad, iegūstot Q m³ filtrāta, nogulšņu slāņa biezums ir XQ = h₁ vai XQ_{ekv} = h_{ekv}, kur Q_{ekv} — filtrāta tilpums, kas atbilst nogulšņu slānim augstumā h_{ekv} uz 1 m² filtrējošās virsmas.

Vienādojumu (5.15) var pārrakstīt šādi:

$$\frac{d(Q + Q_{ekv})}{d(\tau + \tau_1)} = \frac{\Delta p}{\mu R_n X (Q + Q_{ekv})} \quad (5.16)$$

kur τ_1 — laiks, kas nepieciešams Q_{ekv} kubikmetru filtrāta iegūšanai.



5.19. att. Filtrēšanas shēma.

Vienādojums (5.16) ir nespīžamam nogulšņu filtrēšanas diferenciālvienādojums. Šis vienādojums lietojams arī spīžamām nogulsnēm, tikai tad nogulšņu īpatnējā pretestība ar praksei pietiekamu precizitāti jāizsaka šādi:

$$R_n = R_1 \Delta p^m,$$

kur m mainās no nulles (nespīžamām nogulsnēm) līdz aptuveni vienam (viegli spīžamām nogulsnēm); R_1 ir nogulšņu īpatnējā pretestība, ja $\Delta p = 1$ (R_1 un m nosaka eksperimentāli).

Filtrēšana var notikt

1) ar konstantu spīdienu $\Delta p = \text{const}$, ja filtrēšanas ātrums samazinās;

2) ar konstantu filtrēšanas ātrumu $\frac{dQ}{d\tau} = \text{const}$, ja spīdiens palielinās.

Ja $\Delta p = \text{const}$, tad, vienādojumu (5.16) integrējot robežās no 0 līdz $(Q + Q_{\text{ekv}})$ un $(\tau + \tau_1)$, iegūst

$$\int_0^{Q+Q_{\text{ekv}}} (Q + Q_{\text{ekv}}) d(Q + Q_{\text{ekv}}) = \frac{\Delta p}{\mu R_n X} \int_0^{\tau+\tau_1} d(\tau + \tau_1).$$

Pēc integrēšanas var rakstīt

$$(Q + Q_{\text{ekv}})^2 = \frac{2\Delta p}{\mu R_n X} (\tau + \tau_1). \quad (5.17)$$

Ja $\frac{dQ}{d\tau} = \text{const}$, vienādojumā (5.16) izteiksmi $\frac{d(Q + Q_{\text{ekv}})}{d(\tau + \tau_1)}$ aizvieto-
jot ar $\frac{Q + Q_{\text{ekv}}}{\tau + \tau_1}$, iegūst

$$(Q + Q_{\text{ekv}})^2 = \frac{\Delta p}{\mu R_n X} (\tau + \tau_1). \quad (5.18)$$

Rūpniecības apstākļos biežāk sastopas ar pirmo gadījumu ($\Delta p = \text{const}$), tādēļ vienādojumu (5.17) pārveido lietošanai ērtākā veidā.

Vienādojuma izteiksmi $\frac{2\Delta p}{\mu R_n X}$ apzīmē ar K , kur K ir filtrēšanas konstante, kas atkarīga no filtrēšanas režīma un fāžu fizikālajām un ķīmiskajām īpašībām.

Vienādojumu (5.17) var pārrakstīt šādi:

$$(Q + Q_{\text{ekv}})^2 = K(\tau + \tau_1). \quad (5.19)$$

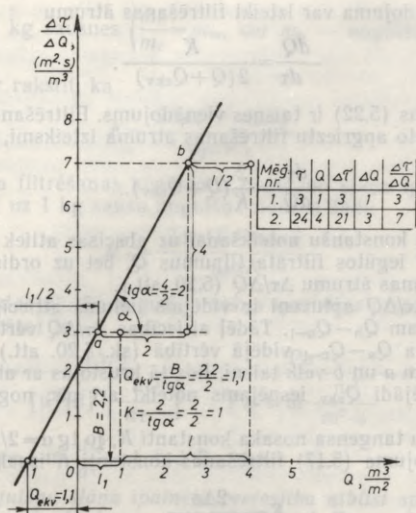
Iegūtais filtrēšanas vienādojums ir parabolas vienādojums ($y^2 = ax$). Tādā filtrēšanas process pakļauts parabolas likumsakarībām.

Vienādojumā (5.19) atverot iekavas, iegūst

$$Q^2 + 2QQ_{\text{ekv}} + Q_{\text{ekv}}^2 = K\tau + K\tau_1. \quad (5.20)$$

Filtrēšanas sākumā, kad $\tau = 0$, arī $Q = 0$, un var rakstīt, ka

$$Q_{\text{ekv}}^2 = K\tau_1.$$



5.20. att. Filtrēšanas konstanšu K un Q_{ekv} grafiskā noteikšana.

Vienādojumā (5.20) sāsinot Q^2_{ekv} un $K\tau_1$ kā vienādus lielumus, iegūst filtrēšanas procesa pamatvienādojumu ērti lietojamā veidā:

$$Q^2 + 2QQ_{ekv} = K\tau, \quad (5.21)$$

kur Q — filtrāta tilpums, kas iegūts laikā τ no 1 m^2 filtrējošās virsmas, m^3/m^2 ; Q_{ekv} — filtrēšanas konstante, kas raksturo filtrējošā slāņa pretestību, m^3/m^2 ; K — filtrēšanas konstante, kas raksturo darba režīmu un fāžu īpašības, m^2/s ; τ — filtrēšanas laiks, s (min, h).

Filtrēšanas konstanšu noteikšana. Saskaņā ar filtrēšanas pamatvienādojumu filtrāta tilpuma Q vai filtrēšanas ilguma τ noteikšanai jāzina filtrēšanas konstanšu K un Q_{ekv} vērtības.

Šīs konstantes var noteikt pēc mēģinājumu rezultātiem vai arī aprēķināt matemātiski.

Nosakot konstantes K un Q_{ekv} pēc mēģinājumu rezultātiem (5.20. att.), jāzirda vismaz divi mēģinājumi (jo vairāk mēģinājumu, jo precīzāki rezultāti). Šo konstanšu noteikšana pamatojas uz to, ka starp filtrēšanas ātrumu un filtrāta tilpumu pastāv sakarība, kuru attēlo taisne. To var pierādīt, diferencējot filtrēšanas pamatvienādojumu. Tad iegūst

$$2QdQ + 2Q_{ekv}dQ = Kd\tau \quad \text{jeb} \quad 2(Q + Q_{ekv})dQ = Kd\tau.$$

No šī vienādojuma var izteikt filtrēšanas ātrumu

$$\frac{dQ}{d\tau} = \frac{K}{2(Q + Q_{ekv})}. \quad (5.22)$$

Vienādojums (5.22) ir taisnes vienādojums. Filtrēšanas konstanšu noteikšanai lieto apgrieztu filtrēšanas ātruma izteiksmi, t. i.,

$$\frac{d\tau}{dQ} = \frac{2}{K}(Q + Q_{ekv}). \quad (5.23)$$

Filtrēšanas konstanšu noteikšanai uz abscisas atliek mēģinājuma laikā no 1 m² iegūtos filtrāta tilpumus Q , bet uz ordinātas — apgrieztu filtrēšanas ātrumu $\Delta\tau/\Delta Q$ (5.20. att.).

Attiecība $\Delta\tau/\Delta Q$ aptuveni ir vidējais lielums attiecīgajam filtrēšanas intervālam $Q_n - Q_{n-1}$. Tādēļ attiecības $\Delta\tau/\Delta Q$ vērtību atliek pa vertikāli posma $Q_n - Q_{n-1}$ vidējā vērtībā (sk. 5.20. att.). Caur iegūtajiem punktiem a un b velk taisni, līdz tā krustojas ar abscisu, iegūstot Q_{ekv} . Tādējādi Q_{ekv} iespējams noteikt arī pēc nogriežņa B uz ordinātas.

Pēc leņķa α tangensa nosaka konstanti K , jo $\operatorname{tg} \alpha = 2/K$.

No vienādojuma (5.17) filtrēšanas konstanti K izsaka šādi:

$$K = \frac{2\Delta p}{\mu R_n X}, \quad (5.24)$$

kur Δp — spiedienu starpība filtrēšanas laikā, Pa; μ — filtrāta viskozitāte, Pa·s; R_n — nogulšņu īpatnējā pretestība (atbilst nogulšņu slāņa pretestībai, iegūstot 1 m³ filtrāta), m/m²; X — nogulšņu tilpums, kas paliek uz filtra, iegūstot 1 m³ filtrāta, m³/m³.

Praksē ērtāk nogulšņu īpatnējo pretestību attiecināt uz 1 kg nogulšņu sausnes. Tādā gadījumā konstanti K aprēķina pēc formulas

$$K = \frac{2\Delta p}{\mu R'_n m_s}, \quad (5.25)$$

kur R'_n — nogulšņu īpatnējā pretestība, kas attiecināta uz 1 kg sausnes, m/kg; m_s — sausās vielas masa nogulsnēs, kas izveidojas, iegūstot 1 m³ filtrāta, kg/m³.

No filtrēšanas procesa materiālās bilances vienādojumiem iegūst izteiksmi m_s noteikšanai:

$$m_s = \frac{\rho x}{1 - m_m x}, \quad (5.26)$$

kur ρ — filtrāta blīvums, kg/m³; x — cietās fāzes masa 1 kg suspensijas $\left(\frac{m_c}{m_{sus}} = x, \text{ kur } m_c \text{ — cietās fāzes masa suspensijā, kg; } m_{sus} \text{ — suspensijas masa, kg} \right)$, kg/kg; m_m — mitro nogulšņu masa,

kas atbilst 1 kg sausnes $\left(\frac{m_n}{m_c} = m_m, \text{ kur } m_n \text{ — nogulšņu masa, kg}\right)$,
kg/kg.

Tāpēc var rakstīt, ka

$$K = \frac{2\Delta\rho(1 - m_mx)}{\mu\rho x R'_n}. \quad (5.27)$$

Ja zināma filtrēšanas konstante, nogulšņu slāņa īpatnējo pretestību attiecībā uz 1 kg sausu nogulšņu nosaka šādi:

$$R'_n = \frac{2\Delta\rho(1 - m_mx)}{\mu\rho x K}. \quad (5.28)$$

Pēc formulas (5.15) nogulšņu slāņa īpatnējās pretestības vienība (uz 1 m³ filtrāta) ir

$$[R_n] = \frac{[\Delta\rho]}{[\mu][h] \left[\frac{dQ}{d\tau}\right]} = \frac{\text{Pa}}{\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}} = \frac{1}{\text{m}^2}.$$

Ja $\mu = 1$; $h = 1$ un $\frac{dQ}{d\tau} = 1$, tad $R_n = \Delta\rho$.

Tātad *nogulšņu slāņa īpatnējā pretestība atbilst spiediena zudumam paskālos, ja šķidrums ar viskozitāti 1 Pa·s pārvietojas caur 1 m biezu nogulšņu slāni un filtrēšanas ātrums ir 1 m³/(m²·s).*

Nogulšņu slāņa īpatnējā pretestība R_n dažādām nogulsnēm ir dažāda. Piemēram, sadalot kristālisku kalcija sulfāta ūdens suspensiju, $R_n = 0,28 \cdot 10^{12} \text{ 1/m}^2$ (ja $\Delta\rho = 0,07 \text{ MPa}$); amorfām vara(II) hidroksīda nogulsnēm $R_n = 1400 \cdot 10^{12} \text{ 1/m}^2$ (ja $\Delta\rho = 0,08 \text{ MPa}$).

Filtrēšanas konstanti Q_{ekv} aprēķina uz 1 kg sausu nogulšņu pēc formulas

$$Q_{\text{ekv}} = \frac{R_f}{m_s R'_n} \quad \text{jeb} \quad Q_{\text{ekv}} = \frac{R_f(1 - m_mx)}{R'_n \rho x},$$

kur Q_{ekv} — filtrēšanas konstante, m³/m²; R_f — filtrējošā slāņa īpatnējā pretestība uz 1 m² filtrējošā laukuma, m/m²; R'_n — nogulšņu īpatnējā pretestība, m/kg.

Zinot filtrēšanas konstanti Q_{ekv} , filtrējošā slāņa pretestību aprēķina šādi:

$$R_f = \frac{Q_{\text{ekv}} R'_n \rho x}{1 - m_mx} \quad \text{jeb} \quad R_f = \frac{2\Delta\rho Q_{\text{ekv}}}{\mu K}. \quad (5.29)$$

Filtru klasifikācija. Rūpniecībā lietojamiem filtriem nav vienotas klasifikācijas. Tos iedala pēc vairākām pazīmēm:

1) pēc darbības veida: *periodiskas darbības filtros un nepārtrauktas darbības filtros;*

2) pēc darba spiediena: a) *hidrostatiskā spiediena filtri* (spiediens nepārsniedz 0,05 MPa); b) *vakuumfiltri* — vakuums līdz

0,09 MPa; c) *spiedfiltri* (spiediens līdz 0,5 MPa un augstāks (līdz 5,0 MPa));

3) pēc filtrējošā slāņa rakstura: ar *graudainu slāni*, ar *auduma slāni* un ar *cietu, porainu slāni*;

4) pēc konstruktīvā izveidojuma: *plākšņu, cilindriskie, diskveida, lentveida* u. c.

Bez tam filtrus iedala pēc filtrēšanas gaitas, filtrējošās virsmas stāvokļa, nogulšņu noņemšanas veida un citām pazīmēm.

5.4.2. Periodiskas darbības filtri

Periodiskas darbības filtrus izgatavo ar dažādiem filtrējošiem slāņiem un tiem ir dažādi darba spiedieni. Pie šās grupas filtriem pieder 1) *smilšu filtri* (graudains filtrējošais slānis) un 2) *auduma filtri*.

Smilšu filtri. Smilšu filtros filtrējošo slāni veido no dažāda rupjuma graudaina materiāla. Jo smalkāka suspensija, jo filtrējošam slānim lieto mazāka izmēra graudiņus. Graudainajā slānī rupjākās frakcijas izvietojas apakšā, smalkās — augšā.

Smilšu filtrus lieto, ja suspensijas koncentrācija nav liela un ja nav paredzams nogulsnes izmantot. Sos filtrus izmanto ūdens attīrīšanai no mehāniskiem piemaisījumiem.

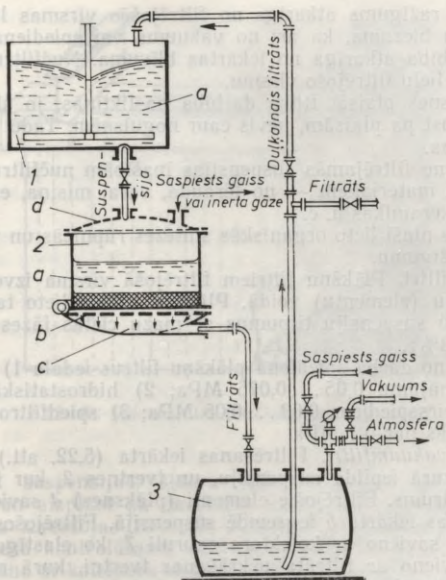
Visvienkāršāko filtru veido tvertne ar caurumotu dibenu, virs kura uzbērts graudainā materiāla (smilšu, grants u. c.) slānis. Suspensiju pievada no augšas (virs slāņa), bet no tvertnes apakšas aizvada filtrātu. Ar laiku, filtrējošā slāņa un nogulšņu pretestībai pieaugot, filtrēšanas ātrums ievērojami samazinās. Tad filtrējošo slāni reģenerē, filtrāta plūsmā pretējā virzienā ievadot tiru ūdeni (vai kādu citu šķidrumu). Reģenerācijas paātrināšanai filtri dažreiz apgādāti ar maisītāju, ko darbina reģenerācijas laikā, lai uzirdinātu filtrējošo slāni.

Auduma filtri. Auduma filtros filtrējošo slāni veido dažādi audumi (vilnas, kokvilnas, stiklašķiedras u. c.). Uz auduma virsmas sakrājas cietās daļiņas nogulšņu veidā, bet caur auduma porām izplūst filtrāts.

Ķīmiskajā rūpniecībā biežāk sastopamie auduma filtri ir *nučfiltri*, *dažādi plākšņu filtri*, *filtrspiedes*, *cilindriskie filtri*, *diskveida filtri* u. c.

Nučfiltri. Nučfiltri ir vienkāršākie auduma filtri. Pēc darbības principa tie līdzīgi laboratorijas nučfiltriem.

Nučfiltri sastāv no tvertnes 2, kuras dibenam ir divas kārtas (5.21. att.); augšējā kārta *b* ir caurumota un pārklāta ar filtrējošo audumu. Suspensiju *a* no maisītāja 1 ievada filtrā. Telpā *c* zem tvertnes dibena caurumotās kārtas rada retinājumu, kas veicina filtrāta nosūkšanu. Filtrāts satek montežū 3. Filtrēšanas sākumā, kad plūst duļķains filtrāts, to ar saspiebtu gaisu aizvada atpakaļ uz maisītāju. Kad uzkrājies pietiekami biezs nogulšņu slānis, parasti 50...400 mm atkarībā no nogulšņu īpašībām, suspensijas pievadī-



5.21. att. Nučfiltra iekārtas shēma.

šanu pārtrauc. Ar tvertnē 3 radīto vakuumu nosūc nogulsnes palikušo šķidro fāzi. Ja nepieciešams, uz tā paša filtra nogulsnes mazgā. Šim nolūkam filtru apgādā ar maisītāju, kas filtrēšanas laikā pacelts virs nogulsnēm. Lai no nučfiltriem varētu ērtāk aizvākt nogulsnes, tos izveido ar atveramu dibenu vai apgāžamus.

Nučfiltri ir divējādi: vaļējie nučfiltri, kas darbojas retinājumā 5...7 kPa, un slēgtie nučfiltri, kas no augšas nosegti ar vāku *d* un darbojas līdz 0,4 MPa spiedienā. Vaļējos nučfiltrus sauc par *vakuuma nučfiltriem*, slēgtos — par *spiediena nučfiltriem*.

Vaļējos nučfiltrus var labāk izmazgāt nogulsnes un tās ērtāk aizvākt nekā slēgtajos nučfiltrus, bez tam tiem vienkāršāka konstrukcija un tie vieglāk aizsargājami pret koroziju. Slēgtajos nučfiltrus, filtrējot paaugstinātā spiedienā, pieaug filtrēšanas ātrums, bez tam var filtrēt suspensijas, kas izdala indīgus vai ugunsnedrošus tvaikus.

Spiediena nučfiltrus grūti aizvākt nogulsnes, jo jāatver vāks vai īpaša lūka, pa kuru izņem nogulsnes. Tādēļ spiediena nučfiltrus, lai gan tiem ir lielāks filtrēšanas ātrums, lieto tikai atsevišķos gadījumos vai arī tad, ja suspensijā ir niecīga cietās vielas koncentrācija. So iemeslu dēļ rūpniecībā vairāk izplatīti vakuuma nučfiltri.

Nučfiltra ražīgums atkarīgs no filtrējošās virsmas lieluma, nogulšņu slāņa biezuma, kā arī no vakuuma vai spiediena. Nučfiltra normāla darbība atkarīga no iekārtas blīvuma. Nučfiltrus izgatavo ar 1...6 m² lielu filtrējošo virsmu.

Ja nogulsnes plaisā, filtra darbība pasliktinās, jo šķidrums un gaiss tad plūst pa plaisām, nevis caur nogulsnēm. Tādēļ šādas plaisas jāizlīdzina.

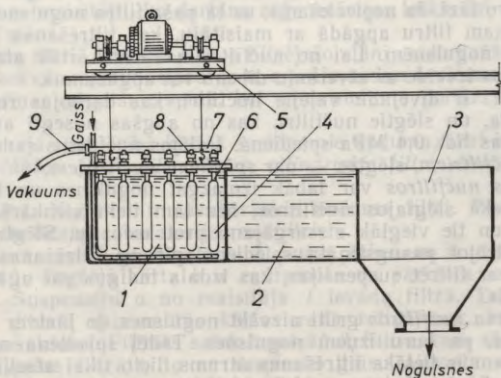
Atkarībā no filtrējamās suspensijas īpašībām nučfiltrus izgatavo no dažādiem materiāliem — no tērauda, vara, misiņa, emaljēta čuguna, koka, keramikas u. c.

Nučfiltrus plaši lieto organiskās sintēzes rūpnīcās un uzņēmumos ar nelielu ražīgumu.

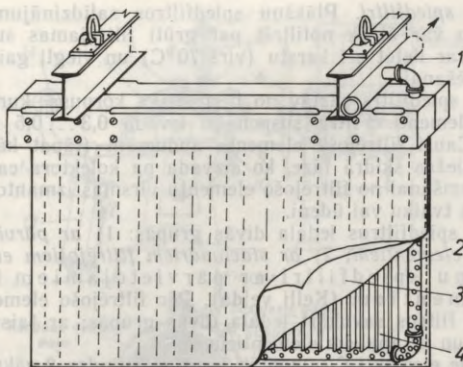
Plākšņu filtri. Plākšņu filtriem filtrējošā virsma izveidota atsevišķu plākšņu (elementu) veidā. Plākšņu filtrus lieto tad, ja filtrē lielu smalku suspensiju tilpumus ar mazu cietās fāzes koncentrāciju (0,5...3%).

Atkarībā no darba spiediena plākšņu filtrus iedala 1) vakuumfiltrāros ar retinājumu 0,05...0,075 MPa; 2) hidrostatiskā spiediena filtrāros, kur virsspiediens 0,02...0,05 MPa; 3) spiedfiltrāros, kur spiediens augstāks par 0,1 MPa.

Plākšņu vakuumfiltri. Filtrēšanas iekārta (5.22. att.) sastāv no tvertnes 1, kurā iepilda suspensiju, un tvertnes 2, kur ieliets mazgāšanas šķidrums. Filtrējošie elementi (plākšnes) 4 savienoti blokā, ko ar celšanas iekārtu 5 iegremdē suspensijā. Filtrējošos elementus caurulītes 6 savieno ar kolektora cauruli 7, ko elastīga caurule 9 savukārt savieno ar filtrāta uzkrāšanas tvertni, kurā rada retinājumu. Ja lieto slapjos vakuumsūkņus, tad tvertne nav vajadzīga. Nogulšņu noņemšanas laikā pa cauruli 9 pievada saspiestu gaisu.



5.22. att. Plākšņu vakuumfiltra shēma.



5.23. att. Vakuumfiltra filtrējošā elementa shēma.

Filtrējot suspensijas, šķidrā fāze izspiežas cauri filtrējošam audumam un aizplūst pa caurulēm uz filtrāta uzkrāšanas tvertni. Uz auduma izveidojas 10...50 mm biezs nogulšņu slānis. Filtrēšanas procesa kontrolēšanai dažreiz caurulītē 6, kas filtrējošo elementu savieno ar kolektora cauruli, ir stikla posmi 8.

Kad nogulšņu slānis uzkrājies attiecīgā biezumā, filtrējošo elementu bloku, neatvienojot no vakuuma, izceļ no suspensijas un pārvieto uz tvertni 2 mazgāšanai (tikai tad, ja nogulsnes jāmazgā). Ja pārvietošanas laikā nogulsnes uz filtrējošiem elementiem plaisā, jāsamazina retinājums. Mazgāšanas tvertnē vakuuma iedarbībā cauri nogulsnēm tiek sūkts mazgāšanas šķidrums. Pēc nogulšņu mazgāšanas filtrējošo elementu bloku izceļ no tvertnes 2 un, neatvienojot no vakuuma, tur virs tās. Sūcot nogulsnēm cauri gaisu, tās apzāvē. Pēc tam bloku pārvieto virs tvertnes 3. Pūšot nogulsnēm cauri saspīestu gaisu (vai ūdeni), tās atdala no auduma. Nogulsnes sabirst tvertnē. No tvertnes nogulsnes transportē pēc vajadzības. Filtrējošo elementu bloku, kad tas atbrīvots no nogulsnēm, atkal ievieto suspensijā. Filtrējošā virsma vienā blokā var sasniegt līdz 80 m² (vairāk nekā 30 elementi). Vienā tvertnē ievieto vairākus blokus.

Plākšņu vakuumfiltru filtrējošo elementu (5.23. att.) var izveidot no izliektas, caurumotas caurules 2, kuras viens gals savienots ar kolektora cauruli 1. Sis cauruļu rāmis no abām pusēm apvilkt ar filtrējošo audumu 3. Lai audums darba laikā nesaplaktu (samazinās filtrējošā virsma), starp auduma kārtām ievietotas koka līstītes 4.

Filtrējošo elementu izmēri 0,6×0,9 m līdz 2,5×3,0 m un lielāki. Atstarpe starp elementiem aptuveni 100 mm.

Plākšņu spiedfiltri. Plākšņu spiedfiltros salīdzinājumā ar vakuumfiltriem var ātrāk nofiltrēt pat grūti filtrējamas suspensijas. Šos filtrus var lietot arī karstu (virs 70°C) un viegli gaistošu suspensiju filtrēšanai.

Plākšņu spiedfiltrs sastāv no hermētiska korpusa, kurā ievietoti filtrējošie elementi. Filtrā suspensiju ievada 0,3...0,5 MPa lielā spiedienā. Cauri filtrējošā elementa audumam (tāpat kā vakuumfiltrā) izspiežas šķidrā fāze, ko aizvada pa kolektora cauruli. Nogulšņu noņemšanai no filtrējošo elementu virsmas izmanto saspiegtu gaisu, ūdens tvaiku vai ūdeni.

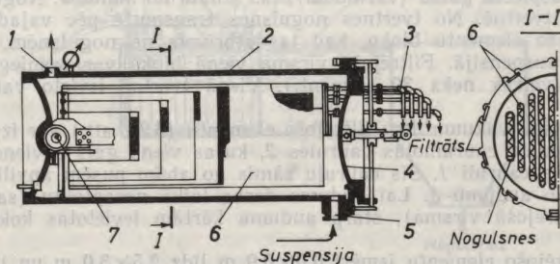
Plākšņu spiedfiltrus iedala divās grupās: 1) *ar pārvietojamiem filtrējošiem elementiem*; 2) *ar stacionāriem filtrējošiem elementiem*.

Plākšņu spiedfiltri ar pārvietojamiem filtrējošiem elementiem (Kelli veida). Pēc filtrējošo elementu izveidojuma šos filtrus savukārt iedala divās grupās: ar taisnstūrveida elementiem un ar apaļiem elementiem.

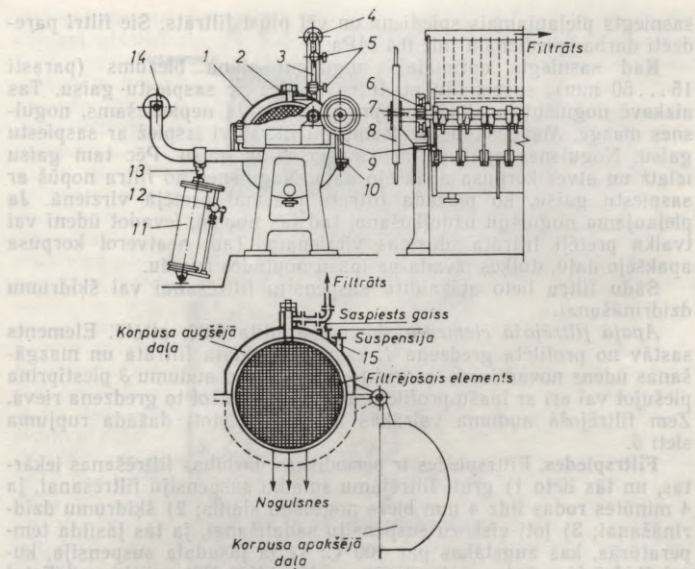
Filtrējošie elementi 6 samontēti kopā ar cilindra 2 vāku 4 un novietoti uz ratiņiem 7 (5.24. att.). Pirms sāk filtrēšanu, filtrējošie elementi jāiebīda cilindrā un hermētiski jānoslēdz cilindra vāks. Suspensiju cilindrā ievada pa cauruli 5 no apakšas, un vienlaikus pa cauruli 1 aizplūst gaiss. Kad suspensija piepildījusi visu cilindru, gaisa izvadišanas caurule automātiski noslēdzas.

Filtrēšanas laikā suspensija filtrā atrodas 0,3...0,5 MPa lielā spiedienā. Tādēļ šķidrā fāze izspiežas cauri filtrējošam audumam un aizplūst pa caurulītēm 3, kas savienotas ar atmosfēru. Par filtrēšanas procesa beigšanos spriež pēc manometra rādījumiem un filtrāta iztecēšanas ātruma.

Filtrēšanai beidzoties, cilindrā palikušo suspensiju izspiež ar saspiegtu gaisu. Nogulšņu mazgāšanai cilindrā uztur 0,02...0,025 MPa virsspiedienu (ar gaisu) un cilindru piepilda ar mazgāšanas šķidrumu. Mazgāšanas šķidrums pārvietojas tādā pašā virzienā kā filtrāts. Pēc nogulšņu mazgāšanas šķidrumu no cilindra izspiež ar gaisu un izpūš nogulsnes. Tad, atskrūvējot priekšējo vāku, to kopā ar filtrējošiem elementiem izvelk no cilindra un nogulsnes nopūš ar gaisu, tvaiku vai ūdeni, ievadot to filtrāta kustībai pretējā virzienā.



5.24. att. Plākšņu spiedfiltrs ar pārvietojamiem elementiem.



5.25. att. Plākšņu spiedfiltrs ar stacionāriem apaļiem filtrējošiem elementiem.

Plākšņu spiedfiltrs ar stacionāriem apaļiem filtrējošiem elementiem. 5.25. attēlā parādīts filtrs ar stacionāriem apaļiem filtrējošiem elementiem un atveramu korpusa apakšējo daļu (tas ievērojami vienkāršo nogulsņu aizvākšanu).

Filtrējošie elementi piestiprināti pie korpusa 1 ar filtrāta novadišanas cauruliņu pagarinājumu 2. Filtrāta novadišanas caurulītēs ir stikla posmi 3, caur kuriem var novērot, kā elements darbojas. Ja filtrējošā elementa filtrējošais slānis bojāts (audums iepļisījis), to ar krāniem 5 atslēdz no kolektora caurules 4. Lai korpusa apakšējo daļu vieglāk varētu atvērt un aizvērt, iekārta apgādāta ar pret-svaru 14 un virzuļveida cēlāju 11, kas darbojas 0,4 MPa spiedienā. Atkarībā no tā, kurā cilindra pusē, griežot trīsvirzienu krānu 12, ievada saspiestu gaisu, virzuļa kāts 13 vai nu paceļ, vai nolaiž korpasa apakšējo daļu. Bultskrūves 9, kas savēlk kopā abas korpasa daļas ar ekscentru 6, piestiprinātas pie vārpstas 7. Aizverot apakšējo daļu, bultskrūves ievirzās austiņās 10. Ar ratu 8, kas atrodas sazobē ar vārpstas galā uzstiprinātu zobratu, noslēdz apakšējo daļu. Ar šo iekārtu var ātri un viegli atvērt vai aizvērt korpasa apakšējo daļu.

Suspensiju ievada korpasa augšdaļā pa cauruli 15. Filtrēšanas laikā spiediens pakāpeniski palielinās. Filtrēšana turpinās, līdz

sasniegts pieļaujamais spiediens un vēl plūst filtrāts. Šie filtri paredzēti darba spiedienam līdz 0,4 MPa.

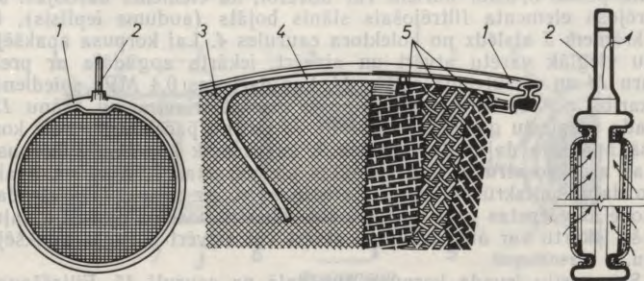
Kad sasniegts optimālais nogulšņu slāņa biezums (parasti 15...50 mm), suspensiju no filtra izspiež ar saspiebtu gaisu. Tas aizkavē nogulšņu noslīdēšanu priekšlaikus. Ja nepieciešams, nogulsnes mazgā. Mazgāšanas šķidrums no filtra arī izspiež ar saspiebtu gaisu. Nogulsnes apžāvē, tās caurpūšot ar gaisu. Pēc tam gaisu izlaiž un atver korpusa apakšējo daļu. Nogulsnes no filtra nopūš ar saspiebtu gaisu, ko pievada filtrāta plūsmai pretējā virzienā. Ja pieļaujama nogulšņu uzduļķošana, tad tās noņem, ievadot ūdeni vai tvaiku pretēji filtrāta plūsmas virzienam. Tad, neatverot korpusa apakšējo daļu, duļķes izvada pa īpašu noplūdes izvadu.

Šādu filtru lieto atšķaidītu suspensiju filtrēšanai vai šķidrumu dzidrināšanai.

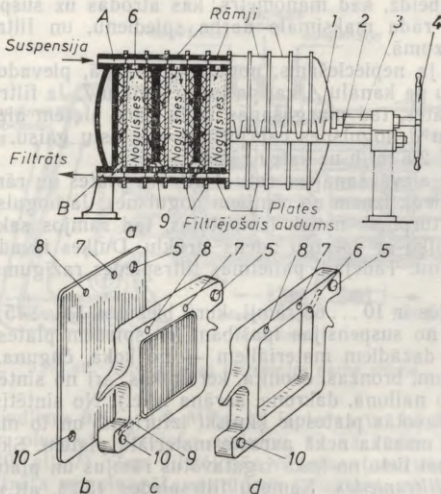
Apalā filtrējošā elementa shēma parādīta 5.26. attēlā. Elements sastāv no profilēta gredzena 1, kam piemetināta filtrāta un mazgāšanas ūdens novadīšanas caurulīte 2. Filtrējošo audumu 3 piestiprina piešūjot vai arī ar īpašu profilētu auklu 4, iespiežot to gredzena rievā. Zem filtrējošā auduma vairākās kārtās novietoti dažāda rupjuma sieti 5.

Filtrspiedes. Filtrspiedes ir periodiskas darbības filtrēšanas iekārtas, un tās lieto 1) grūti filtrējamu smalku suspensiju filtrēšanai, ja 4 minūtēs rodas līdz 4 mm biezs nogulšņu slānis; 2) šķidrumu dzidrināšanai; 3) ļoti viskozu suspensiju sadalīšanai, ja tās jāsilina temperatūrās, kas augstākas par 100 °C; 4) ja jāsadala suspensija, kurai šķidrā fāze ir tuvu piesātinātam stāvoklim. Filtrspiedes var lietot arī viegli filtrējamu suspensiju sadalīšanai, tikai tad filtrēšanas tehniskie un ekonomiskie rādītāji ir sliktāki nekā citiem filtriem.

Filtrspiedēm ir šādas priekšrocības: tās lietojamas jebkurai suspensijas koncentrācijai; iespējams filtrēt agresīvas un karstas suspensijas; uz neliela grīdas laukuma var novietot lielu filtrējošo virsmu; nogulsnes caurpūšot ar gaisu, iegūst sausākas nogulsnes nekā ar cita veida filtriem.



5.26. att. Filtrējošā elementa shēma.



5.27. att. Rāmju filtrspiedes shēma.

Filtrspiedēm ir šādi trūkumi: grūti aizvākt nogulsnes, filtru grūti izjaukt un salikt, nogulsnes nevar pilnīgi izmazgāt; iespējami nogulsņu zudumi pa neblīvām vietām, kā arī audumam plīstot; plates un rāmji samērā ātri nolietojas.

Pēc konstrukcijas filtrspiedes iedala rāmju filtrspiedēs un kameru filtrspiedēs.

Rāmju filtrspiedes. Rāmju filtrspiedes (5.27. att. a) sastāv no pamīšus saliktām platēm c un rāmjiem d. Starp katru plati un rāmi atrodas filtrējošais audums b. Plates un rāmji ar izvīzījumiem 1 balstās uz horizontāliem (diviem) paralēliem stieniem 2. Ar skrūvi 3 griežot ratu 4, plates un rāmjus sabīda cieši kopā, lai filtrēšanas laikā, pievadot suspensiju, tā neizplūstu pa rāmju un plašu saskares vietām. Platē, filtra audumā un rāmi attiecīgās vietās izveidoti caurumi 5 un 10, kas tad, ja plates, rāmji un audums cieši sabīdīti kopā, veido nepartrauktus kanālus A un B. Rāmi ir urbums 6, kas kanālu A savieno ar rāmja telpu. Platē urbums 9 savieno rāmja telpu (apakšā) ar kanālu B. Ja filtrātu aizvada no katras plates (individuāli), tad urbums 9 turpinās līdz ārējai virsmai (nav kanāla B) un beidzas ar krānu.

Filtrāts noplūst labāk, ja plašu sānu virsmas ir rievotas. Kanālam A suspensiju parasti pievada ar 0,3...0,6 MPa virsspiedienu.

Suspensija pa urbumiem 6 nokļūst rāmju telpā. Tad cauri filtrējošam audumam izplūst šķidrā fāze, bet cietās daļiņas uzkrājas rāmi. Filtrēšanu turpina, līdz rāmju telpa pieblīvēta ar nogulsnēm.

Filtrēšana jābeidz, kad manometrs, kas atrodas uz suspensijas pievadcaurules, rāda maksimālo darba spiedienu, un filtrāts izdalās niecīgā daudzumā.

Pēc tam, ja nepieciešams, nogulsnes mazgā, pievadot mazgāšanas šķidrumu pa kanālu *A* vai pa īpašu kanālu *7*. Ja filtrātu aizvada no katras plates, tad mazgāšanas laikā pāra platēm aizver krānus.

Pa kanālu *8* nogulsnes caurpūš ar saspiestu gaisu. Gaisa patēriņš aptuveni $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ uz katru rāmi.

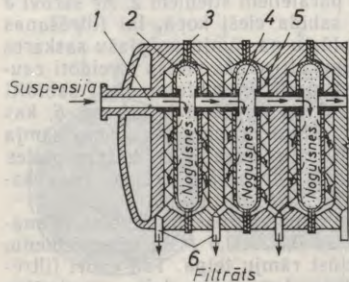
Nogulšņu aizvākšanai ar ratu *4* atbrīvo plates un rāmjus un, izjaucot filtrspiedi, izņem no rāmjiem nogulsnes. Ja nogulsnes ir mazvērtīgas un turpmāk netiek izmantotas, tad rāmjos sakrājušās nogulsnes uzduļķo ar spēcīgu ūdens strūklu. Duļķes izvada pa rāmja apakšējo krānu. Tādējādi palielinās filtrspiedes ražīgums, jo tā nav jāizjauc.

Filtrspiedēs ir $10 \dots 68$ rāmji, kuru biezums $13 \dots 45$ mm.

Atkarībā no suspensijas īpašībām filtrspiedēm plates un rāmjus izgatavo no dažādiem materiāliem — no koka, čuguna, speciāliem sakausējumiem, bronzas, ebonīta, keramikas, arī no sintētiskiem materiāliem (no nailona, dakrona, sarāna u. c.). No sintētiskiem materiāliem izgatavotās plates ir ķīmiski izturīgas, un to masa gandrīz desmit reizi mazāka nekā parasto materiālu platēm. Skābu suspensiju filtrēšanai lieto no koka izgatavotus rāmjus un plates.

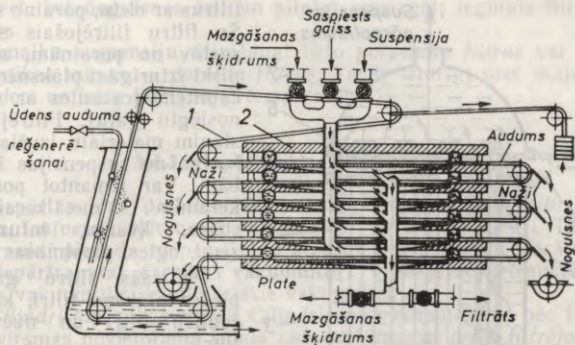
Kameru filtrspiedes. Kameru filtrspiedes (5.28. att.) lieto grūti filtrējamu suspensiju filtrēšanai, kuras rada ķepīgas nogulsnes. Atšķirībā no rāmju filtrspiedēm kameru filtrspiedēm ir tikai dobas plates. Saliekot kopā divas šādas plates, izveidojas kamera *2*. Katrā platē ievietots filtrējošais audums *3*, kuru caurumu vietās ar īpašu gredzenu *4* piestiprina platei. Suspensiju pievada pa kanālu *1*. Šķidrā fāze izplūst caurī audumam un pa drenāžas virsmu *5* plūst uz leju. Tad pa kanāliem *6* tā izplūst no filtra.

Filtrspiežu barošanai bieži lieto diafragmas sūkni ar lodveida vārstiem. Ērtāk lietot centrālās sūkņus vai montežu, jo ar tiem vieglāk regulēt spiedienu, novērst hidrauliskos triecienus un pulsāciju.



5.28. att. Kameru filtrspiedes shēma.

Ķīmiskajā rūpniecībā lieto kameru filtrspiedes, kas darbojas automātiski. Filtrspiede (5.29. att.) sastāv no platēm *2*, kas novietotas cita virs citas $25 \dots 30$ mm attālumā un galos sastiprinātas ar četrām bultskrūvēm. Starp platēm zigzagveidā nostiepts filtrējošais audums *1*. Filtrēšanas kamera izveidošanai zem katras plates pa tās perimetru novietota ovāla biezsienas gumijas šlūtene *3* (5.30. att.). Ievadot šlūtenē



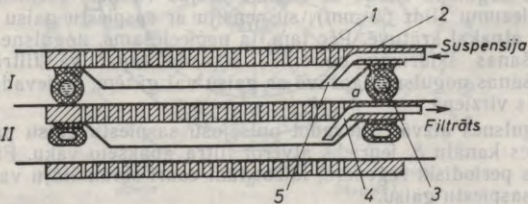
5.29. att. Automātiskas filtrspiedes darba shēma.

ūdeni ar spiedienu $0,8 \dots 1,0$ MPa, tā izplešas un kā blīve noslēdz spraugas un piespiež filtrējošo audumu, tā ka rodas noslēgta kamera *a* (5.30. att. I). Zem filtrējošās virsmas (caurumota plate *I*) novietots filtrāta un mazgāšanas ūdens kolektors, no kura pa cauruli 4 filtrātu un mazgāšanas ūdeni aizvada uz attiecīgajām krātuvēm. Suspensiju kamerā ievada pa cauruli 5 ar $0,5 \dots 0,6$ MPa spiedienu. Pa šo pašu cauruli pievada arī mazgāšanas šķidrumu un gaisu.

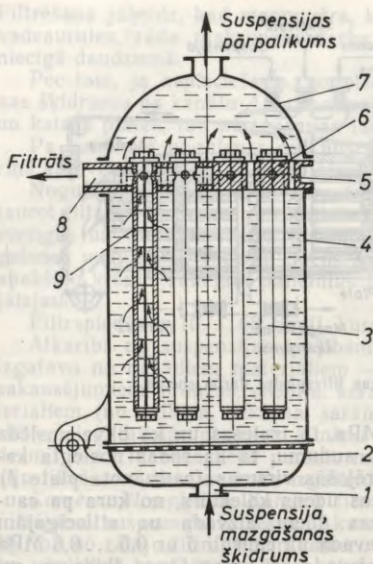
Kad filtrēšana beigusies, no gumijas šļūtenes izlaiž ūdeni (5.30. att. II). Līdz ar to izveidojas sprauga nogulšņu izvadišanai. Ja ūdens spiediens pazeminās līdz $0,1$ MPa, automātiski ieslēdzas elektrodzinējs. Veltniši sāk griezties, lēnē pārvietojas un izvada nogulsnes no starpplašu telpas. Naži tās noņem no auduma (sk. 5.29. att.). Filtrējošo audumu reģenerē ipašā kamerā, nospiež starp veltniņiem, pēc tam tas atkal nokļūst filtrēšanas joslā.

Sajā filtrspiedē nogulsnes iespējams labi izmazgāt ar nelielu šķidruma tilpumu.

Filtri ar cietu, porainu filtrējošo slāni. Ķīmiskajā rūpniecībā, pārtikas rūpniecībā un citās rūpniecības nozarēs samērā bieži lieto



5.30. att. Automātiskas filtrspiedes divu plašu griezumš.



5.31. att. Čaulišu filtra shēma.

no čaulītēm nomazgā ar ūdens strūklu, tad — ar slēgtu dibenu. Cilindra augšdaļā ir horizontāla plāksne 6 ar urbumiem filtrējošo elementu (čaulišu) iestiprināšanai un kanāli 5, pa kuriem cauri plūst suspensija. Filtrējošā čaulīte 3 veidota no poraina cilindra vai gredzeniem 9 un tai ir slēgts apakšējais gals.

Suspensiju filtrā ievada no apakšas pa cauruli 1. Suspensiju filtrē 0,6...0,8 MPa virsspiedienā. Filtrāts izspiežas cauri čaulītes sienai un izplūst pa cauruli 8.

Kad nogulsņu slānis uz čaulišu ārējās virsmas sasniedz optimālo biezumu (līdz 60 mm), suspensiju ar saspīestu gaisu no filtra izspiež atpakaļ krātuvē. Pēc tam, ja nepieciešams, nogulsnes mazgā. Mazgāšanas šķidrumu no filtra aizvada tāpat kā filtrātu. Pēc mazgāšanas nogulsnes apžāvē ar gaisu vai gāzēm, ko ievada filtrāta plūsmas virzienā.

Nogulsnes aizvāc, pievadot pulsējošu saspīestu gaisu pa filtrāta noplūdes kanālu 8, iepriekš atverot filtra apakšējo vāku. Filtrējošās čaulītes periodiski reģenerē, laižot tām cauri šķīdinātāju vai izpūšot tās ar saspīestu gaisu.

Čaulišu filtru priekšrocības: mazi izmēri; procesu iespējams auto-

filtrus ar cietu, porainu slāni. So filtru filtrējošais slānis sastāv no porainām, mehāniski izturīgām plāksnēm vai čaulītēm (caurules ar vienu noslēgtu galu). Filtrējošām slānim materiālu izvēlas atkarībā no suspensijas īpašībām. Var izmantot porainu keramiku, metālkeramiku, stiklu, kvarcu, infuzoriju zemi, ogles, plastmasas u. c.

Pie šās filtru grupas pieder plākšņu filtri, kā arī čaulišu filtri un nučveida filtri.

Plākšņu filtrus lieto ļoti atšķaidītu smalku suspensiju filtrēšanai (vīna, alus rūpniecībā u. c.).

Čaulišu filtrs (5.31. att.) sastāv no vertikāla tērauda cilindra 4, kuram ir atverams vai arī blīvi pieskrūvēts apakšējais vāks 2 un augšējais vāks 7. Ja nogulsnes aizvāc sausā veidā (ar saspīestu gaisu), tad izgatavo atveramu dibenu, turpretī, ja nogulsnes

matizēt, bet nogulsnes ērti un pilnīgi izmazgāt; iegūtais filtrāts ir dzidrs.

Smalku suspensiju filtrēšanai lieto *porcelāna filtrus* vai īpašas keramikas masas — *porolīta filtrus*. Tie ir izturīgi pret skābēm un sārmiem un iztur līdz 700 °C temperatūru.

5.4.3. Nepārtrauktas darbības filtri

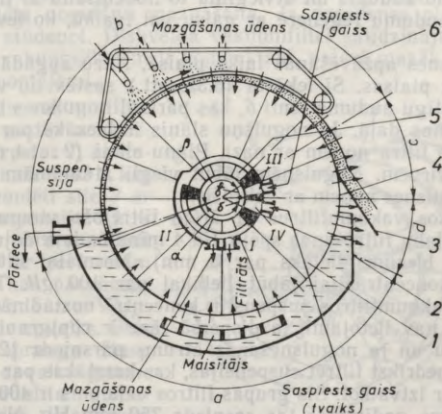
Nepārtrauktas darbības filtri ir *cilindriskie vakuumfiltri*, *diskveida*, *lentveida*, *šķīvjuveida vakuumfiltri*, kā arī *spiedfiltri*. Tiem nepārtraukti pievada suspensiju un aizvada nogulsnes un filtrātu.

Nepārtrauktas darbības vakuumfiltri. Vecākie nepārtrauktas darbības vakuumfiltri ir cilindriskie vakuumfiltri.

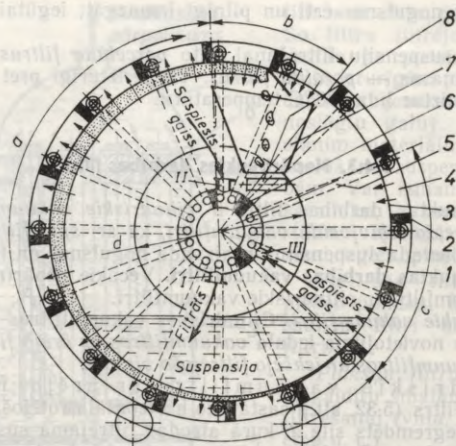
Cilindriskie vakuumfiltri. Cilindriskos vakuumfiltrus pēc filtrējošās virsmas novietojuma iedala *vakuumfiltrus ar ārējo filtrējošo virsmu* un *vakuumfiltrus ar iekšējo filtrējošo virsmu*.

Cilindriskie vakuumfiltri ar ārējo filtrējošo virsmu. Filtrs (5.32. att.) sastāv no horizontāla rotējoša cilindra 4, kas daļēji iegremdēts silē 2, kurā atrodas filtrējamā suspensija. Cilindra sānu virsma izveidota no caurumota skārda, kas pārvilkts ar filtrējošo audumu.

Filtrs sadalīts sekcijās 1. Katra sekcija beidzas ar kanālu 5. Šo kanālu gali nonāk līdz nekustīgam sadalitāja diskam. Sadalitāja diskā izveidotas kameras I, II, III un IV, kas, cilindram rotējot, atsevišķās sekcijās vai sekciju grupās uztur dažādu spiedienu. Cilindra virsma sadalīta četrās joslās a, b, c un d. Joslā a suspensijas šķidrā fāze izspiežas cauri filtrējošam audumam (jo sekcijās ir



5.32. att. Cilindriskā vakuumfiltra shēma (šķērsgriezums).



5.33. att. Cilindriskais vakuumsfiltrs ar iekšējo filtrējošo virsmu.

retinājums) un pa kameru I filtrāts aizplūst. Šajā pašā laikā uz filtrējošās virsmas (ārējās) izveidojas nogulšņu slānis. Joslā b nogulsnes atbrīvo no porās esošā šķidrums. Pēc tam nogulsnes mazgā un apžāvē ar gaisu. Mazgāšanas ūdeņus novada pa kameru II. Joslā c pa kameru III sekcijā pievada saspiegtu gaisu, kas veicina nogulšņu atdalīšanos no auduma un atviegļina to noņemšanu ar nazi 3. Joslā d filtrējošo audumu reģenerē ar gaisu vai tvaiku, ko ievada pa kameru IV.

Ja nogulsnes apžāvēšanas laikā plaisā, filtru apgādā ar iekārtu, kas izlīdzina plaisas. Šī iekārta (5.32. att.) sastāv no veltnišu sistēmas ar kustīgu auduma lenti 6, kas pārklāj nogulsnes mazgāšanas un apžāvēšanas daļā. Ja nogulšņu slānis ir biežāks par 8 mm, tad nogulsnes no filtra noņem ar nazi. Plānu slāni (2...4 mm) noņem ar bezgalu virvēm. Nogulsnēm jābūt viegli atdalāmām no virvēm. Ķepīgas nogulsnes noņem ar veltnišiem.

Cilindriskos vakuumsfiltrus ar ārējo filtrējošo virsmu lieto suspensijām ar labu filtrēšanas spēju (ja 4 minūtēs izveidojas nogulšņu slānis, kura biezums lielāks par 5 mm). Normālai filtra darbībai suspensiju koncentrācijai jābūt lielākai par 100 g/l. Tādēļ pirms filtrēšanas vakuumsfiltrus suspensiju koncentrē nostādinātājā.

Šie filtri nav lietojami, ja dispersā fāze ir rupjgraudaina un ar lielu blīvumu un ja nogulsnēšanās ātrums pārsniedz 12 mm/s. Vakuumsfiltrus nedrīkst filtrēt suspensijas, kas karstākas par 60...70 °C, jo filtrāts var iztvaikot. Šīs grupas filtru vakuums ir 400...450 mm Hg, atsevišķos gadījumos tas sasniedz 750 mm Hg. Nogulšņu biezums ir 0,8...40 mm, parasti aptuveni 10...12 mm.

Cilindriskie filtri ar ārējo filtrējošo virsmu ātri aizsērē, jo uz filtrējošā auduma vispirms nogulsņējas sīkās daļiņas, kas aizblīvē tā poras, paaugstina filtra pretestību un samazina tā ražīgumu.

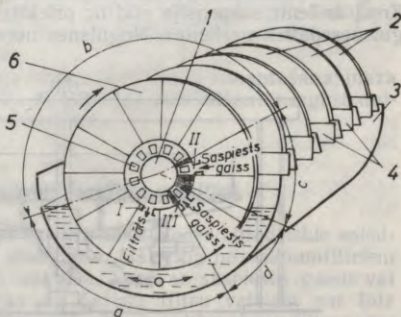
Cilindriskie vakuumfiltri ar iekšējo filtrējošo virsmu. Cilindriskajos vakuumfiltrēs ar iekšējo filtrējošo virsmu uz filtrējošā auduma vispirms nogulsņējas rupjākās daļiņas, kas neaizblīvē auduma poras. Tādēļ šos filtrus lieto, ja dispersā fāze ir dažāda rupjuma un ja daļiņu nogulsņēšanās ātrums pārsniedz 8 mm/s, kā arī ja suspensija izdala indigus un eksplozīvus tvaikus. Filtri ar iekšējo filtrējošo virsmu nav lietojami, ja nepieciešams nogulsnes labi izmazgāt un ja nogulšņu slānis rodas lēni (3 minūtēs tā biezums mazāks par 8 mm).

Cilindriskais vakuumfiltrs ar iekšējo filtrējošo virsmu (5.33. att.) sastāv no horizontāla cilindra 1, kam viens gals ir blīvi noslēgts, bet otrs vaļējs, ar gredzenveida apmali. Cilindra iekšpusē garenvirzienā piemetinātas 16...20 ribas 2. Cilindra iekšpuse izklāta ar filtrējošo audumu 3. Starp ribām veidojas noslēgtas sekcijas 4, pa kurām nosūc filtrātu un pievada gaisu. Sekciju radiālās caurules 5 savienotas ar sadalīšanas disku 6. Suspensiju pievada cilindra apakšējā daļā.

Posms *a* ir filtrēšanas un atūdeņošanas josla, kas savienota ar filtrāta aizvadišanas kameru *I*. Pa kameru *II* joslā *b* pievada saspiestu gaisu. Nogulsnes sakrīt bunkurā 7, un ar lentes transportieri 8 tās izvada. Joslā *c* filtrējošo audumu reģenerē ar saspiestu gaisu (retāk ar tvaiku), ko pievada pa kameru *III*.

Diskveida vakuumfiltri. Šos filtrus lieto, ja dispersās fāzes daļiņas pēc granulometriskā sastāva ir aptuveni vienādas un ja nogulsņēšanās ātrums ir mazāks par 12 mm/s. Diskveida vakuumfiltrēs nav paredzēta nogulšņu mazgāšana. Ja nogulsnes plaisā, tad tās nevar labi atūdeņot. Diskveida vakuumfiltri salīdzinājumā ar cilindriskajiem vakuumfiltriem ir kompaktāki, patērē mazāk enerģijas un ir ērtāk remontējami.

Diskveida vakuumfiltrs (5.34. att.) sastāv no horizontālas vārpstas 1, uz kuras nostiprināti diski 2, kas daļēji iegremdēti silē 3 ar filtrējamo suspensiju. Katrs disks sastāv no divpadsmit sektoriem 6 ar perforētām sānsienām, kas pārvilktas ar filtrējošo audumu. Vārstai apkārt ir apvalks. Gredzenveida sprauga starp vārpstu un apvalku garenvirzienā sadalīta divpadsmit kanālos, kas savienoti katrs ar savu disku



5.34. att. Diskveida vakuumfiltra shēma.

sektoru. Kanāli beidzas vārpstas vienā galā un slīd gar sadales disku 5. Vārpstai griežoties, sektori cits pēc cita nonāk pie sadales diska kamerām I, II un III.

Joslā *a* filtrātu nosūc caur filtrējošo audumu, filtrāts iekļūst kamerā I un izplūst no filtra. Cietā fāze uz diska ārējās virsmas veido nogulšņu slāni, kas, diskam rotējot, nokļūst joslā *b*, kurā nosūc slāni atlikušo šķidro fāzi un pa kameru I aizvada. Joslā *c* pa kameru II pievada saspīestu gaisu nogulšņu atdalīšanai no filtrējošā auduma; nogulsnes noņem naži 4. Tad nogulsnes aiztransportē pēc vajadzības. Audumu reģenerē joslā *d*, kur pa kameru III pievada saspīestu gaisu, retāk — tvaiku.

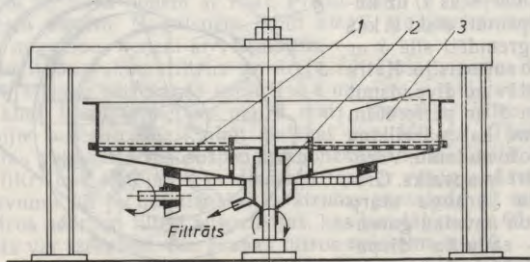
Šķīvveida vakuumfiltri. Šķīvveida vakuumfiltrus lieto, ja suspensijas dispersā fāze sastāv no blīvām rupjgraudainām daļiņām, kuras nepieciešams rūpīgi mazgāt.

Šķīvveida vakuumfiltrs parādīts 5.35. attēlā. Tas sastāv no horizontāla, ar filtrējošo audumu pārvilkta diska 1, kas apakšējā daļā sadalīts sektoros. Sadalitāja galviņa 2 novada filtrātu un mazgāšanas ūdeni. Suspensiju uzlej uz diska. Kad disks veicis vienu apgriezīenu, nogulsnes noņem ar nazi 3. Dažiem šķīvveida vakuumfiltriem sektori ir grozāmi, tādēļ iespējams pilnīgāk attīrīt audumu.

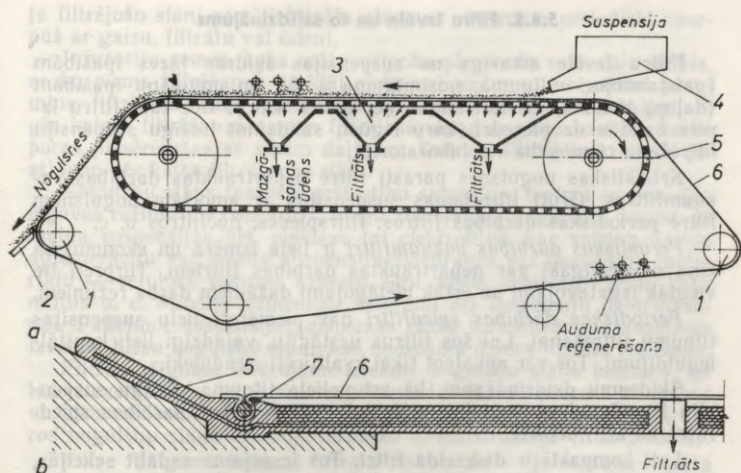
Šķīvveida vakuumfiltri darbojas retinājumā 100...200 mm Hg.

Šķīvveida vakuumfiltru trūkumi: lieli izmēri, maza filtrējošā virsma, apgrūtināta nogulšņu noņemšana un filtrējošā auduma reģenerācija.

Lentveida vakuumfiltri. Lentveida vakuumfiltri (5.36. att. *a*) sastāv no filtrējošā auduma 6, kas izveidots bezgalu lentes veidā un pārlikts pāri veltniņiem 1. Filtrējošā lente pārvietojas kopā ar riņķveidīgu gumijas lenti 5, kurā ir caurumi filtrāta novadīšanai (5.36. att. *b*). Ar īpašiem gumijas vadiem 7, kas iešūti auduma malās un iespiesti gumijas lentes padziļinājumos, filtrējošo audumu piespiež pie gumijas lentes. Gumijas lentei filtrēšanas joslā malas atlokās uz augšu. Zem gumijas lentes novietotas vakuumkameras 3, kurās satek filtrāts un mazgāšanas ūdens. Suspensiju pievada pa piltuvi 4. Kopā ar lenti suspensija slīd uz priekšu, atdalās šķidrā fāze, un nogulsnes paliek uz lentes. Nogulsnes noņem lentes izliekuma vietā 2.



5.35. att. Šķīvveida vakuumfiltra shēma.



5.36. att. Lentveida vakuumfiltra shēma.

Lentveida vakuumfiltriem ir plaisu izlīdzinātāji un vibratori, kas veicina nogulsņu atūdeņošanu. Ja nogulsņu slānis ir mazāks par 6...8 mm vai nogulsnes grūti atdalāmas no filtrējošā auduma, tad saspiesta gaisa vai tvaika pievadīšanai veltnīti 1 izveido caurumotu. Ja tehnoloģiskais process pieļauj, nogulsnes noskalo ar ūdens strūklu.

Lentveida vakuumfiltru priekšrocības: vienkārša konstrukcija; vispirms nogulsnējas rupjās daļiņas; ērti mazgāt nogulsnes; iespējams labi reģenerēt filtrējošo audumu; var hidrauliski noņemt nogulsnes, neatšķaidot ne suspensiju, ne filtrātu; ērti apkalpot; lietojami agresīvu suspensiju filtrēšanai, jo to izgatavošana no skābes izturīga materiāla nerada grūtības.

So filtru trūkumi: nepilnīga filtrējošā auduma izmantošana; maza filtrējošā virsma; rūpīgi jāseko suspensijas pievadīšanai; iegūst duļķainu filtrātu; suspensija stipri atdziest.

5.4.4. Nepārtrauktas darbības spiedfiltri

Pie nepārtrauktas darbības spiedfiltriem pieder cilindriskie spiedfiltri, diskeida un lentveida spiedfiltri. Atšķirībā no vakuumfiltriem spiedfiltri ieslēgti hermētiskā apvalkā, kurā ar saspiegtu gaisu vai inerti gāzi rada virspiedienu — dažiem filtru veidiem pat līdz 0,7 MPa. Spiedfiltru filtrēšana noris ātrāk nekā vakuumfiltru, tajos var filtrēt viskozus un gaistošus šķidrumus.

5.4.5. Filtru izvēle un to salīdzinājums

Filtru izvēle atkarīga no suspensijas šķidrās fāzes īpašībām (gaistamības, indīguma, nozīmīguma u. c.) un nogulšņu īpašībām (daļiņu lieluma, kristāliskuma, ķepīguma u. c.). Bez tam filtru izvēlē balstās uz pieredzi, kuru iegūst, salīdzinot līdzīgu suspensiju filtrēšanu rūpniecībā vai laboratorijā.

Kristāliskas nogulsnes parasti filtrē nepārtrauktas darbības vakuumfiltrās. Grūti filtrējamas suspensijas ar amorfām nogulsnēm filtrē periodiskas darbības filtrās: filtrspiedēs, nučfiltrās u. c.

Periodiskas darbības vakuumfiltri ir liela izmēra un ekonomiskā ziņā neizdevīgāki par nepārtrauktas darbības filtriem. Turpretī tie vieglāk izgatavojami un ērtāk pielāgojami dažādiem darba režīmiem.

Periodiskas darbības spiedfiltri nav piemēroti lielu suspensiju tilpumu filtrēšanai. Lai šos filtrus uzstādītu, vajadzīgi lieli kapitālieguldījumi. Tos var apkalpot tikai kvalificēti strādnieki.

Šķidrumu dzidrināšanai, kā arī neliela tilpuma vērtīgu suspensiju filtrēšanai turpretī ļoti noderīgi ir periodiskas darbības spiedfiltri, kā arī nučfiltri.

Ļoti kompakti ir diskveida filtri. Tos iespējams sadalīt sekcijās, tādēļ vienā agregātā var filtrēt pat divas suspensijas.

Lielas perspektīvas ķīmiskajā rūpniecībā, keramikas, ogļu, krāsaino metālu, rūdu un citās rūpniecības nozarēs ir automātiskajām filtrspiedēm. To ražīgums 5...15 reižu lielāks nekā parastajām filtrspiedēm. Automātiskās filtrspiedes ir divreiz ražīgākas par nepārtrauktas darbības vakuumfiltriem.

5.4.6. Filtru ražīgumu ietekmējošie faktori

Filtru ražīgumu ietekmē: filtrējošā slāņa un nogulšņu slāņa īpatnējā pretestība; filtrāta viskozitāte; spiedienu starpība filtrēšanas laikā; cietās fāzes koncentrācija suspensijā un citi faktori.

Filtrējošā slāņa un nogulšņu slāņa pretestība ir viens no svarīgākajiem filtra ražīgumu ietekmējošiem faktoriem. So pretestību samazināšanai ir ļoti liela nozīme. Filtrējošā slāņa pretestība atkarīga ne tikai no šo slāni veidojošā materiāla, bet arī no suspensijas īpašībām. Ja sīkdispersas daļiņas iekļūst filtrējošā slāņa porās, tā īpatnējā pretestība var palielināties simt reižu. Filtrējot ar plānu nogulšņu slāni, tieši filtrējošā slāņa materiāls galvenokārt rada pretestību.

Lai samazinātu filtrējošā slāņa pretestību, pareizi jāizvēlas filtrējošais materiāls; jāizvairās no lielas spiedienu starpības, kā arī filtrēšanas sākumā no pulsējošā spiediena, jo tas traucē labi filtrējošā nogulšņu slāņa veidošanos. To panāk, lietojot suspensijas pievadīšanai montežu vai centrālās sūkņus un uzstādot resiveru pirms filtrāta un mazgāšanas ūdens sūkņa. Pretestība samazinās,

ja filtrējošo slāni pretēji filtrāta plūsmas virzienam periodiski caurpūš ar gaisu, filtrātu vai ūdeni.

Infuzoriju zemes, koka miltu vai cita piemērota materiāla slānis, ar ko pirms filtrēšanas pārklāj sietu vai audumu, ievērojami pazemina filtrējošā slāņa pretestību. Filtrējot smalkas suspensijas, ik pēc katras filtrēšanas noņem filtrējošā slāņa augšējo kārtiņu, kuras poras piesērējušas ar sīkām daļiņām. Dažreiz filtrējošais slānis jāatjauno pēc katra filtrēšanas cikla.

Nogulšņu slāņa ipatnējo pretestību samazina, mainot suspensijas ieguves režīmu un receptūru. Viegli filtrējamas nogulsnes iegūst, ja maina suspensijas pH, pievieno tai elektrolītus, kas veicina daļiņu aglomerāciju vai ievada suspensijā šķiedrainu vai graudainu materiālu — celulozi, lignīnu, azbestu, ogli, kritu, infuzoriju zemi, koka miltus u. c. Minētie paņēmieni lietojami arī suspensiju dzidrināšanai. Palielinot suspensijas dispersās fāzes koncentrāciju, iespējams izveidot biezu nogulšņu slāni, kas nodrošina dzidra filtrāta iegūšanu.

Filtra ražīgumu ievērojami ietekmē nogulšņu slāņa biezums, un tas jāizvēlas tāds, lai iegūtu augstākus filtrēšanas procesa tehniskos un ekonomiskos rādītājus. Šis nosacījums neattiecas uz filtriem, kuros nogulšņu slāņa biezumu ierobežo to konstrukcija (filtrspiedēm).

Filtra ražīgumu ietekmē filtrāta viskozitāte — jo mazāka filtrāta viskozitāte, jo lielāks filtra ražīgums. Tādēļ pirms filtrēšanas vēlams suspensiju sildīt. Karstās suspensijās cietās daļiņas nogulsņējas ātrāk, bez tam filtra ražīguma palielināšanos veicina arī gaisa izdalīšanās no sasildītās suspensijas.

Filtrējot agresīvas suspensijas, temperatūras paaugstināšana veicina koroziju. Tādēļ katrā konkrētajā gadījumā jānosaka optimālā filtrēšanas temperatūra.

Ja filtrē nesaspiežamas (kristāliskas) nogulsnes, tad, palielinot spiedienu, filtra ražīgums pieaug, turpretī, ja filtrē saspiežamas nogulsnes, tas samazinās.

Liela nozīme ir suspensijas cietās fāzes koncentrācijai. Filtra ražīgums strauji pieaug (attiecībā uz nogulsnēm), ja cietās fāzes koncentrācija suspensijā sasniedz zināmu robežu (200...250 g/l). Tādēļ atšķaidītas suspensijas pirms filtrēšanas bieži koncentrē lētākās un vienkāršākās iekārtās — sabiezinātājfiltros vai nostādinātājos.

Cilindrisko vakuumfiltru un diskveida vakuumfiltru ražīgumu palielina, mainot vārpstas apgriezīgu skaitu. Maksimālo apgriezīgu skaitu nosaka minimālais pieļaujamais nogulšņu slāņa biezums, un tas ir atkarīgs no nogulšņu noņemšanas veida.

Lielākajai daļai periodiskās darbības filtru ekonomiskais filtrēšanas režīms atbilst šādai attiecībai:

$$\frac{\tau_f}{\tau_p} = 4 \dots 5,$$

kur τ_f — filtrēšanas cikla ilgums, h; τ_p — palīgoperāciju (nogulšņu aizvākšana, filtra salikšana u. c.) ilgums, h.

5.4.7. Nogulšņu mazgāšana

Filtrējot iegūtās nogulsnes bieži vien jāatbrīvo no atsālņa vai arī, pievadot selektīvus šķīdinātājus, nogulsnes jāizšķīdina kāds no komponentiem. Nogulšņu mazgāšana atšķiras no filtrēšanas ar to, ka, nogulsnes mazgājot, to slāņa biežums paliek nemainīgs.

Nogulšņu mazgāšana iedalāma divos posmos: pirmajā posmā mazgāšanas šķidrums izspiež atsālņi no porām un lielākajiem kapilāriem, kas atrodas nogulšņu virspusē; otrajā posmā ar mazgāšanas šķidrumu aizskalo atsālņi, kas atrodas uz daļiņu virsmas un ļoti sikos kapilāros. Atsālņa izskalošana no sikajiem kapilāriem saistīta ar mazgāšanas šķidruma difundēšanu kapilāros, tādēļ nepieciešams ilgstošs mazgāšanas šķidruma kontakts ar nogulsniem.

Pirmajā mazgāšanas posmā mazgāšanas šķidruma koncentrācija ir augsta un maz mainās, tādēļ mazgāšanas šķidrumu var pievienot filtrātam, ievērojami nepazeminot tā koncentrāciju. Mazgājot nesaoplaisājušas nogulsnes (ar vienādu caurplūdi), iespējams aizvākt 70...80% atsālņa.

Mazgāšanas šķidruma plūsmu pārvieto tajā pašā virzienā kā filtrāta plūsmu, ja vajadzīgais produkts ir suspensijas šķidrā fāzē, nevis nogulsnes. Ja mazgāšanas šķidrums plūst pretējā virzienā nekā filtrāts, tad tas sairdina nogulsnes un izjauc vecos kanālus. Jau pašā sākumā atsālnis sajaucas ar mazgāšanas šķidrumu, un mazgāšanas šķidruma koncentrācija strauji samazinās. Šajā gadījumā nogulsnes labāk izmazgā, taču patērē vairāk mazgāšanas šķidruma. Iegūtos mazgāšanas šķidrumus filtrātam nepievieno. So mazgāšanas veidu lieto, kad nogulsnes ir vajadzīgais produkts.

Nogulšņu izmazgāšanas pakāpe ir pievadāmā mazgāšanas šķidruma tilpuma un laika funkcija. Rūpniecības apstākļos nogulsnes izmazgā tikai daļēji, tāpēc ka ir ierobežots mazgāšanas šķidruma tilpums, kā arī mazgāšanas procesam paredzētais laiks. Parasti mazgāšanas ilgumu nosaka pēc ekonomiskiem apsvērumiem un atsālņa difūzijas ātruma mazgāšanas šķidrumā. So laiku nosaka eksperimentāli.

Ja nogulsnes pilnīgi jāatbrīvo no atsālņa, tad tās atkārtoti suspendē un filtrē. Lai mazgāšanas šķidrums filtrātu pārāk neatšķaidītu, nogulsnes vispirms mazgā ar iepriekšējās filtrēšanas mazgāšanas šķidrumu un tikai beigās ar tīru šķidrumu.

Nogulšņu mazgāšanai vairāk piemēroti plāksņu un čaulišu filtri. Cilindriskajos vakuumsiltros (ārējos) isā mazgāšanas cikla dēļ, kā arī filtrspiedēs nogulsnes nav iespējams labi izmazgāt.

5.5. CENTRIFUGĒŠANA

5.5.1. Centrifūgu klasifikācija un izvēle

Iekārtas, kurās šķidro neviendabīgo sistēmu sadala centrālās spēka ietekmē, sauc par *centrifūgām*. Centrifūgas galvenā daļa ir rotējošs grozs (cilindrs), kurā ievada suspensiju vai emulsiju.

Centrifūgām neviendabīgo sistēmu sadalīšanas efektivitāti, tāpat kā cikloniem (sk. 175. lpp.), raksturo Frūda kritērijs (atdales faktors K_a):

$$K_a = \frac{u^2}{gR} = 4Rn^2. \quad (5.28)$$

Jo skaitliski lielāks atdales faktors, jo intensīvāk notiek centrifugēšana. (Izņēmums ir viegli saspiežamu nogulšņu centrifugēšana filtrējošā centrifūgā.)

Centrifūgās sadala kā suspensijas, tā emulsijas. Centrifugēšanu veic centrifūgās ar *blīvu* vai *caurumotu* (perforētu) *grozu*.

Suspensiju vai emulsiju sadalīšanu centrifūgā ar blīvu grozu var salīdzināt ar nostādīšanu. Centrifūgā nostādīšanu izdara centrālās spēka laukā, un tā notiek ievērojami ātrāk nekā parastajos nostādīnātajos, kur daļiņas pakļautas tikai smaguma spēka ietekmei. Šādas centrifūgas sauc par *nostādīnošām centrifūgām*. Fāze, kurai ir lielāks blīvums, sakrājas gar groza sienām. Nostādīnošās centrifūgas lieto grūti filtrējamo suspensiju sadalīšanai.

Suspensiju sadalīšana centrifūgās ar caurumotu grozu līdzīga filtrēšanai, tādēļ šādas centrifūgas sauc par *filtrējošām centrifūgām*. Filtrējošā centrifūgā nogulsnes var pilnīgāk atdalīt no šķidrās fāzes un tās viegli izmazgāt.

Pēc tehnoloģiskās nozīmes nostādīnošās centrifūgas iedala 1) *vienkāršās centrifūgās*, kurās sadala samērā koncentrētas suspensijas; 2) *dzirdināšanas centrifūgās*, kas paredzētas niecīga daudzuma sīkdispersu daļiņu atdalīšanai; 3) *koncentrēšanas centrifūgās*, kurās suspensiju sabiezina, un 4) *separējošās centrifūgās* jeb *sadalīšanas centrifūgās* — emulsiju un suspensiju sadalīšanai; šādas centrifūgas sauc par *separatoriem*.

Pēc atdales faktora vērtības centrifūgas iedala divās grupās: *normālās centrifūgas* un *supercentrifūgas*.

Normālajām centrifūgām $K_a < 3,5 \cdot 10^3$ (parasti rūpniecībā lietojamām centrifūgām $K_a < 10^3$); ja $K_a > 3,5 \cdot 10^3$, tās pieder pie *supercentrifūgām* (ultracentrifūgām). Normālās centrifūgas lieto šķidrās fāzes izdalīšanai no dažāda rupjuma un dažādas koncentrācijas suspensijām, emulsijām un gabalveida materiāliem. Supercentrifūgas lieto niecīgas koncentrācijas smalku suspensiju un emulsiju sadalīšanai. Šo centrifūgu grozi ir blīvi, ar nelielu diametru.

Centrifūgas iedala arī pēc nogulšņu aizvākšanas veida. Nogulsnes var aizvākt, 1) apstādinot centrifūgu — neliela ražīguma centrifūgas; 2) izmantojot gravitācijas spēku — centrifūgas, kurās nogulsnes aizvāc, grozu bremzējot; 3) ar nažiem — nogulsnes aizvāc periodiski, grozu neapturot vai samazinot tā apgriezību skaitu; 4) ar gliemezi — nogulsnes aizvāc nepārtraukti, nesamazinot groza apgriezību skaitu; 5) izmantojot centrālās spēku, — filtrējošās centrifūgās nogulsnes aizvāc nepārtraukti, nostādīnošās centrifūgās — periodiski; 6) izlādējot hidrauliski (ar šķidrums strūklu); 7) izlādējot ar pulsējošu virzuli (bīdītāju).

Atkarībā no konstrukcijas izšķir vertikālās, horizontālās, atbalstītās un pakarinātās centrifūgas.

Pēc darbības principa centrifūgas iedala periodiskās, kombinētas un nepārtrauktas darbības centrifūgās.

Izvēloties centrifūgu, jāievēro dispersās fāzes smalkums, dispersijas vides viskozitāte, dispersās fāzes un dispersijas vides blīvumu starpība un suspensijas koncentrācija.

Dispersās fāzes smalkums nosaka centrifūgas ražīgumu un fugāta dzidrumu. Jo sikākas daļiņas, jo mazāks ražīgums un fugāts duļķaināks. Smalkākas suspensijas sadalīšanai jāizvēlas centrifūgas ar lielāku atdales faktoru.

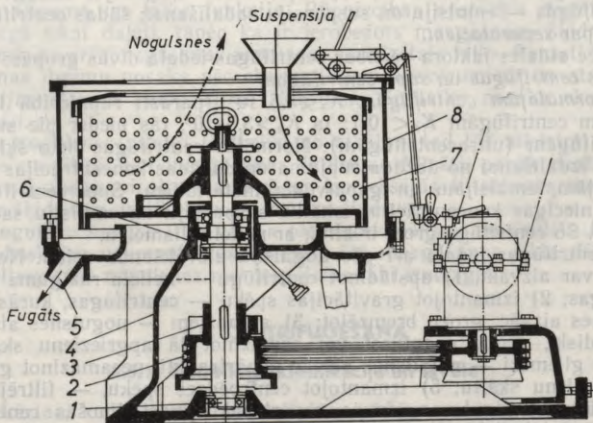
Ja dispersijas vides viskozitāte ir lielāka, centrifūgas ražīgums samazinās. Tādēļ, ja tehnoloģiskais process to pieļauj, ieteicams centrifugēt karstas suspensijas un emulsijas.

Centrifugēšanu ietekmē fāžu blīvumi: ja tie ir atšķirīgāki, tad sistēma vieglāk sadalāma.

Pēc suspensijas koncentrācijas nosaka, kādas grupas centrifūga jālieto. Piemēram, ja cietās vielas koncentrācija pārsniedz 1%, nav ieteicams dzidrināšanai lietot supercentrifūgu, jo tādā gadījumā centrifūga bieži jāatbrīvo no nogulsņiem.

5.5.2. Normālās centrifūgas

Periodiskās darbības vertikālās centrifūgas. Periodiskās darbības vertikālās centrifūgas shēma redzama 5.37. attēlā. Vertikālās vārpstas 3 apakšējais gals ievietots pēdā 1. Vārpstai rotācijas kustību



5.37. att. Centrifūgas shēma.

piešķir ķīlsiksnas pārvads 2. Vārpstas augšējam galam piestiprināts caurumots grozs 7, kas ievietots metāla apvalkā 8, kurā savāc fugātu un kurš pasargā apkalpojošo personālu no iespējamām nelaimes gadījumiem. Apvalks piestiprināts pie centrifūgas statņa 4. Fugātu aizvada pa tekni 5 apvalka zemākajā vietā. Nogulsnes, kas sakrājas uz groza iekšējās virsmas, pēc centrifūgas apturēšanas aizvāc pa groza augšu, tādēļ šādus agregātus sauc par *centrifūgām ar nogulšņu augšējo aizvākšanu*.

Centrifūgas ar caurumotu grozu lieto, ja šķidrā fāze jāatdala no gabalveida materiāla, šķiedraina, kristāliska vai dažāda rupjuma graudaina materiāla vai arī jāmazgā nogulsnes. Šādās centrifūgās atkarībā no dispersās fāzes rupjuma iespējams iegūt nogulsnes ar minimālu mitruma saturu — 1...40% (vidējais dispersitātes suspensijai 1...5%; jo smalkākas daļiņas, jo lielāks mitruma saturs nogulsnēs).

Centrifūgas groza caurumi ir apaļi, to diametrs 2,5...13 mm. Tādu suspensiju centrifūgēšanai, kurām ir šķiedraina dispersā fāze, perforējumi ir garenu spraugu veidā.

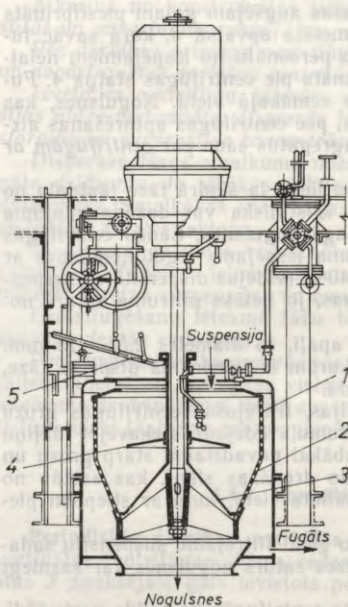
Centrifūgējot smalkas suspensijas, filtrējošās centrifūgās grozu izklāj ar sietu vai filtrējošo audumu, tādējādi aizkavējot daļiņu iekļūšanu fugātā. Šķidrās fāzes labākai novadišanai starp grozu un sietu vai filtrējošo audumu izveido drenāžas slāni, kas sastāv no vienā kārtā vai vairākās kārtās salikta sieta, kurš ar stieplēm piestiprināts pie groza.

Centrifūgas ar blīvu grozu lieto grūti filtrējamu suspensiju sadalīšanai. Šādā gadījumā šķidrās fāzes saturs nogulsnēs var sasniegt pat 70%.

Periodiskas darbības centrifūgās centrifūgēšanas cikls noris šādi. Centrifūgu piepilda ar suspensiju pirms iedarbināšanas vai arī rotējot ar pilnu vai samazinātu apgriezību skaitu. Tad groza apgriezību skaitu palielina līdz maksimālajam. Pēc šķidrās fāzes atdalīšanas nogulsnēs paliek atsālnis. Lai no tā atbrīvotos, nogulsnes mazgā ar vienu vai vairākiem šķidrumiem. Nogulšņu atdalīšanai no mazgāšanas šķidruma grozam ļauj kādu laiku griezties. Pēc tam izslēdz dzinēju un sāk bremsēt grozu. Nogulsnes aizvāc, kad grozs apstāties. Ar mehāniskām lāpstiņām vai nažiem nogulsnes aizvāc, grozam rotējot ar nelielu ātrumu vai ar pilnu apgriezību skaitu.

Centrifūgējot blīvā grozā, suspensiju ievada no apakšas, grozam rotējot. Šķidrā fāze ceļas gar sienām uz augšu un list pāri groza malai. Kad groza darba tilpums aizpildīts ar nogulsnēm, centrifūgas barošanu pārtrauc. Ja vajadzīga nogulšņu stiprāka sablīvēšana, tad grozu vēl kādu laiku griež. Atlikušo šķidro fāzi pa īpašu cauruli nosūc. Pēc tam centrifūgu bremsē un aizvāc nogulsnes.

Centrifūgēšanas cikls var būt arī citāds. Atkarībā no nogulšņu īpašībām (ķepīgas nogulsnes) pēc centrifūgēšanas tās no sienas samet groza dibenā. Grozā ieļej mazgāšanas šķidrumu, nogulsnes uzduļķo un atkal iedarbina centrifūgu. Tā turpina, līdz nogulsnes atbrīvojušās no atsālņa. Lietojot selektīvu šķīdinātāju, nogulsnēs var izšķīdināt attiecīgo komponentu. Pēc tam nogulsnes aizvāc.



5.38. att. Pakarināta centrifūga ar apakšējo izlādi.

nepieciešams, nogulsnes mazgā, apžāvē un grozu breinzē. Kad groza apgriezību skaits sasniedzis $1,7 \dots 2,5 \text{ s}^{-1}$, noslēdzējkonusu 3 paceļ ar sviru 5 uz augšu. Apturot grozu, nogulsnes noslīd pa slīpo groza sienu uz leju (sienas slīpuma leņķis ir lielāks par nogulņu dabiskā nobiruma leņķi).

Sādu centrifūgu lieto vidēji smalku suspensiju sadalīšanai. Nogulsnēm jābūt pietiekami irdenām, lai tās pašas slidētu uz leju.

Periodiskas darbības horizontālās centrifūgas. Pie šās centrifūgu grupas pieder periodiskas darbības horizontālās centrifūgas ar automatizētu nogulšņu novācēju nažu vai skrāpju pārbīdi, kā arī ar automatizētu barošanas vārstu, mazgāšanas šķidrums vārstu un citu vārstu aizvēršanas un atvēršanas. Periodiskas darbības horizontālās centrifūgas izgatavo gan ar caurumotu, gan ar blīvu grozu. Dažiem šīs grupas centrifūgu veidiem paredzēta pat filtrējošā auduma vai sieta automatiska reģenerācija. Tādēļ šīs centrifūgas sauc par *automātiskajām centrifūgām*.

Automātiskās centrifūgas paredzētas vidējas (kālija hlorīda, vara

5.37. attēlā parādītās centrifūgas negatīvā īpašība ir tās jutīgums pret nevienmērīgu centrifūgējamās masas sadalīšanos grozā tā rotācijas laikā; tas rada vārpstas vibrēšanu. To novērš, izveidojot elastīgu augšējo balstu 6. Tādējādi rotējošās masas inerces centrs vienmēr atrodas uz rotācijas ass.

Vārpstas vibrēšana novērsta *pakarinātās centrifūgās*. Jaunākās konstrukcijas pakarinātās centrifūgas paredz *nogulšņu apakšējo izlādi* (5.38. att.). Nogulsnes aizvāc ar īpašu lāpstu, vai izmantojot smaguma spēku. Šāda centrifūga ir periodiskas darbības filtrējoša centrifūga. Grozs sastāv no divām daļām — cilindriskās daļas 1 un koniskās daļas 2. Groza apakšējā daļa ir atverama, darba laikā to noslēdz ar konusu 3. Grozam grieztoties ar nepilnu apgriezību skaitu, suspensijas struklu virza uz rotējošo disku 4, kas suspensiju izšķaida uz groza sienām. Palielinot apgriezību skaitu, fugāts izkļūst cauri grozam un satek apvalka apakšējā daļā, no kurienes to aizvada. Pēc tam, ja

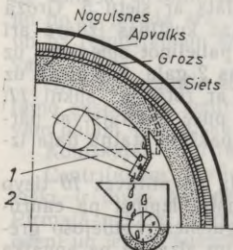
sulfāta) vai smalkas (kalcija sulfāta) dispersitātes suspensiju sadalīšanai. Sadalāmās suspensijas dispersās fāzes daļiņu lielākais diametrs graudainam materiālam var būt līdz 5 mm; šķiedrainam — šķiedras garums līdz 4 mm (ja šķiedras ir garākas, vajadzīga īpaša nogulšņu aizvākšana). Ar šīm centrifūgām labi izmazgā, apžāvē nogulsnes un atsevišķi savāc fugātu un mazgāšanas šķidrumu.

Automātiskajās centrifūgās nogulsnes no groza noņem ar īpašiem naziem vai skrāpjiem 1 (5.39. att.). Noņemtās nogulsnes sakrīt gliemežveida transportieri 2 vai arī pa slīpu tekni tiek aizvadītas uz krātuvi. Nogulsnes noņem, nesamazinot groza apgriezību skaitu. Ar šādu noņemšanas paņēmieni nogulsnes tiek stipri sasmalcinātas.

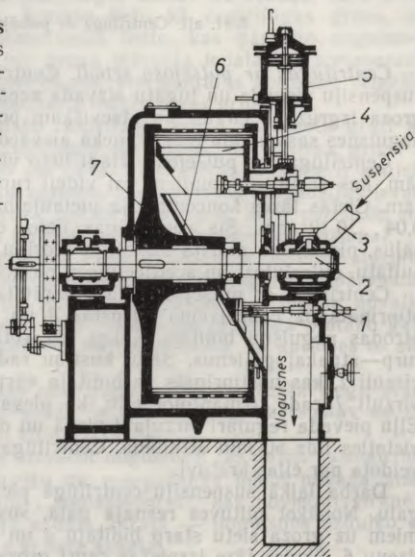
Automātiskā periodiskas darbības centrifūga parādīta 5.40. attēlā. Uz horizontālās vārpstas 2 uzstiprināts grozs 7. Suspensiju pievada pa cauruli 3, grozam rotējot ar darbam paredzēto apgriezību skaitu. Šķidrā fāze izplūst cauri grozam un satek apvalka zemākajā vietā, no kurienes to aizvada.

Pēc nogulšņu mazgāšanas un apžāvēšanas tās nogriež ar nazi 4, ko pārbīda ar hidraulisko iekārtu 5. Nogulsnes sakrīt tekņē 6, pa kuru tās izvada no centrifūgas. Teknes vietā dažām centrifūgām ir gliemežveida transportieris. Lai veicinātu nogulšņu slidēšanu, paredzēta teknes vibrēšana ar pneimatisko veseri 1.

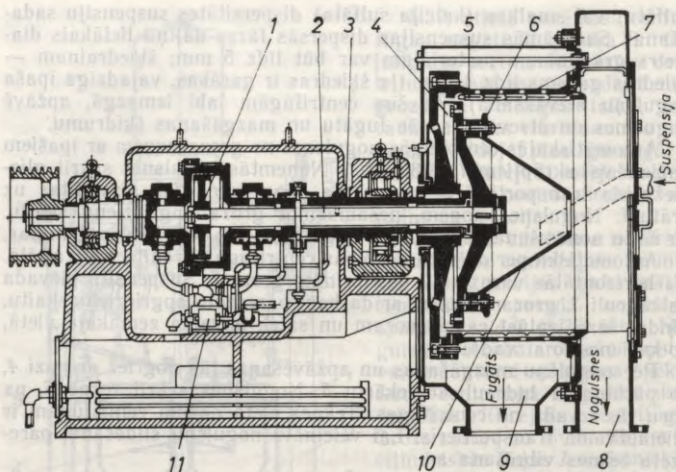
Nepārtrauktas darbības centrifūgas. Pie šīs grupas centrifūgām pieder horizontālās centrifūgas ar pulvējošu izlādi; koniskās nostādinošās centrifūgas ar gliemežveida izlādi un vertikālās koniskās centrifūgas ar centrālās izlādi.



5.39. att. Nogulšņu nogriešana.



5.40. att. Automātiskās periodiskas darbības centrifūgas shēma.



5.41. att. Centrifūga ar pulsējošu izlādi.

Centrifūgas ar pulsējošu izlādi. Centrifūgās ar pulsējošu izlādi suspensiju pievada un fugātu aizvada nepārtraukti, bet nogulsnes no groza izgrūž ar virzuli pa atsevišķām porcijām. Sajās centrifūgās nogulsnes sasmalcina mazāk, nekā aizvācot tās ar nažiem.

Centrifūgas ar pulsējošu izlādi lieto viegli filtrējamām suspensijām, kas sastāv no rupjiem vai vidēji rupjiem kristāliem vai šķiedrām. Cietās fāzes koncentrācija pieļaujama līdz 50%, daļiņu izmērs 0,04...0,12 mm. Šīs centrifūgas lieto, centrifugējot neorganiskos sāļus, piemēram, nātrija un kālija hlorīdu, nātrija, amonija un vara sulfātu, etilcelulozi un acetilcelulozi, pirosilīnu u. c.

Centrifūga ar pulsējošu izlādi parādīta 5.41. attēlā. Grozs 7 uzstiprināts uz cauruļveida vārpstas 3 un izklāts ar sietu 5. Grozā atrodas nogulšņu bīdītājs 4, kas bez rotācijas kustības izdara arī turp—atpakaļ gājienu. Sādu kustību rada, palielinot spiedienu uz virzuli 1, kas nostiprināts uz bīdītāja vārpstas 2 gala. Spiedienu uz virzuli 1 rada, izmantojot eļļu, ko pievada ar rotācijas sūkni 11. Eļļu pievada regulāri virzuļa 1 vienā un otrā pusē. Bīdītājs var pārvietoties līdz 50 mm attālumā. Centrifūgas apakšējā statņa daļa izveidota par eļļas krātuvi.

Darba laikā suspensiju centrifūgā pievada pa piltuves 10 tievo galu. Nonākot piltuves resnajā galā, suspensija izplūst pa caurumiem uz groza sietu starp bīdītāju 4 un nogulsnes regulējošo gredzenu 6. Šķidrā fāze izspiežas cauri grozam un aizplūst pa apvalka apakšdaļu 9. Virzulis nogulsnes bīda uz priekšu un izsviež gar groza priekšējo malu apvalkā, no kurienes pa tekni 8 tās izbirst laukā.

Lai centrifūga normāli darbotos, suspensija jāpievada vienmērīgi un tai jābūt ar nemainīgu koncentrāciju. Centrifūgas ar pulsējošu izlādi nav lietojamas atšķaidītu suspensiju sadalīšanai — ja šķidrā fāze nefiltrējas pietiekami ātri, tad tā uzkrājas grozā un noskalo nogulsnes; līdz ar to rodas vibrēšana, kas nav vēlama. Centrifūga darbojas normāli, ja izveidojas vienmērīgi bieza nogulšņu kārtā.

Centrifūgām ar pulsējošu izlādi ražīgums ir stipri svārstīgs atkarībā no suspensijas īpašībām, nogulšņu beigu mitruma un citiem faktoriem.

Koniskās nostādinošās centrifūgas ar gliemežveida izlādi. Koniskās nostādinošās centrifūgas lietojamas gan suspensiju sadalīšanai, gan arī to klasificēšanai pēc daļiņu lieluma.

No šo centrifūgu pozitīvajām īpašībām jāatzīmē vienmērīgais darba režīms, mazie izmēri, vienkāršā apkalpošana, samērā nelielais enerģijas patēriņš. Taču ar tām neiegūst dzidru fugātu. Pilnīgi dzidru šķidro fāzi var iegūt tikai tad, ja centrifūgē suspensijas, kurām daļiņu lielums sasniedz noteiktu rupjumu.

Koniskās nostādinošās centrifūgas parasti lieto, ja no cietās fāzes jānodala sīkās daļiņas, kuras aizplūst kopā ar fugātu, piemēram, kaolīna, ogļu, rūdu bagātināšanā, pārtikas rūpniecībā, izdalot cietes graudiņus no cietes piena, ķīmiskajā rūpniecībā u. c.

Koniskās nostādinošās centrifūgas sastāv no konusa, kurā ievietots cilindrs — caurule. Konusu lieto kā centrifūgas grozu, pie cilindra piestiprināta gliemežveida lente, kas pārvieta nogulsnes.

Koniskās centrifūgas pēc groza stāvokļa iedalāmas *horizontālās* un *vertikālās koniskās centrifūgas*. Horizontālās koniskās centrifūgas pēc konstruktīvā izveidojuma iedala divās grupās.

Pirmā horizontālo konisko centrifūgu grupa paredzēta grūti atdalāmo suspensiju centrifugēšanai un sastāv no koniska groza 5, kas griežas ap horizontālo asi (5.42. att.). Groza iekšienē ir konisks gliemezis 4 ar cauruļveida vārpstu, kurā atrodas suspensijas ievadcaurule 3. Centrifūgas grozu aptver apvalks 6, kurā paredzēti nodalījumi 1 un 8 nogulšņu un fugāta savākšanai un aizvadišanai.

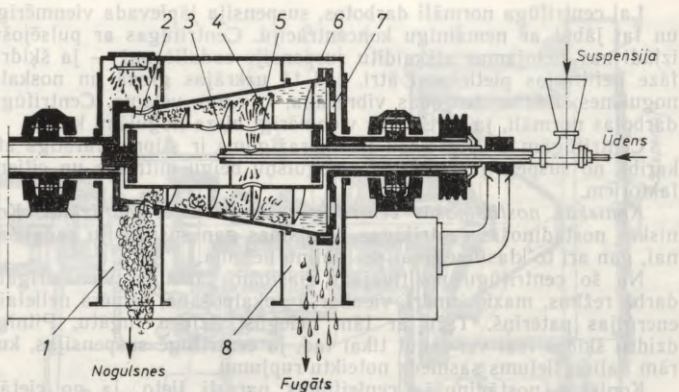
Gliemezis un grozs griežas vienā virzienā ar ātrumu starpību 1,5...3%. Gliemeža vītnes izveidotas tā, lai nogulsnes pārvietotu uz konusa virsotni, kur pa spraugām 2 nogulsnes ievada apvalkā un no tā izvada ārā. Šķidrā fāze pārvietojas uz groza platāko galu un pa regulējamām spraugām 7 iekļūst apvalkā, no kurienes to aizvada.

Otrā horizontālo konisko centrifūgu grupa paredzēta viegli atdalāmo suspensiju centrifugēšanai. Šo centrifūgu grozs sastāv no divām daļām — koniskās un cilindriskās.

Koniskajās centrifūgās aizvācot nogulsnes, tās daļēji sasmalcina.

Centrifūgām, kurās fugātu un mazgāšanas ūdeni novada atsevišķi, ir divas pakāpes (divi koniskie grozi, kas novietoti virknē). Pirmajā pakāpē suspensiju sadala, otrajā — nogulsnes uzduļķo ar ūdeni un iegūto suspensiju vēlreiz sadala.

Centrifūgās ar gliemežveida izlādi var atdalīt daļiņas, kas lielākas par 3...5 μm. Iegūto nogulšņu mitrums ievērojami lielāks nekā



5.42. att. Horizontālās koniskās nostādinošās centrifūgas shēma.

nogulsnēm, kas iegūtas filtrējošās centrifūgās. Tas tuvojas vakuumfiltru nogulšņu mitrumam, nogulsnes bieži vien ir pastas veidā.

Mecvielu ekstraktu rūpniecībā, ogļu smalkumu, smilts, rūdu un citu rupju un vidēji rupju suspensiju atūdeņošanai lieto vertikālās koniskās centrifūgas ar gliemežveida izlādi vai centrēdzes izlādi.

5.5.3. Supercentrifūgas

Ļoti smalku suspensiju, emulsiju un koloīdu sistēmu sadalīšanai normālās centrifūgas nav piemērotas. Šādas sistēmas var sadalīt *supercentrifūgās (ultracentrifūgās)*.

Supercentrifūgas pēc izveidojuma un apgriezību skaita iedala
1) *separatoros* ar groza diametru 150...350 (pat līdz 600) mm un vārpstas apgriezību skaitu 5500...10 000 apgriezieni minūtē;
2) *cauruļveida supercentrifūgās* ar diametru <150 mm un vārpstas apgriezību skaitu 14 000...45 000 apgriezieni minūtē.

Separatori. Separatorus lieto emulsiju un suspensiju sadalīšanai. Tāpat kā centrifūgām, arī separatoriem galvenie elementi ir grozs un vārpsta. Vārpstas griešanai parasti lieto gliemežpār vadu. Gliemezis izveidots tieši uz darba vārpstas.

Separatorus iedala *vienkameras, vairākkameru un šķīvjuveida separatoros*.

Vienkameras separatorus bieži lieto suspensiju (emulsiju) iepriekšējai sadalīšanai.

Vairākkameru separatorus izmanto ķīmiskajā rūpniecībā un pārtikas rūpniecībā, piemēram, lai atdalītu cietus piemaisījumus no eļļām, lakām, benzīna, trihloretāna, tetrahloroglekļa, augu sulām, kā

arī baktēriju, koloīdu daļiņu atdalīšanai u. c. Šie separatori lietojami tad, ja cietās fāzes koncentrācija nepārsniedz dažus procentus.

Šķīvjuveida separatoros šķīvji sadala visu šķidrumu plānās kārtās (atstarpe starp šķīvjiem 0,3...1,5 mm), nepalielinot tā ātrumu (atšķirībā no vairākkameru separatoriem). Tādēļ daļiņu virzišanās attālums līdz nogulsnešanās virsmai ievērojami samazinās. Šķīvju slīpumam jābūt tādā, lai nogulsnējušās daļiņas varētu brīvi slidēt uz leju. Parasti slīpums ir 30...50°; tas atbilst daļiņu dabiskajam nobiruma leņķim. Emulsiju (suspensiju) pievada vai nu pa ārējiem šķīvju galiem, vai arī pa caurumiem šķīvjos.

Pēc tehnoloģiskās nozīmes izšķir *dzidrināšanas, sadalīšanas un koncentrēšanas šķīvjuveida separatorus*.

Dzidrināšanas separatorus lieto tad, ja jānodala nēcīgi piemaisījuma daudzumi (līdz 0,1%). Šos separatorus bieži novieto aiz vairākkameru separatoriem. Dzidrināšanas separatorus lieto dažādu minerāleļļu, dieselkurināmā un citu līdzīgu sistēmu sadalīšanai.

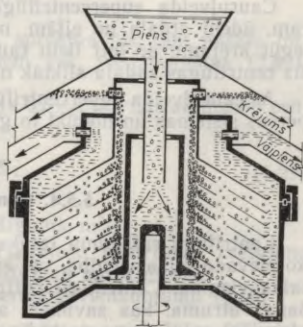
Sadalīšanas separatorus un koncentrēšanas separatorus lieto emulsiju sadalīšanai, piemēram, piena sadalīšanai, benzīna, augu eļļu, naftas un citu sistēmu sadalīšanai.

Viegli gaistošu vai ugunsnedrošu šķidrumu sadalīšanai lietojami *hermētiskie separatori*.

5.43. attēlā parādīts piena separators. Modernākos piena separatoros starp šķīvjiem ir līdz 0,4 mm atstarpe. Līdz ar to separatora lietderības koeficients sasniedz 0,7...0,8. Ja atstarpe starp šķīvjiem ir 0,6 mm, tad pienu nav iespējams apmierinoši sadalīt.

Cauruļveida supercentrifūgas. No atdales faktora $K_a = \frac{u^2}{gR}$ redzams: jo lielāks centrifūgas groza lineārais ātrums un mazāks tā rādiuss, jo suspensijas vai emulsijas ātrāk sadalās. Tas ievērots, izveidojot cauruļveida supercentrifūgas. Šajās centrifūgās, palielinot groza apgriezīgu skaitu no 14 000 apgr./min līdz 45 000 apgr./min un izveidojot maza diametra grozus — 45...150 mm, Zemes pievilcības spēku izdodas pārsniegt pat $5 \cdot 10^4$ reizi.

Cauruļveida supercentrifūgas uzbūve parādīta 5.44. attēlā. Tā sastāv no caurules 1, ko lieto par grozu. Grozs ietverts apvalkā 2. Grozu griež vārpsta 7, kas savienota ar elektrodzinēju, izmantojot skriemeli un siksnas pār vadu. Groza augšējā galā ir īpašs veidojums, kur pa kanāliem 3 un 4 frakcijas aizplūst uz uztvērējiem. Emulsijas blīvāko komponentu, kas virzās pa groza sienām uz augšu, savāc uztvērējs 5, bet mazāk blīvo savāc un aizvada uztvērējs 6.



5.43. att. Piena separatora shēma.

Nostādinošo centrifūgu ražīgums. Ievērojot apzīmējumus, kādi doti 5.45. attēlā, centrifūgas groza tilpumu var izteikt šādi:

$$V_g = \pi R^2 h.$$

Atdalāmās suspensijas tilpums (centrifūgas lietderīgais tilpums)

$$V_s = \pi (R^2 - r_0^2) h.$$

Suspensijas tilpumu centrifūgā var izteikt arī kā daļu no visa groza tilpuma:

$$V_s = k V_g = k \pi R^2 h,$$

kur k — groza pildījuma koeficients, parasti $0,4 \dots 0,5$.

Ja pieņem, ka $k=0,5$, tad

$$0,5 \pi R^2 h = \pi (R^2 - r_0^2) h \quad \text{jeb} \quad r_0 \approx 0,71 R.$$

Centrifugēšanas cikls $\Sigma \tau$ veidojas no šādiem laika posmiem:

$$\Sigma \tau = \tau_{\text{nog}} + \tau_p + \tau_b + \tau_{\text{iz}},$$

kur $\Sigma \tau$ — centrifugēšanas cikla laiks, s; τ_{nog} — nogulsnēšanas laiks, kas vienāds ar suspensijas sadalīšanas laiku, s; τ_p — centrifūgas palaišanas laiks, s; τ_b — centrifūgas bremsēšanas laiks, s; τ_{iz} — centrifūgas izlādes laiks, s.

Nostādinošā centrifūgā dispersās daļiņas pārvietošanās ceļa garums $R - r_0 = 0,29R$. Daļiņas nogulsnēšanai nepieciešamais laiks

$$\tau_{\text{nog}} = 0,29R / \omega_n.$$

Daļiņu nogulsnēšanās ātrumu ω_n aprēķina pēc tām pašām formulām, kādas lieto ciklonu aprēķiniem (sk. vienādojumus (2.82), (2.83)).

Ja vienā ciklā ar suspensiju aizpilda $0,5V_g$, tad nostādinošām centrifūgām ražīgums sekundē ir

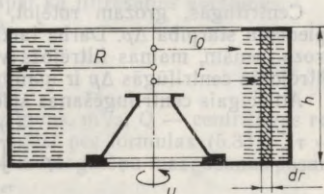
$$Q = \frac{0,5V_g}{\Sigma \tau}. \quad (5.29)$$

kur Q — nostādinošās centrifūgas ražīgums, m^3/s .

Filtrējošo centrifūgu ražīgums. Filtrējošo centrifūgu ražīgumu nosaka pēc metodes, ko lieto filtra ražīguma aprēķiniem.

Saskaņā ar filtrēšanas procesa diferencialvienādojumu (5.16)

$$(Q + Q_{\text{ekv}}) d(Q + Q_{\text{ekv}}) = \frac{\Delta p}{\mu R_n \chi} d(\tau + \tau_1). \quad (5.30)$$



5.45. att. Shēma centrifūgas jaudas un ražīguma aprēķiniem.

Centrifūgās, grozam rotējot, centrālās spēka ietekmē rodas spiedienu starpība Δp . Darba laikā, palielinoties nogulšņu slānim uz groza sienām, mainās filtrējošā virsma un centrālās spēks. Tādēļ filtrējošās centrifūgās Δp ir mainīgs lielums.

Attiecīgais centrifugēšanas spiediens

$$\Delta p = \int_{r_0}^R \frac{dF_c}{S},$$

kur Δp — centrifugēšanas spiediens, Pa; dF_c — centrālās spēka diferenciālis, t. i., centrālās spēks, kas darbojas uz bezgalīgi plānu nogulšņu kārtiņu dr attālumā r no centra (5.45. att.); dF_c nosaka šādi:

$$dF_c = dm\omega^2 r = 2\pi r dr h \rho_n \omega^2 r,$$

kur ω — leņķiskais ātrums, $2\pi n$, s^{-1} ; h — nogulšņu slāņa biezums, m.

Centrifūgās filtrējošā virsma attālumā r no centra ir

$$S = 2\pi r h.$$

Vienādojumā, kas izsaka spiedienu starpību Δp , ievietojot lielumus dF_c un S nozīmes, iegūst, ka

$$\Delta p = \omega^2 \rho_n \int_{r_0}^R r dr \quad \text{jeb}$$

$$\Delta p = \frac{\omega^2 \rho_n (R - r_0)^2}{2} = \frac{4\pi^2 n^2 \rho_n \delta^2}{2},$$

kur $R - r_0 = \delta$ ir nogulšņu slāņa biezums, m.

Pēc saīsināšanas iegūst, ka centrifugēšanas spiediens

$$\Delta p = 19,7 \rho_n \delta^2 n^2, \quad (5.31)$$

kur Δp — centrifugēšanas spiediens, Pa; ρ_n — nogulšņu blīvums, kg/m^3 ; δ — nogulšņu slāņa biezums, m; n — groza apgriezumu skaits sekundē, s^{-1} .

Ievietojot vienādojumā (5.30) Δp izteiksmi no formulas (5.31) un integrējot, iegūst, ka

$$(Q + Q_{ekv})^2 = \frac{19,7 \rho_n \delta^2 n^2}{\mu R_n X} (\tau + \tau_1). \quad (5.32)$$

Izmantojot apzīmējumu K_c :

$$K_c = \frac{19,7 \rho_n \delta^2 n^2}{\mu R_n X},$$

vienādojumu (5.32) iespējams pārrakstīt šādā veidā:

$$(Q + Q_{ekv})^2 = K_c \tau. \quad (5.33)$$

Konstantes Q_{ekv} un K_c iegūst tāpat kā filtrēšanas aprēķinos.
Filtrējošās centrifūgas ražīgums

$$Q_s = \frac{Q}{\Sigma\tau}, \quad (5.34)$$

kur Q_s — filtrējošās centrifūgas ražīgums, m^3/s ; Q — centrifūgas ražīgums vienā ciklā (laikā $\Sigma\tau$), ko iegūst pēc formulas (5.33); $\Sigma\tau$ — centrifūgēšanas cikla laiks, ieskaitot arī nogulšņu mazgāšanas posma laiku τ_m , s.

Centrifūgu ražīguma noteikšanai izstrādātas arī citas formulas, pēc kurām tomēr ražīgumu var noteikt tikai aptuveni.

Centrifūgu ražīgumu precīzāk var noteikt, pārbaudot to darba apstākļos vai arī laboratorijā nosakot attiecīgās konstantes Q_{ekv} un K_c .

5.5.5. Centrifūgu jaudas noteikšana

Periodiskas darbības centrifūgām nepieciešamā jauda. Periodiskas darbības centrifūgām centrifūgēšanas laikā nepieciešamā jauda mainās atkarībā no darba perioda. Maksimālais enerģijas patēriņš ir centrifūgas darbināšanas sākumā, kad jāpārvar groza un grozā ielietās suspensijas inerces, groza berze pret gaisu un centrifūgas vārpstas berze gultņos. Darba laikā jāpārvar tikai berze. Tādēļ jaudu nosaka centrifūgēšanas sākumam un pēc tās izvēlas dzinēja jaudu.

Lai groza materiālais punkts iegūtu leņķisko ātrumu ω , jāpatērē šāds darbs:

$$dA_g = dm \frac{\omega^2 R^2}{2}, \quad (5.35)$$

kur dm — punkta masa, kg; ω — leņķiskais ātrums, $2\pi n$, s^{-1} ; R — groza rādiuss, m.

Darbs, kas nepieciešams groza leņķiskā ātruma nodrošināšanai, ir

$$A_g = \frac{\omega^2 R^2}{2} \int dm = \frac{\omega^2 R^2}{2} m,$$

kur A_g — darbs centrifūgas groza iegriešanai, J; m — groza masa, kg.

Groza inerces pārvarēšanai nepieciešamā jauda

$$N_g = \frac{m\omega^2 R^2}{2g \cdot 1000\tau} \approx 2 \cdot 10^{-2} \frac{mR^2 n^2}{\tau}, \quad (5.36)$$

kur N_g — jauda groza inerces pārvarēšanai, kW; τ — laiks groza iegriešanai, līdz sasniegts vajadzīgais darba apgriezību skaits, s.

Darbs, kas jāpatērē grozā ielietās suspensijas leņķiskā ātruma nodrošināšanai, nosakāms pēc formulas (5.35).

Izdalot no suspensijas slāņa elementāru sloksnīti ar platumu dr , tās masa dm_s izsakāma šādi:

$$dm_s = h dr 2\pi r \rho$$

un darbs suspensijas leņķiskā ātruma nodrošināšanai

$$dA_s = \frac{h dr 2\pi r \rho \omega^2 r^2}{2} = \pi h \rho \omega^2 r^3 dr.$$

Integrējot šo vienādojumu robežās no r_0 līdz R , iegūst

$$A_s = \pi h \rho \omega^2 \int_{r_0}^R r^3 dr = \frac{\pi h \rho \omega^2}{4} (R^4 - r_0^4) \quad \text{jeb}$$

$$A_s = \frac{\pi (R^2 - r_0^2) \rho h}{4} (R^2 + r_0^2) \omega^2.$$

Izteiksme $\pi (R^2 - r_0^2) \rho h$ ir grozā iepildītā suspensijas gredzena masa m_s , tad darbs

$$A_s = \frac{m_s (R^2 + r_0^2) \omega^2}{4}. \quad (5.37)$$

Suspensijas inerces pārvarēšanai nepieciešamā jauda

$$N_s = \frac{A_s}{1000\tau\eta} = \frac{m_s (R^2 + r_0^2) \omega^2}{4 \cdot 1000\tau\eta},$$

kur η — koeficients, kas paredz papildu enerģijas patēriņu šķidruma pārvietošanai grozā, $\eta = 0,8$, jeb

$$N_s = \frac{m_s (R^2 + r_0^2) \cdot \pi^2 n^2}{4 \cdot 1000 \cdot 0,8\tau} \approx 3 \cdot 10^{-3} \frac{m_s (R^2 + r_0^2) n^2}{\tau}. \quad (5.38)$$

Kopējā jauda inerces pārvarēšanai

$$N_1 = N_g + N_s = 2 \cdot 10^{-2} \frac{mR^2 n^2}{\tau} + 3 \cdot 10^{-3} \frac{m_s (R^2 + r_0^2) n^2}{\tau} \quad \text{jeb}$$

$$N_1 = \frac{[2mR^2 + 3 \cdot 10^{-3} m_s (R^2 + r_0^2)] n^2}{1000\tau}. \quad (5.39)$$

Jauda, kas jāpatērē berzes pārvarēšanai gultņos, nosakāma šādi:

$$N'_b = \frac{\lambda m_k g u}{1000} \approx 10^{-2} \lambda m_k u, \quad (5.40)$$

kur N'_b — jauda berzes pārvarēšanai gultņos, kW; m_k — kopējā rotējošo daļu un suspensijas masa, kg; u — vārpstas lineārais ātrums, m/s; λ — berzes koeficients, slīdgultņiem $\lambda = 0,07 \dots 0,1$, lodīšgultņiem $\lambda = 0,03$; g — brīvās krišanas paātrinājums, m/s².

Jaudu pretestības pārvarēšanai, grozam rotējot gaisa vidē, nosaka pēc formulas

$$N''_b = 2,85 \cdot 10^{-4} h D^4 n^3, \quad (5.41)$$

kur N''_b — jauda pretestības pārvarēšanai, grozam rotējot gaisa vidē, kW; h — groza augstums, m; D — groza diametrs, m; n — apgriezienu skaits sekundē, s^{-1} .

Nepieciešamā jauda uz vārpstas centrifūģēšanas sākumā

$$N_v = N_1 + N'_b + N''_b. \quad (5.42)$$

Ja pārvada lietderības koeficients ir η_p , tad patērētā jauda

$$N = \frac{N_v}{\eta_p}.$$

kur N — patērētā jauda, kW.

Elektromotoru izvēlas ar 10...20% lielu jaudas rezervi, t. i.,

$$N_{dz} = (1,1 \dots 1,2) N.$$

Darba laikā jaudas patēriņš ir mazāks:

$$N_d = 0,25 N_s + N'_b + N''_b.$$

5.5.6. Hidrocikloni

Hidrociklonus lieto suspendēto daļiņu klasificēšanai pēc lieluma un suspensiju sabiezīšanai. Hidrocikloni darbojas tāpat kā cikloni (sk. 174. lpp.).

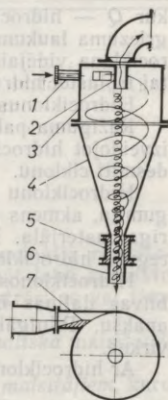
Hidrociklons (5.46. att.) sastāv no cilindriskās daļas 3 un koniskās daļas 4. Suspensiju pievada pa cauruli 1, kas cilindriskās daļas augšgalam piestiprināta tangenciāli. Šāda suspensijas pievadīšana, kas notiek ar virsspiedienu (plūsmas ātrums hidrociklonā 5...10 m/s), hidrociklonā suspensiju virza pa spirāli uz leju. Centrbēdzes spēka ietekmē suspensijas rupjākās daļiņas virzās gar aparāta sienām un sabiezinātas suspensijas veidā pa izvadcauruli 6 izkļūst no hidrociklona.

Plūsmas iekšējā daļa, nonākot līdz izvadcaurulei, pagriežas gar ciklona asi, spirālveidīgi ceļas uz augšu un, bagātināta ar sīkām daļiņām, izplūst pa uzgali 2.

Hidrociklona darbības efektivitāte atkarīga no tā diametra: ja diametrs ir mazāks, efektivitāte ir augstāka.

Hidrociklona ražīgumu var aprēķināt pēc šādas formulas:

$$Q = 6,7 \cdot 10^{-4} S \frac{r_1}{r_2} \sqrt{2gh},$$



5.46. att. Hidrociklona shēma.

kur Q — hidrociklona ražīgums, m^3/s ; S — pievadcaurules šķērs-griezuma laukums, m^2 ; r_1 — augšējā uzgaļa 2 rādiuss, m ; r_2 — hidrociklona vidējais rādiuss, m ; h — suspensijas celšanas augstums, tai iepļūstot hidrociklonā, m .

Hidrociklonus izgatavo ar 75... 600 mm diametru.

Ražīguma palielināšanai vairākus hidrociklonus savieno paralēli, izveidojot hidrociklonu bateriju. Vienā baterijā var būt pat vairāki desmiti ciklonu.

Hidrociklonu pasargāšanai no ātras nolietojšanās tos izoderē ar gumiju, akmens plāksnēm vai izgatavo no speciāla, pret berzi izturīga materiāla. Ievietojot citu uzgali 5 vai plāksnīti 7, iespējams regulēt hidrociklona darba režīmu.

Hidrociklonos var sašķirot daļiņas arī pēc to blīvuma: mazāk blīvas daļiņas izplūst pa ciklona augšu, blīvākās — pa konusa apakšu. Pilnīgākai suspensijas sadalīšanai hidrociklonus saslēdz virknē.

Ar hidrocikloniem nav iespējams iegūt tīru šķidro fāzi.

6. MAISIŠANA

6.1. MAISIŠANA ŠĶIDRĀ VIDĒ

Maisišanas procesa raksturojums. Ķīmijas tehnoloģijā maisīšanai ir liela nozīme. Tās pamatuzdevums — veicināt labu kontaktu starp dažādām fāzēm un iegūt viendabīgu (koncentrācijas vai temperatūras ziņā) vidi.

Maisīšana šķidrā vidē iedalās *mehāniskā, pneimatiskā* maisīšanā, maisīšanā *plūsmā* un *cirkulācijas* maisīšanā.

Mehānisko maisīšanu veic ar īpašām ierīcēm — *maisītājiem*, kuru galvenā sastāvdaļa ir īpašā tvertne vai tieši reakcijas aparātā ievietota vārpsta ar tai piestiprinātām lāpstiņām. *Pneimatiskā* maisīšanā cauri maisāmai videi barbotē gāzi (tvaiku). *Maisīšanu plūsmā* panāk, ievietojot maisāmās vides pārvietošanās joslā turbulizatorus. *Cirkulācijas* maisīšanu veic ar strūkļas sūkņiem vai centrālās sūkņiem.

Jebkuru maisišanas procesu var raksturot ar maisāmās vides dažādo fāžu sadalījuma vienmērīgumu maisāmā tilpumā. Nosakot dažādās brīvi izraudzītās vietās ņemto paraugu koncentrāciju ($C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$), var spriest par atsevišķo komponentu sadalījuma vienmērīgumu maisāmā vidē.

Ja viena komponenta vidējā koncentrācija visā tilpumā ir $C_0\%$ (pēc tilpuma), tad attiecīgā *komponenta relatīvais saturs n* paraugā nosakāms šādi:

$$\text{ja } C_0 > C_1, C_2 \text{ utt., tad } n_1 = \frac{C_1}{C_0} 100\%; n_2 = \frac{C_2}{C_0} 100\% \dots;$$

$$\text{ja } C_0 < C_1, C_2 \text{ utt., tad } n_1 = \frac{100 - C_1}{100 - C_0} 100\%; n_2 = \frac{100 - C_2}{100 - C_0} 100\% \dots$$

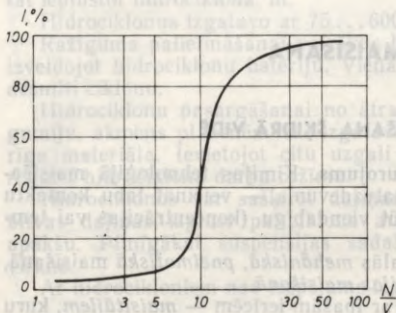
Ja ņemts x paraugu, visa tilpuma *maisīšanas intensitāti* raksturo izteiksme

$$I = \frac{n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_x}{x}$$

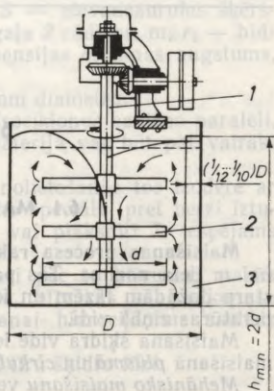
Jo vairāk maisīšanas intensitāte I tuvojas 100, jo intensīvāk notiek maisīšana.

Maisīšanas intensitāti siltuma procesos raksturo temperatūra maisāmās vides dažādās vietās. Lai noteiktu maisīšanas intensitāti, maisāmai videi pievieno radioaktīvos izotopus (jodu).

Maisīšanas efektivitāti raksturo ar maisāmā tilpuma intensitāti I , kuru sasniedz, patērējot attiecīgu darba jaudu uz maisāmās vides



6.1. att. Maisīšanas efektivitāte $I=f\left(\frac{N}{V}\right)$.



6.2. att. Lāpstiņu maisītāja shēma.

tilpuma vienību. No maisītājiem efektīvākais ir tas, ar kuru var iegūt vienmērīgāku maisījumu, patērējot mazāk enerģijas uz tilpuma vienību.

Ja visa tilpuma maisīšanas intensitāte I , maisīšanai patērētā darba jauda N , maisāmā šķidruma tilpums V , tad $\frac{N}{V}$ ir *ipatnējais jaudas patēriņš*. Maisīšanas efektivitāti izsaka ar šādu sakarību: $I=f\left(\frac{N}{V}\right)$. Šī funkcija parādīta 6.1. attēlā, no kura redzams, ka maisīšanas intensitāte strauji pieaug nelielā jaudas intervālā; tālāka jaudas palielināšana maisīšanas intensitāti I ietekmē maz. Maisītāja jauda jāizvēlas nedaudz lielāka par to, kas atbilst straujam maisīšanas intensitātes pieaugumam.

Mehānisko maisītāju galvenie veidi. Mehāniskos maisītājus iedala *lāpstiņu, propellerveida, turbīnveida* maisītājos un *speciālajos* maisītājos.

Lāpstiņu maisītāji. Šos maisītājus lieto mazviskozu ($(1 \dots 2) \cdot 10^{-2}$ Pa·s) šķidrumu maisīšanai, kā arī šķīdinot vai disperģējot cietas vielas ar mazu blīvumu. Konstruktīvā izveidojuma ziņā lāpstiņu maisītāji ir vienkārši.

Lāpstiņu maisītājs (6.2. att.) sastāv no vārpstas 1, uz kuras nostiprinātas lāpstiņas 2. Horizontālā plaknē ir 1...4 lāpstiņas, bet vertikālā plaknē — 1...5 lāpstiņas. Lāpstiņas pret horizontu novieto vertikāli vai slīpi. Lāpstiņu slīpums atkarīgs no cietās fāzes blīvuma. Ja jāuzduļķo vai jāmais suspensijas, kur cietās fāzes blīvums lielāks par šķidruma blīvumu, tad, lai varētu izveidot augšup kāpjošu plūsmu, lāpstiņas izgatavo ar slīpumu, kas lielāks par

90°, — un otrādi, ja cieta daļiņu blīvums ir mazāks par šķidrums blīvumu, lieto lāpstīņas ar slīpumu, kas mazāks par 90°.

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

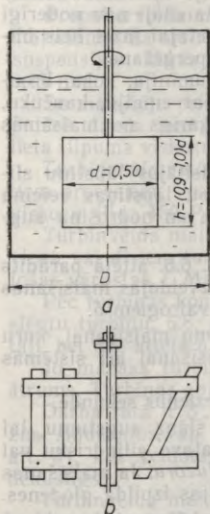
Lāpstīņu maisītājos vārpstas apgriezīnu skaits ir 0,3... 1,3 (pat līdz 6,6) apgriezīni sekundē. Palielinot apgriezīnu skaitu vēl vairāk, maisīšanas efektivitāte samazinās.

Intensīvai siltuma apmaiņai un maisīšanai vidēs šķidrums—šķidrums un šķidrums—cieta viela, ja šķidrās fāzes viskozitāte ir līdz $5 \cdot 10^{-2} \text{Pa} \cdot \text{s}$, lieto maisītājus ar platām lāpstīnām jeb *plākšņveida maisītājus* (6.3. att. a). Lineārais ātrums plākšņveida maisītājiem nepārsniedz 2,5 m/s.

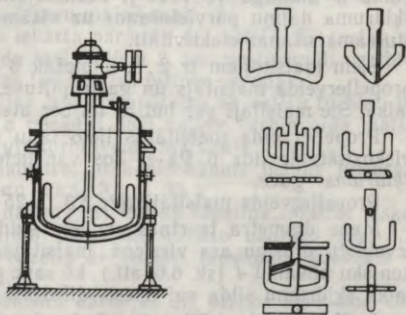
Maisot lielus šķidrums tilpumus vai arī viskozus šķidrums, nepietiek ar radiālu šķidrums kustību, bet jāpanāk arī kustība vārpstas virzienā. Tādēļ gar tvertnes sienām novieto *atsitiena vairogus* 3 (sk. 6.2. att.) vai arī lāpstīņas izvieto gan horizontāli, gan arī vertikāli vai slīpi, tādējādi iegūstot *rāmīveida maisītājus* (6.3. att. b).

Parasti ir četri atsitiena vairogi, un tos novieto vienu otram pretī. Ja tvertnes diametrs ir lielāks par 6 m, var izvietot 6 atsitiena vairogus. Maisot viskozus šķidrums vai šķīdinot cietas vielas, vairogus novieto slīpi. Vairogi samazina gaisa piltuvi, kas rodas maisot, un ievērojami palielina maisīšanas efektivitāti.

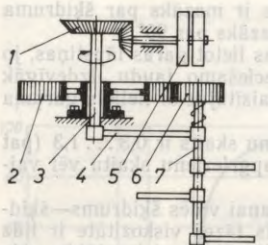
Nogulšņu pārvietošanai gar trauka sienām un siltuma apmaiņas veicināšanai izgatavo maisītājus, kuru ārējā kontūra atbilst tvertnes (reaktora) apakšējās daļas kontūrai. Tādus maisītājus sauc par *enkurveida maisītājiem*. Raksturīgākie enkurveida maisītāji parādīti 6.4. attēlā. Šos maisītājus lieto ļoti



6.3. att. Plākšņveida un rāmīveida maisītāju shēmas.



6.4. att. Enkurveida maisītāju shēmas.



6.5. att. Planetārā pārvada shēma.

viskozu ($10 \dots 200 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) šķidrumu maisīšanai. Jo viskozāks šķidrums, jo mazāks maisītāja apgriezību skaits. Enkurveida maisītāju lineārais ātrums ir $0,5 \dots 2 \text{ m/s}$. Atstarpe starp tvertnes sienām un maisītāju ir $0,05D$, kur D — tvertnes diametrs.

Ja ar lāpstiņu maisītājiem jāmaisā lieli ļoti viskozu (līdz $200 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) šķidrumu tilpumi, lieto planetāro pārvadu (6.5. att.). Maisītājs ar planetāro pārvadu rotē ap vārpstu 3 un vārpstu 7. No siksnas pārvada 5 ar zobratu pārvadu 1 vārpsta 3 iegūst rotācijas kustību. Šo kustību ar stieni 4 pārnes uz

maisītāju. Maisītāja zobrats 6 ir sazobē ar stacionāru zobratu 2, tādēļ tas griež maisītāju arī ap savu asi.

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

So maisītāju trūkumi: ja nav atsītienu vairogu, maisīšanas laikā maisītāji rada dziļu gaisa piltuvi un iespējama (ja šķidrums viskozi) maisāmās masas griešanās līdzī maisītājiem. Maisītāji nav noderīgi viegli atslāpojamu suspensiju maisīšanai (ja cietajai fāzei liels blīvums), ne arī ātrai šķīdināšanai un smalkai disperģēšanai.

Maisītājus izgatavo no tērauda, čuguna, alumīnija, koka, bronzas, speciāliem sakausējumiem vai arī pārklāj ar emalju, kaučuku, svīnu, viniplastu u. c. Maisītāja materiāls atkarīgs no maisāmās vides īpašībām.

Propellerveida maisītāji. Propellerveida maisītājos lāpstiņu slīpums ir mainīgs ($0 \dots 90^\circ$). Maisītājam rotējot, lāpstiņas veicina šķidruma daļiņu pārvietošanos uz visām pusēm un nodrošina augstu samaisīšanas efektivitāti.

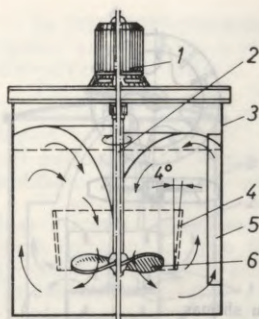
Siem maisītājiem ir 2...4, biežāk 3 spāri. 6.6. attēlā parādīts propellerveida maisītājs un gaisa piltuve, kas izveidojas maisīšanas laikā. Šie maisītāji var būt ar un bez atsītienu vairogiem 5.

Propellerveida maisītājus lieto tādu šķidrumu maisīšanai, kuru viskozitāte ir līdz $6 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Tos var lietot maisīšanai arī sistēmās šķidrums—gāze.

Propellerveida maisītāji veic 3,3...25 apgriezienus sekundē.

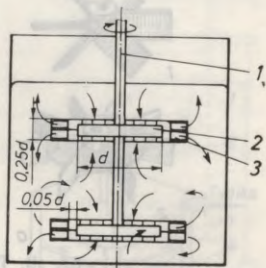
Maza diametra tvertnēs ar lielu šķidruma slāņa augstumu, lai izveidotu plūsmu ass virzienā, maisītājam izgatavo cilindrisku vai konisku apvalku 4 (sk. 6.6. att.), ko sauc par difuzoru. Ja maisīšanas laikā šķidrumu silda vai dzesē, difuzora funkcijas izpilda glodenes.

Ja šķidrums ir grūti samaisāmi vai arī ja maisīšanu izdara biežā slānī, uz vienas vārpstas dažādos līmeņos izvieto divus maisītājus. Liela tilpuma maisīšanai maisītāju novieto slīpi ($10 \dots 20^\circ$ leņķī



6.6. att. Propellerveida maisītāja iekārtas shēma:

1 — elektromotors, 2 — vārpsta, 3 — tvertne, 4 — difuzors, 5 — atslītiņa valrogs, 6 — propellerveida maisītājs.



6.7. att. Turbīnveida maisīšanas iekārta ar divām turbīnām.

pret horizontu), līdz ar to samazinot gaisa piltuvi, kas rodas maisīšanas laikā.

Propellerveida maisītājus ieteicams lietot mazviskozu šķidrumu maisīšanai, kā arī iegūstot emulsijas tilpumos līdz $4,5 \text{ m}^3$, uzduļķojot suspensijas, kurās cietā fāze ir līdz 10% un daļiņu izmēri līdz $0,15 \text{ mm}$.

So maisītāju priekšrocības: tie vienkārši izgatavojami, lēti un nepatērē daudz enerģijas. To trūkumi: mazefektīvi, tos nevar lietot liela tilpuma viskozu šķidrumu maisīšanai.

Turbīnveida maisītāji. Turbīnveida maisītāji piemēroti nepārtrauktiem procesiem. Tos efektīvi var izmantot kā mazviskozu, tā arī ļoti viskozu (līdz $450 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) šķidrumu maisīšanai.

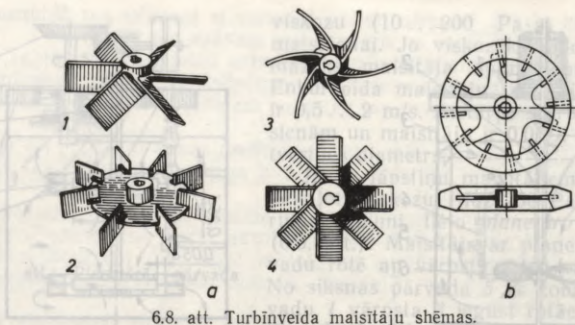
Turbīnveida maisīšanas iekārta parādīta 6.7. attēlā. Tā sastāv no viena vai diviem turbīnveida maisītājiem 2, kas uzstiprināti uz rotējošas vārpstas 1. Maisīšanas laikā gaisa piltuve nerodas.

Pēc turbīnas konstrukcijas izšķir maisītājus ar vaļēju turbīnu un slēgtu turbīnu. 6.8. attēlā a parādīti daži vaļējie turbīnveida maisītāji, bet 6.8. attēlā b — slēgts turbīnveida maisītājs.

Jo mazāks turbīnas diametrs, jo nepieciešams lielāks lineārais ātrums. Turbīnas apgriezienu skaits $3,3 \dots 33 \text{ s}^{-1}$.

Darba ratā ir $3 \dots 16$, dažreiz arī vairāk lāpstiņu. Maisot viskozus šķidrumus, ap slēgtajām turbīnām novieto vadratu (sk. 6.7. att. 3), kas veidots no gredzena ar slīpām lāpstiņām (vadrats ir nekustīgs).

Turbīnveida maisītāji teicami darbojas arī plānos šķidruma slāņos un suspensijās ar šķiedrainu cieto fāzi (6.8. att. a turbīna 4), kuras koncentrācija var sasniegt 5%. Šie maisītāji lietojami arī sistēmām šķidrums—gāze.



6.8. att. Turbīnveida maisītāju shēmas.

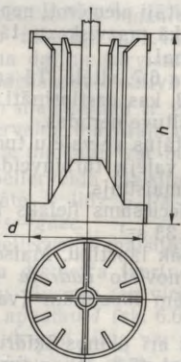
Turbīnveida maisītāju pozitīvās īpašības: neliels enerģijas patēriņš un augsta maisīšanas efektivitāte; maisīšanu var veikt lielos tilpumos, kur cieto daļiņu izmēri līdz 25 mm un koncentrācija līdz 60%; maisīšana iespējama stipri viskozos šķidrumsos.

Sie maisītāji grūti izgatavojami un dārgi.

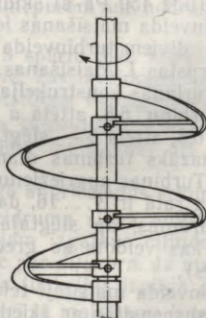
Speciālie maisītāji. Pie speciāliem maisītājiem pieder *cilindriskie, lentes, diskeida un šķīvjuveida* maisītāji.

Cilindriskie maisītāji. Šos maisītājus lieto emulsiju un suspensiju (ar lielu cietās fāzes koncentrāciju) pagatavošanai, kā arī sistēmām *šķidrums—gāze*.

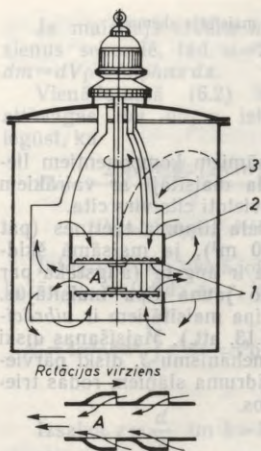
Cilindriskais maisītājs parādīts 6.9. attēlā. Lai maisīšana būtu efektīva, cilindrisko maisītāju izgatavo šādās attiecībās: $d:h=2:3$ un $d:D=1:4 \dots 1:6$, kur D — tvertnes diametrs. Jāievēro arī, lai



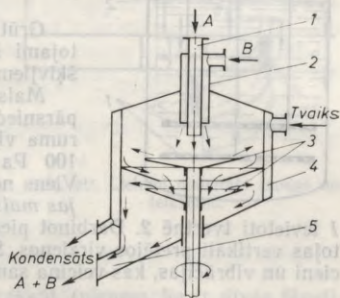
6.9. att. Cilindriskā maisītāja shēma.



6.10. att. Lentes maisītāja shēma.



6.11. att. Diskveida maisītāja shēma.



6.12. att. Šķīvjeida maisītāja shēma.

būtu vajadzīgais šķidruma slāņa biezums. Iegūstot emulsijas un suspensijas, $H=10d$, kur H — šķidruma dziļums tvertnē. Maisot sistēmas šķidrums—gāze, jāievēro, lai $H>10d$. Šie maisītāji labi uzjauc nogulsnes, ja pat vairāk nekā puse no maisītāja atrodas nogulsnēs. Maisītājs jānovieto nelielā attālumā no tvertnes dibena.

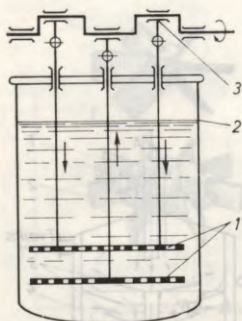
Lentes maisītāji. Lentes maisītājus lieto tad, ja jāmaisā ļoti viskozi šķidrumi, pie tam tie atbrīvo reaktora iekšējo virsmu no nogulsnēm vai arī izjauc robežkārtu, tādējādi veicinot siltuma apmaiņas procesu. Šāds maisītājs parādīts 6.10. attēlā.

Diskveida maisītāji. Diskveida maisītājus lieto, ja jāsamaisa divi šķidrumi ar stipri atšķirīgu blīvumu.

Diskveida maisītājs (6.11. att.), rotējot diviem diskiem 1 ar izcilņiem, rada pretēji virzītas šķidruma plūsmas, kas ar lielu ātrumu telpā A triecas viena pret otru. Cirkulāciju regulē gredzeni 2. Vairogi 3 paredzēti, lai šķidrums nesāktu rotēt kopā ar maisītāju.

Šķīvjeida maisītāji. Šķīvjeida maisītājos (6.12. att.) samaisīšanai paredzētos komponentus pievada pa caurulēm 1 un 2. Šķidrumi plūst uz šķīvjiem 3, kas rotē un triec šķidrumus pret apvalka malām. Maisījums, plūstot plānā slānī, iztek pa izvadu 5. Sildīšanai vai dzesēšanai paredzēts apvalks 4.

Šķīvjeida maisītāju priekšrocība ir tā, ka maisīšanas process ir nepārtraukts. Sajos maisītājos ir laba siltuma apmaiņa. Šķīvjeida maisītājus iespējams lietot mazviskozu šķidrumu samaisīšanai ar ļoti viskozu šķidrumu vai biezu pastu. Šādos gadījumos īpašs gliemežtransportieris pastu ievada maisītājā.



6.13. att. Vibrācijas maisītāja shēma.

Grūti samaisāmiem komponentiem lietojami šķīvjuveida maisītāji ar vairākiem šķīvjiem, kas novietoti cits virs cita.

Maisīšanai liela tilpuma tvertnēs (pat pārsniedzot 1000 m³), ja maisāmā šķidrums viskozitāte ir augsta (augstāka par 100 Pa·s), lieto jauna tipa maisītājus. Viens no šāda tipa maisītājiem ir *vibrācijas maisītājs* (6.13. att.). Maisīšanas diski

1 ievietoti tvertnē 2. Darbinot piedziņas mehānismu 3, diski pārvietojas vertikāli pretējos virzienos. Starp šķidruma slāņiem rodas triecieni un vibrācijas, kas veicina samaisīšanos.

6.2. MEHĀNISKO MAISĪTĀJU DARBINĀŠANAS JAUDA

Maisīšanai nepieciešamo jaudu iedala *iedarbināšanas jaudā* N_p un *darba jaudā* N_d .

Iedarbināšanas jaudas un darba jaudas noteikšana. Iedarbināšanas jauda maisītājiem summējas no divām daļām:

1) *jauda inerces pārvarēšanai* N_i (tā nepieciešama, lai maisāmai videi nodrošinātu attiecīgo ātrumu) un

2) *jauda maisītāja berzes pārvarēšanai, kas vienāda ar darba jaudu* N_d , t. i.,

$$N_p = N_i + N_d. \quad (6.1)$$

Jauda inerces pārvarēšanai. Šīs jaudas noteikšanai maisītājam attālumā x no centra (6.14. att.) izdala ļoti šauru joslu dx , kuras virsma dS . Jauda, ko šī virsma pārnes uz šķidrums masu, nodrošinot tai ātrumu u (vienāds ar virsmas lineāro ātrumu), izsakāma ar to kinētisko enerģiju, kas piemīt šķidrums masai dm , kustoties ar ātrumu u , t. i.,

$$dN_i = \frac{dm u^2}{2}. \quad (6.2)$$

Virsmas dS , rotējot vienu sekundi, nodrošina ātrumu u šādam šķidrums tilpumam (pieņem, ka šķidrums kustība notiek tikai lāpstiņu līmenī, t. i., augstumā h):

$$dV = dS u,$$

kur u ir virsmas dS pārvietošanās attālumš sekundē (ātrums).

Ja maisītājs izdara n apgriezienus sekundē, tad $u = 2\pi xn$ un $dm = dV\rho = 2\pi\rho h n x dx$.

Vienādojumā (6.2) ievietojot attiecīgās dm un u izteiksmes, iegūst, ka

$$dN_1 = \frac{2\pi\rho h n x dx (2\pi x n)^2}{2};$$

$$dN_1 = 2^2 \pi^3 \rho h n^3 x^3 dx.$$

Integrējot šo vienādojumu robežās no $x=0$ līdz $x=r$, iegūst

$$N_1 = 4\pi^3 \rho h n^3 \int_0^r x^3 dx = \pi^3 \rho h n^3 r^4. \quad (6.3)$$

Izsakot $r = \frac{d}{2}$ un $h = kd$, var rakstīt (pieņem, ka ir divas lāpstiņas):

$$N_1 \approx 1,94 k \rho n^3 d^5.$$

Apzīmējot reizinājumu $1,94k = a$, iegūst galīgā veidā jaudas vienādojumu inerces pārvarēšanai:

$$N_1 = a \rho n^3 d^5, \quad (6.4)$$

kur N_1 — jauda inerces pārvarēšanai, W; ρ — maisāmās vides blīvums, kg/m³; n — vārpstas apgriezienu skaits, s⁻¹; d — maisītāja diametrs, m.

Zinot attiecīgā maisītāja koeficienta a skaitlisko vērtību, pēc formulas (6.4) nosaka jaudu inerces pārvarēšanai jebkuram maisītājam.

Jauda maisītāja berzes pārvarēšanai (darba jauda). Eksperimentāli pierādīts, ka maisītāja berzes pārvarēšanai nepieciešamā jauda atkarīga no vides dinamiskās viskozitātes μ , blīvuma ρ , maisītāja apgriezienu skaita n un iekārtas ģeometriskajiem izmēriem (maisītāja izmēri, tvertnes izmēri u. c.).

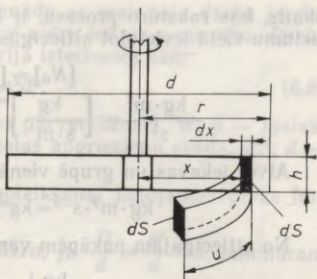
Pieņemot par noteicošo ģeometrisko izmēru maisītāja diametru, pārējos izmērus var izteikt kā daļu no diametra. Tad jaudu berzes pārvarēšanai var uzrakstīt kā šādu funkcionālu sakarību:¹

$$N_d = f(\rho, \mu, n, d) \quad \text{jeb} \quad N_d = C \mu^m \rho^a n^b d^c. \quad (6.5)$$

Lietojot dimensiju analīzes metodi (π teorēmu), šo funkciju iespējams viegli atrisināt.

Vienādojumā (6.5) ir pieci fizikālie lielumi (N_d , ρ , μ , n , d), kas izsakāmi ar trīs vienībām (kg, m, s), tātad pēc π teorēmas kritēriju

¹ Maisītājam nepieciešamo jaudu berzes pārvarēšanai iespējams noteikt arī, lietojot Ņūtona pretestības formulu (sk. 82. lpp.).



6.14. att. Lielumi maisītāja jaudas noteikšanai.

skaitis, kas raksturo procesu, ir $5-3=2$. Vienādojumā (6.5) fizikālo lielumu vietā ievietojot attiecīgās vienības, iegūst

$$[N_d] = [C\mu^m\rho^a n^b d^c]$$

$$\frac{\text{kg}\cdot\text{m}^2}{\text{s}^3} = \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}\cdot\text{m}}\right]^m \cdot \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]^a \cdot [\text{s}^{-1}]^b \cdot [\text{m}]^c.$$

Atver iekavas un grupē vienādās vienības:

$$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3} = \text{kg}^{m+a}\cdot\text{m}^{-m-3a+c}\cdot\text{s}^{-m-b}.$$

No attiecīgajām pakāpēm var sastādīt šādu vienādojumu sistēmu:

$$\begin{array}{l|l} \text{kg} & m+a=1 \\ \text{m} & -m-3a+c=2 \\ \text{s} & -m-b=-3 \end{array}$$

Visus šā vienādojuma locekļus izsaka ar m , tad

$$a=1-m; \quad b=3-m \quad \text{un} \quad c=5-2m.$$

Vienādojumu (6.5) var uzrakstīt šādi:

$$N_d = C\mu^m\rho^{1-m}n^{3-m}d^{5-2m} \quad \text{jeb} \quad N_d = C\mu^m\rho^{-m}n^3n^{-m}d^5d^{-2m}.$$

Tālāk iespējams šādi sagrupēt

$$N_d = C\rho n^3 d^5 \left(\frac{\mu}{n\rho d^2}\right)^m \quad \text{jeb}$$

$$\frac{N_d}{\rho n^3 d^5} = C \left(\frac{n\rho d^2}{\mu}\right)^{-m}. \quad (6.6)$$

Bezdimensionālo kompleksu $\frac{N_d}{\rho n^3 d^5}$ sauc par *jaudas kritēriju* un apzīmē ar K_N . Izteiksme $\frac{n\rho d^2}{\mu}$ ir Reynoldsa kritērijs maisītājiem, un to apzīmē ar Re_c . Šo kritēriju iegūst no parastā hidrodinamikā lietojamā Reynoldsa kritērija $Re = \frac{d\omega\rho}{\mu}$, ātruma ω vietā ievietojot maisītāja lineāro ātrumu, t. i., $\omega = \pi dn$, un atmetot π kā konstantu lielumu,

$$Re_c = \frac{n\rho d^2}{\mu}.$$

Maisītāja jaudas kritērija formula berzes pārvarēšanai ir

$$K_N = \frac{C}{Re_c^m}. \quad (6.7)$$

Konstante C un pakāpe m iegūstama eksperimentāli.

Jauda berzes pārvarēšanai ir vienāda ar maisītāja darba jaudu, jo darba posmā maisītājs pārvar tikai vides berzes pretestību. Darba jaudu var aprēķināt no jaudas kritērija izteiksmes šādi:

$$N_d = K_N \rho n^3 d^5, \quad (6.8)$$

kur N_d — darba jauda (jauda berzes pārvarēšanai), W; ρ — maisāmās vides blīvums, kg/m³; n — vārpstas apgriezienu skaits, s⁻¹; d — maisītāja diametrs, m.

Tātad maisītāja darba jaudas noteikšanai lietojamas divas formulas (6.6) un (6.8).

Maisītājiem ar trīsspārnu propelleru, ja $\frac{D}{d} = \frac{H}{d} = 3$, lamināram darbības režīmam ($Re_c < 50$)

$$K_N = 230 Re_c^{-1,67}$$

turbulentam darbības režīmam ($Re_c > 50$)

$$K_N = 0,845 Re_c^{-0,05}.$$

No šīm formulām aprēķina darba posma nepieciešamo jaudu lamināram režīmam

$$N_d = 230 \rho^{-0,67} \mu^{1,67} n^{1,33} d^{1,66}, \quad (6.9)$$

turbulentam režīmam

$$N_d = 0,845 \rho^{0,95} \mu^{0,05} n^{2,95} d^{4,9}. \quad (6.10)$$

Salīdzinot vienādojumus (6.9) un (6.10), redzams, ka turbulentajā režīmā vides viskozitātei ir ļoti niecīga nozīme, turpretī laminārajā režīmā tai ir izšķiroša nozīme.

Ja $Re_c > 10^5$, tad jaudas kritērijs K_N vairs nav atkarīgs no Re_c . Tas izskaidrojams tādējādi, ka inerces spēki pieaug proporcionāli ātrūmam kvadrātā, bet viskozitātes ietekme — proporcionāli ātrūmam pirmajā pakāpē.

6.15. attēlā dots grafisks attēlojums sakarībai $K_N = f(Re_c)$, kas atvieglo darba jaudas noteikšanu ģeometriski līdzīgiem maisītājiem. Zinot vajadzīgo jaudu inerces un berzes pārvarēšanai (formulas (6.4) un (6.8)), maisītāja iedarbināšanas jauda, ievērojot formulu (6.1), ir šāda:

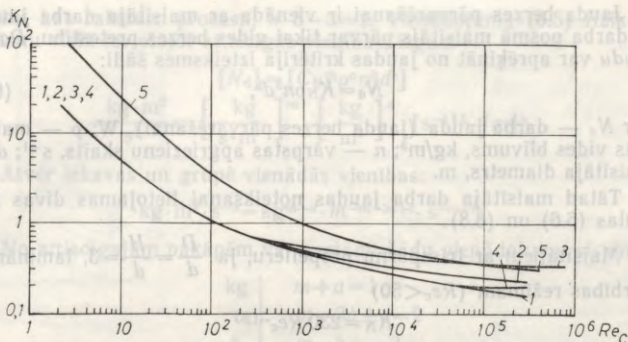
$$N_p = K_N \rho n^3 d^5 + a \rho n^3 d^5 = (K_N + a) \rho n^3 d^5. \quad (6.11)$$

Iedarbināšanas jaudas un darba jaudas attiecība ir

$$\frac{N_p}{N_d} = \frac{(K_N + a) \rho n^3 d^5}{K_N \rho n^3 d^5} \quad \text{jeb} \quad N_p = \frac{K_N + a}{K_N} N_d,$$

t. i., iedarbināšanas jauda ir $K_N + a/K_N$ reizi lielāka par darba jaudu.

Dažu faktoru ietekme uz maisītāja jaudas vērtību. Ja lāpstiņu maisītājiem $D/d = 2,5 \dots 4$; $H/D = 0,6 \dots 1,6$; $h/d = 0,2 \dots 0,33$, tad pēc formulas (6.8) iegūtā jauda jāpareizina ar koeficientu $f = (D/3d)^{1,1} \times (H/D)^{0,6} (4h/d)^{0,3}$; enkurveida un lāpstiņu maisītājiem ar sešām



6.15. att. Sakarības $K_N = f(Re_c)$ grafiks gludām tvertnēm.

lāpstiņām $f = (D/1,11d)^{1,1} (H/D)^{0,6} (15h/d)^{0,3}$; propellerveida un turbīn-
veida maisītājiem $f = (D/3d)^{0,93} (H/D)^{0,6}$.

Maisīšanai nepieciešamo enerģiju ievērojami palielina dažādi papildu iekārtojumi tvertnē, piemēram, atsietena vairogi, glodenes, termometra caurules u. c. Termometra caurule, kas iegremdēta maisāmajā šķidrumā, var palielināt jaudu pat par 10%, t. i., $f_1 = 1,1$. Tvertnē ievietota glodene var radīt jaudas pieaugumu divas un pat vairākas reizes: $f_2 = 2 \dots 3$. Tvertnes sienīņu raupjums var palielināt jaudu par 10...20%, t. i., $f_3 = 1,1 \dots 1,2$.

Tvertnēs ar plakanu dibenu enerģijas patēriņš ir lielāks nekā tvertnēs ar izliektu dibenu, pie tam tas samazinās, pieaugot šķidruma slāņa augstumam. Novietojot uz vienas vārpstas divus propellerveida maisītājus, enerģijas patēriņš pieaug aptuveni 1,5 reizes.

Atkarībā no lāpstiņu veida pēc formulas (6.8) aprēķinātā jauda jāreizina ar šādu koeficientu: plakanām lāpstiņām — 1, ovalām — 0,65, apaļām — 0,45, ieliektām un izliektām — 0,85.

Maisīšanai nepieciešamo dzinēja jaudu aprēķina šādi:

$$N_{dz} = 1,3 N_d f_1 f_2 f_3 \dots / (1000 \eta),$$

kur N_{dz} — dzinēja jauda, kW; N_d — darba jauda, W; η — pārvada lietderības koeficients, $\eta = 0,8 \dots 0,85$.

Parasti maisītājiem uzstāda asinhronos elektromotorus ar gredzenveida kontaktiem, kas, ieslēdzot rotorā papildu pretstību, pieļauj īslaicīgu pārslodzi (200...300%).

6.3. PNEIMATISKĀ MAISIŠANA

Pneimatiskā maisīšana ir vienkāršs maisīšanas paņēmieni, kas pamatojas uz gāzes (gaisa, tvaika) barbotēšanu cauri maisāmajam slānim. Pneimatiski maisa mazviskozus šķidrumus vai suspensijas.

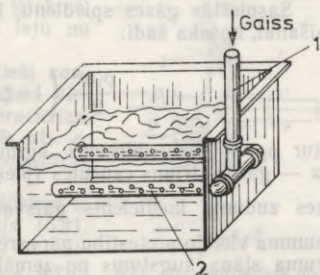
Šī metode ir efektīva agresīvu šķidrumu maisīšanai, jo mehāniskie maisītāji ātri korodē.

Jāatceras, ka, pneimatiski maisot, ar gaisu aiznes šķidrumu tvaika un pilienu veidā, tādēļ viegli gaistošu šķidrumu maisīšanai šis paņēmiens nav visai piemērots. Maisot ar gaisu, maisāmā vide var oksidēties.

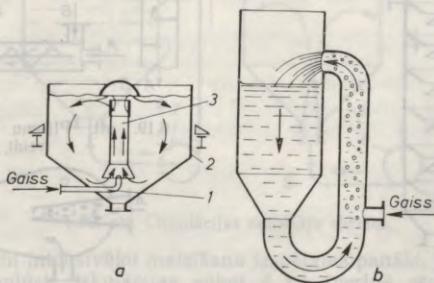
Pneimatiskā maisīšana saistīta ar lielāku enerģijas patēriņu nekā maisīšana ar mehāniskajiem maisītājiem.

Pneimatiskais maisītājs parādīts 6.16. attēlā. Pa cauruli 1 pievada saspiestu gāzi. Tā ieplūst horizontālās, caurumotās caurulēs 2, no kurienes pa caurumiem burbuļo cauri šķidruma slānim, samaisot to. Lai gāzi vienmērīgi sadalītu pa visu tvertnes šķērsriezumu, caurulēm 2 jābūt pilnīgi horizontālām un caurumi nedrīkst būt aizsērējuši. Caurumu diametrs ir 3...6 mm. Lai šķidrums labāk samaisītos un zudumi būtu pēc iespējas mazāki, caurumi ieurbti pa vītņveida līniju. Pneimatiskajos maisītājos cauruļu vietā var būt kupols ar robotām malām, kas veicina gāzes sadalīšanos burbuļos.

Sīkgraudaina materiāla maisīšanai šķidrumā dažreiz izmanto gaisa lifta principu (6.17. att.). Pa cauruli 1 ievada saspiestu gaisu caurulē 3, kas atrodas tvertnes 2 centrā (6.17. att. a). Tā rezultātā rodas blīvumu starpība starp vidi, kas atrodas tvertnē, un vidi, kas atrodas centrālajā caurulē, tādēļ šķidruma masa pārvietojas ar bulbām norādītajā virzienā. Tas pats notiek maisītājos ar ārējo cirkulācijas cauruli (6.17. att. b).



6.16. att. Pneimatiskā maisītāja shēma.



6.17. att. Maisītāju shēmas:

a — ar gaisa liftu, b — ar ārējo cirkulācijas cauruli.

Saspiestās gāzes spiedienu, kas nepieciešams pneimatiskai maisīšanai, nosaka šādi:

$$p = \frac{\rho_1 \omega^2}{2} \left(1 + \zeta_b + \sum_1^n \zeta_{vp} \right) + \rho_2 g H,$$

kur ρ_1 — gāzes blīvums, kg/m^3 ; ρ_2 — šķidruma blīvums, kg/m^3 ; ω — gāzes ātrums caurulēs (pieņem, ka $\omega = 20 \dots 40 \text{ m/s}$); ζ_b — berzes zudumu koeficients gaisvadam; $\sum_1^n \zeta_{vp}$ — zudumu koeficientu summa vietējo pretestību pārvarēšanai gaisvadā; H — maisāmā šķidruma slāņa augstums no zemākās gāzes ieplūdes vietas, m; g — brīvās krišanas paātrinājums, m/s^2 .

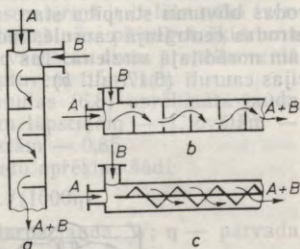
Pievadāmās gāzes tilpums atkarīgs no maisīšanas intensitātes. Pieņem, ka uz katru kvadrātmetru maisāmās masas virsmas minūtē tas ir šāds: viegli maisot, — 0,4; vidēji stipri maisot, — 0,8 un, intensīvi maisot, — $1,0 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{min}$.

6.4. MAISIŠANA PLŪSMĀ

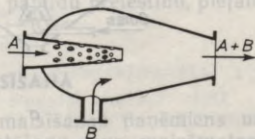
Maisīšana plūsmā notiek maisītājos, kuros, šķidrumiem plūstot vertikāli no augšas uz leju vai horizontāli, plūsma maina virzienus un ātrumus, pārvarot plūsmā ievietotus šķēršļus (turbulizatorus). Maisīšana plūsmā notiek, izmantojot *stacionārus* vai *kustīgus turbulizatorus*. Viens no šādiem maisītājiem ir *gravitācijas maisītājs*, kurā



6.18. att. Gravitācijas maisītāja shēma.



6.19. att. Plūsmu turbulizēšanas veidi.

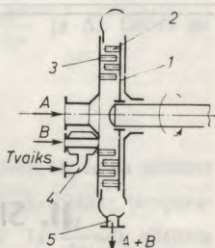


6.20. att. Ežektorveida maisītāja shēma.

maisīšana notiek smaguma spēka ietekmē, plūsmai pārvietojoties vertikāli uz leju no šķēršļa uz šķērslī (6.18. att.).

Maisīšanu plūsmā realizē arī tieši *caurulēs*, ievietojot tajās šķēršļus plūsmas virziena maiņai. Šķēršļus veido šķērssienu, diafragmas, vītņveida virsmas (6.19. att. a, b, c). Lieto arī *ežektorveida maisītājus* (6.20. att.).

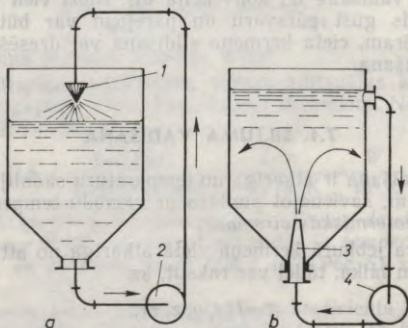
Maisītājs ar kustīgiem turbulizatoriem ir *centrbēdzes dismembratora maisītājs* (6.21. att.). Tas sastāv no rotējoša diska *1* ar vairākām izciļņu rindām. Diska izciļņi *2* ievirzīti starp izciļņiem, kas izveidoti vākā *3*. Komponentu *B* pirms samaisīšanas iespējams uzsildīt, lietojot tvaika apvalku *4*. Samaisāmie komponenti saņem triecienus no izciļņiem un nokļūst tiešā kontaktā. Pa izvadu *5* izplūst viendabīgs maisījums.



6.21. att. Centrbēdzes dismembratora maisītāja shēma.

6.5. CIRKULĀCIJAS MAISIŠANA

Cirkulācijas maisīšanu lieto liela tilpuma aparātos, ja ir jāmaisā atšķirīga blīvuma komponenti. Maisīšanu veicina cirkulācijas sūknis *2*, kurš maisāmo šķidrumu iesūc un pārvieto uz tvertnes augšu, kur caur izsmidzinātāju *1* sadalītā šķidruma strūkļa triecas pret šķidruma līmeni tvertnē (6.22. att. a).



6.22. att. Cirkulācijas maisītāju shēmas.

Ievērojami intensīvāku maisīšanu iespējams panākt, ja maisāmais šķidrums ieplūst cirkulācijas sūknī *4* no tvertnē esošā šķidruma līmeņa un caur ežektoru *3* šķidruma strūkļu no tvertnes apakšas ievada maisāmā šķidrumā (6.22. att. b).

II. SILTUMA PROCESI

7. SILTUMA APMAIŅA

Ķīmijas tehnoloģijā siltuma enerģija ir viens no galvenajiem enerģijas veidiem. Dažās rūpniecības nozarēs (metallurgijā, cementa, keramikas rūpniecībā u. c.) patērē ļoti daudz siltuma enerģijas. Daudzu tehnoloģisko procesu pamatā ir siltuma procesi, piemēram, ietvaicēšana, žāvēšana, pārtvaice, dzesēšana u. c. Lai varētu realizēt šos siltuma procesus, jāzina siltuma apmaiņas likumi.

Siltuma apmaiņai ir trīs veidi: siltuma *vadišana*, siltuma *starošana* un *konvekcija*.

Praksē reti kad sastopas ar vienu atsevišķu siltuma apmaiņas veidu. Parasti tie ir dažādās kombinācijās, piemēram, konvekcija un starošana; vadišana un konvekcija utt. Bieži vien viens siltuma apmaiņas veids gūst pārsvaru un pārējiem var būt ļoti niecīga ietekme. Piemēram, cieta ķermeņa sildīšanā vai dzesēšanā pārsvarā ir siltuma vadišana.

7.1. SILTUMA VADĪŠANA

Siltuma vadišana ir atkarīga no temperatūru sadalījuma ķermenī. Jebkurā ķermenī, savienojot punktus ar vienādu temperatūru, iegūst tā saucamās *izotermiskās virsmas*.

Temperatūra jebkurā ķermeņa vietā atkarīga no attiecīgā punkta koordinātām un laika, tādēļ var rakstīt, ka

$$t = f(x, y, z, \tau). \quad (7.1)$$

Tā temperatūra mainās tad, ja *siltuma plūsma ir nestacionāra*. Ja *siltuma plūsma ir stacionāra*, temperatūra ir funkcija tikai no koordinātām, t. i., $t = f(x, y, z)$, bet nemainās atkarībā no laika.

Viskrasāk temperatūra mainās perpendikulāri izotermiskām virsmām. Apzīmējot attālumu starp divām blakus esošām izotermiskām virsmām ar Δx (perpendikulāri pret šīm virsmām) un temperatūru

starpību ar Δt , robežlielumu, uz kuru tiecas $\frac{\Delta t}{\Delta x}$, ja Δx tiecas uz nulli, sauc par *temperatūras gradientu*, t. i.,

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta x} = - \frac{dt}{dx}.$$

Temperatūras gradients $\frac{dt}{dx}$ vienmēr ir *negatīvs*, tāpēc ka siltums izplatās no augstākas temperatūras uz zemāku. Jo lielāks temperatūras gradients, jo spēcīgāka siltuma vadīšana. Ja $\frac{dt}{dx} = 0$, siltuma apmaiņa nenotiek.

Siltuma daudzumu dQ , kas izplūst cauri elementāram laukumam dS laika posmā $d\tau$, izsaka saskaņā ar *Furjē likumu*:

$$dQ = -\lambda \frac{dt}{dx} dS d\tau, \quad (7.2)$$

kur dQ — siltuma daudzums, J; λ — siltumvadītspējas koeficients, W/(m·K); dt — temperatūru starpība starp izotermiskām virsmām, °C; dx — attālums starp šīm virsmām, m; dS — izotermiskās virsmas laukums perpendikulāri siltuma plūsmai, m²; $d\tau$ — laiks, s.

Siltumtehnikā bieži izmanto jēdzienu *ipatnējais siltuma plūsmas blīvums*. Parasti to izsaka ar siltuma daudzumu, kas izplūst caur virsmas laukuma vienību laika vienībā. Siltuma plūsmas blīvumu iegūst no vienādojuma (7.2) šādi:

$$q = \frac{dQ}{dS d\tau} \quad \text{jeb} \quad q = -\lambda \frac{dt}{dx}, \quad (7.3)$$

kur q — siltuma plūsmas blīvums, W/m².

Siltumvadītspējas koeficients. Siltumvadītspējas koeficients λ ir viens no svarīgajiem vielas fizikālajiem lielumiem. No vienādojuma (7.2) var iegūt tā vienību:

$$[\lambda] = \frac{[dQ][d]}{[dS][d\tau][dt]} = \frac{\text{J} \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}} = \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}.$$

Siltumvadītspējas koeficients rāda to siltuma daudzumu džoulos, kas izplūst caur 1 m² virsmas 1 sekundē, ja temperatūru starpība virsmām 1 °C un attālums starp tām 1 m. (Pēc SI sistēmas 1 K = = 1 °C.)

Cietiem materiāliem siltumvadītspējas koeficients λ mainās atkarībā no temperatūras. Šī maiņa notiek pa taisni, ko izsaka vienādojums

$$\lambda = \lambda_0 (1 + \alpha t),$$

kur λ_0 — siltumvadītspējas koeficients 0 °C temperatūrā; α — konstante, kas katram materiālam ir atšķirīga.

¹ Dažreiz temperatūras gradientu apzīmē ar *grad t* vai ∇t .

Metāliem siltumvadītspējas koeficientu skaitliskās vērtības ir 2,3...418 W/(m·K). Ja metāliem paaugstinās temperatūra, to siltumvadītspējas koeficients λ pieaug (izņēmums ir sakausējums bronza). Pat nelielas citu vielu piedevas ievērojami ietekmē metāla siltumvadītspējas koeficientu. Būvmateriāliem un siltumizolācijas materiāliem, tāpat kā metāliem, līdz ar temperatūras paaugstināšanos λ pieaug (izņēmums ir magnēzītķieģeļi). Materiālus, kuriem $\lambda < 0,23$, uzskata par *siltumizolatoriem*. Irdeniem, šķiedrainiem un porainiem materiāliem λ atkarīgs no tilpummasas (porainības) un mitruma. Jo mazāka tilpummasa un mitrums, jo siltumvadītspēja sliktāka un λ mazāks.

Cieto vielu maisījumiem nav izmantojams aditivitātes likums (t. i., zinot λ atsevišķiem komponentiem, to aprēķināt maisījumam nevar), bet λ nosaka eksperimentāli.

Šķidrums un gāzēs siltuma apmaiņa parasti notiek konvekcijas rezultātā. Šķidrumiem (gāzēm) pārvietojoties ļoti plānā slānī, kā arī robežkārtā, konvekcijas ietekme ir niecīga, un noteicošā ir siltuma vadīšana. Šķidrumiem siltumvadītspējas koeficients ir $9 \cdot 10^{-2} \dots 7 \cdot 10^{-1}$ W/(m·K). Paaugstinoties šķidruma temperatūrai, λ samazinās (izņēmumi ir ūdens, glicerīns un dažu vielu ūdens šķīdumi). Šķidrumiem spiediena ietekme uz λ ir niecīga (200 MPa spiedienā λ vidēji palielinās par 10...15%).

Šķidrumu maisījumiem (arī šķīdumiem) siltumvadītspējas koeficientu λ aptuveni var aprēķināt pēc aditivitātes likuma, t. i.,

$$\lambda_m = 0,01 (\lambda_1 C_1 + \lambda_2 C_2 + \dots + \lambda_n C_n),$$

kur λ_1, λ_2 utt. — maisījumu veidojošo komponentu siltumvadītspējas koeficienti; C_1, C_2 utt. — maisījumu veidojošo komponentu procentuālais sastāvs.

Gāzēm siltumvadītspējas koeficients ir $6 \cdot 10^{-3} \dots 6 \cdot 10^{-1}$ W/(m·K). Gāzēm λ maz mainās spiediena ietekmē. Ļoti lielā retinājumā siltumvadīšana pasliktinās. Pieaugot gāzes temperatūrai, λ palielinās.

Gāzu maisījuma siltumvadītspējas koeficienta aprēķināšanai aditivitātes likumu nevar izmantot.

7.1.1. Siltuma vadīšana stacionārā režīmā

Siltuma vadīšana plakanā sienā. Siltuma plūsmas blīvuma vienādojumu $q = -\lambda \frac{dt}{dx}$ integrējot temperatūru robežās no t_1 līdz t_2 atbilstoši virsmas stāvokļiem x_1 un x_2 (7.1. att.), iegūst

$$q \int_{x_1}^{x_2} dx = - \int_{t_1}^{t_2} \lambda dt. \quad (7.4)$$

Ja temperatūrā t_1 siltumvadītspējas koeficients ir λ_1 , bet temperatūrā t_2 tas ir λ_2 , tad vidējais siltumvadītspējas koeficients $\lambda_{vid} = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$.

No vienādojuma (7.4) iegūst, ka

$$q(x_2 - x_1) = \lambda_{\text{vid}}(t_1 - t_2).$$

Starpību $x_2 - x_1$ apzīmē ar δ . Tādēļ siltuma plūsmas blīvumu plakanai sienai var izteikt šādi:

$$q = \lambda_{\text{vid}} \frac{t_1 - t_2}{\delta} \quad \text{jeb} \quad q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta}{\lambda_{\text{vid}}}}. \quad (7.5)$$

Šādā veidā siltuma plūsmas blīvuma formula (7.5) līdzīga Oma likumam elektrotīrībā, kur q atbilst strāvas stiprumam (blīvumam); $t_1 - t_2$ — potenciālu starpībai, bet $\frac{\delta}{\lambda_{\text{vid}}}$ — omiskajai pretestībai uz

laukuma vienību. Tādēļ lielumu $\frac{\delta}{\lambda_{\text{vid}}}$ sauc par *sienas termisko pretestību* un apzīmē ar burtu R (vienība $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$).

Termiskās pretestības apgrieztais lielums $\frac{\lambda}{\delta} = \frac{1}{R}$ raksturo sienas *siltumvadītspēju*.

No vienādojuma (7.3) temperatūras gradients izsakāms šādi:

$$-\frac{dt}{dx} = \frac{q}{\lambda}.$$

Ja λ ir konstants (nav atkarīgs no temperatūras), tad stacionārai siltuma plūsmai ($q = \text{const}$) temperatūras gradients $\frac{dt}{dx}$ visā sienas biezumā paliek nemainīgs, t. i., temperatūra sienā mainās no t_1 līdz t_2 pa taisni (sk. 7.1. att.).

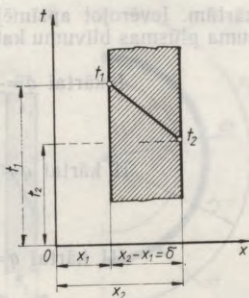
Kopējā siltuma plūsma Φ , kas siltuma vadīšanas veidā izplūst caur laukumu S , ir šāda:

$$\Phi = qS = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta} S = \frac{t_1 - t_2}{R} S, \quad (7.6)$$

kur Φ — siltuma plūsma, W .

Siltuma vadīšana kārtainā plakanā sienā. Sienā, caur kuru notiek siltuma vadīšana, praksē bieži sastāv no vairākām dažāda materiāla kārtām, piemēram, ugunsizturīgo ķieģeļu kārtā un parasto ķieģeļu kārtā; metāla siena un izolācijas kārtā utt. Tā kā katrai šai kārtai ir atšķirīga termiskā pretestība, tad formula (7.6) jāpārveido, ievērojot atsevišķo kārtu termiskās pretestības.

Ja siltuma plūsma ir stacionāra (temperatūra uz kārtu virsmām nemainās), tad vienāds siltuma daudzums izplūst cauri visām



7.1. att. Siltuma vadīšana plakanā sienā.

kārtām. Ievērojot apzīmējumus, kas doti 7.2. attēlā, var izteikt siltuma plūsmas blīvumu katrai no šīm kārtām:

$$\text{I kārtai } q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1}} \quad \text{jeb} \quad q \frac{\delta_1}{\lambda_1} = t_1 - t_2, \quad (7.7)$$

$$\text{II kārtai } q = \frac{t_2 - t_3}{\frac{\delta_2}{\lambda_2}} \quad \text{jeb} \quad q \frac{\delta_2}{\lambda_2} = t_2 - t_3, \quad (7.8)$$

$$\text{III kārtai } q = \frac{t_3 - t_4}{\frac{\delta_3}{\lambda_3}} \quad \text{jeb} \quad q \frac{\delta_3}{\lambda_3} = t_3 - t_4. \quad (7.9)$$

Saskaitot šos trīs vienādojumus, iegūst

$$q \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right) = t_1 - t_4.$$

No šejienes siltuma plūsmas blīvums

$$q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{t_1 - t_4}{\sum_1^3 \frac{\delta}{\lambda}}.$$

Ja siena sastāv no n kārtām, tad

$$q = \frac{t_1 - t_n}{\sum_1^{n-1} \frac{\delta}{\lambda}} = \frac{t_1 - t_n}{\sum_1^{n-1} R}. \quad (7.10)$$

Kopējā siltuma plūsma Φ , kas izplūst cauri visai kārtainās sienas virsmai,

$$\Phi = qS = \frac{t_1 - t_n}{\sum_1^{n-1} R} S. \quad (7.11)$$

Ja ir zināms siltuma plūsmas blīvums, no vienādojumiem (7.7), (7.8) un (7.9) iespējams aprēķināt temperatūras uz kārtu virsmām, piemēram, no vienādojuma (7.7) $t_2 = t_1 - q \frac{\delta_1}{\lambda_1}$, no vienādojuma (7.9) $t_3 = t_4 + q \frac{\delta_3}{\lambda_3}$.

Siltuma vadišana cilindriskā sienā. Formulas (7.6) un (7.11) izmantojamas, ja virsma S abās sienas pusēs ir vienāda. Apaļās sienās (caurules, cilindri), it īpaši, ja sienas biezums ir liels vai dia-

metrs ir mazs, virsma abās pusēs ir dažāda, tādēļ siltuma vadīšanas aprēķiniem lietojamas citas formulas.

Cilindriskā sienā (7.3. att.) ar rādiusu x izdala bezgalīgi plānu kārtu ar biezumu dx . Virsmu starpība kārtas vienā un otrā pusē ir bezgalīgi niecīga, tādēļ caurplūstošo siltuma plūsmu nosaka pēc formulas plakanai sienai

$$\Phi = -\lambda \frac{dt}{dx} S.$$

Caurulēm un cilindriskām iekārtām siltuma plūsmas blīvumu izsaka uz vienu metru caurules garuma. Ja caurules garums ir l , tad $S = 2\pi x l$.

Siltuma plūsmas blīvums

$$q_c = \frac{\Phi}{l} = -\lambda \frac{dt}{dx} \cdot 2\pi x \quad \text{vai} \quad -dt = \frac{q_c}{2\pi\lambda} \cdot \frac{dx}{x}, \quad (7.12)$$

kur q izteikts vatos uz metru (W/m).

Integrējot vienādojumu (7.12) no temperatūras t_1 līdz temperatūrai t_2 , kas atbilst attiecīgajiem rādiusiem r_1 un r_2 , iegūst

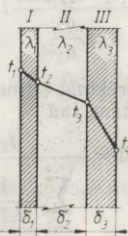
$$-\int_{t_1}^{t_2} dt = \frac{q_c}{2\pi\lambda} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} \quad \text{jeb} \quad t_1 - t_2 = \frac{q_c}{2\pi\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

Rādiusa vietā ievietojot ekvivalentus lielumus — attiecīgos diametrus, siltuma plūsmas blīvumu cilindriskai sienai var izteikt šādi:

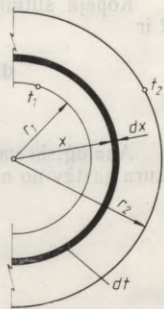
$$q_c = \frac{(t_1 - t_2) \cdot 2\pi\lambda}{\ln \frac{d_2}{d_1}}.$$

Ja λ ir konstants, temperatūra cilindriskajā sienā mainīsies logaritmiski attiecībā pret diametru, nevis pa taisni kā plakanā sienā. Iepriekšējo vienādojumu var uzrakstīt arī tā:

$$q_c = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{2,73\lambda} \lg \frac{d_2}{d_1}}. \quad (7.13)$$



7.2. att. Siltuma vadīšana kārtainā plakanā sienā.



7.3. att. Siltuma vadīšana cilindriskā sienā.

Kopējā siltuma plūsma cauri visai cilindriskajai sienai garumā l ir

$$\Phi = \frac{(t_1 - t_2) \cdot 2\pi\lambda}{\ln \frac{d_2}{d_1}} l = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{2,73\lambda} \lg \frac{d_2}{d_1}} l. \quad (7.14)$$

Analoģiski var aprēķināt siltuma plūsmu cauri cilindriskai sienai, kura sastāv no n kārtām, tad

$$\Phi = \frac{t_1 - t_n}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2,73\lambda} \lg \frac{d_{i+1}}{d_i}} l.$$

Ja cilindriskā iekārta ir ar lielu diametru un plānām sienām, siltuma plūsmu var noteikt arī pēc formulas, ko lieto plakanām sienām.

7.1.2. Siltuma vadīšana nestacionārā režīmā

Siltuma vadīšanas diferenciālvienādojums. Diferenciālvienādojuma risinājuma vienkāršošanai pieņem, ka aplūkojamais ķermenis ir viendabīgs, izotropis; ka siltumvadītspējas koeficients, blīvums un īpatnējā siltumietilpība nemainās, mainoties spiedienam un temperatūrai, un ka aplūkojamā vidē nenotiek agregātstāvokļa maiņa.

Diferenciālvienādojuma iegūšanai aplūko siltuma vadīšanu bezgalīgi mazā paralēlskaldnī ar malām dx , dy un dz , kurš parādīts 7.4. attēlā.

Pieņem, ka nestacionārā siltuma režīmā caur skaldni 1-2-3-4 paralēlskaldnī ieplūst siltuma daudzums dq_1 , bet caur pretējo skaldni 5-6-7-8 aizplūst siltuma daudzums dq_3 , tad siltuma daudzums, ko uzņem (atdod) paralēlskaldnis, ir

$$dq_2 = dq_1 - dq_3. \quad (7.16)$$

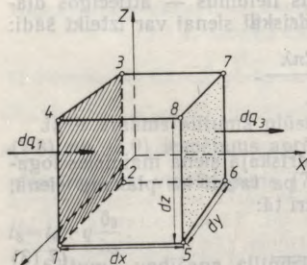
Siltums šinī paralēlskaldnī plūst X , Y un Z asu virzienā. Šajā gadījumā vienkāršības dēļ plūsmu aplūko tikai X ass virzienā.

Skaldnes 1-2-3-4 virsma ir $dydz$. Pēc Furjē diferenciālvienādojuma $dQ = -\lambda \frac{dt}{dx} \times \times dSd\tau$ var rakstīt, ka siltuma daudzums, kas ieplūst caur skaldni 1-2-3-4, ir

$$dq_1 = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} d\tau dy dz. \quad (7.17)$$

Ja skaldnes 1-2-3-4 temperatūra ir t un temperatūras gradients X ass virzienā ir $\partial t / \partial x$, tad skaldnes 5-6-7-8 temperatūra ir

$$t_1 = t + \frac{\partial t}{\partial x} dx.$$



7.4. att. Siltuma vadīšana nestacionārā siltuma režīmā.

Siltuma daudzums, kas aizplūst no skaldnes 5-6-7-8, ir

$$dq_3 = -\lambda \frac{\partial}{\partial x} \left(t + \frac{\partial t}{\partial x} dx \right) dydzd\tau \quad \text{jeb}$$

$$dq_3 = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} dydzd\tau - \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx dy dz d\tau. \quad (7.18)$$

Vienādojumā (7.16) ievietojot dq_1 un dq_3 izteiksmes no vienādojumiem (7.17) un (7.18), iegūst

$$dq_2 = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx dy dz d\tau = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dV d\tau. \quad (7.19)$$

Siltuma daudzumu, kas paliek paralēlskaldnī, var izteikt šādi:

$$dq_2 = c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau dV, \quad (7.20)$$

kur c — īpatnējā siltumietilpība; ρdV — paralēlskaldņa masa; $\frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau$ — temperatūras maiņa līdz ar laiku.

Vienādojumu (7.19) pielīdzinot vienādojumam (7.20), var rakstīt

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (7.21)$$

kur $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ ir temperatūras vadītspējas koeficients.

Sis koeficients ir fizikāls lielums un raksturo ķermeņa temperatūras izmaiņas ātrumu atkarībā no vielas īpašībām. Vienādos apstākļos ātrāk sasils vai atdzīsīs tas ķermenis, kam lielāks temperatūras vadītspējas koeficients.

Vienādojumu (7.21) var pārrakstīt šādi:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \quad (7.22)$$

Ja šo pašu paņēmieni attiecina uz visām trim koordinātu asīm, tad iegūst šādu vienādojumu:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \quad (7.23)$$

Iekavās uzrakstīto summu var izteikt ar Laplasa operatoru $\nabla^2 t$ un vienādojumu (7.23) var rakstīt šādi:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t. \quad (7.24)$$

Sis vienādojums ir siltuma vadišanas diferenciālvienādojums nekustīgai videi.

Stacionāram siltuma režīmam, kad $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$, vienādojums (7.24) iegūst šādu veidu ($a \neq 0$):

$$\nabla^2 t = 0 \quad \text{jeb} \quad \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0. \quad (7.25)$$

Vienādojums (7.25) ir siltuma vadišanas diferenciālvienādojums stacionāram režīmam. Tā risinājums ļauj noteikt temperatūras gradientu.

Diferenciālvienādojumu $a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{\partial t}{\partial \tau}$ integrējot (kas ne vienmēr izdodas), iegūst formulas ķermeņa temperatūras noteikšanai jebkurā punktā, jebkurā laikā, karsējot vai dzesējot ķermeni. Bez tam iespējams noteikt nepieciešamo sildīšanas vai dzesēšanas ilgumu.

Parasti diferenciālvienādojuma (7.22) atrisināšanai lieto Furjē rindas. Dažādiem robežnosacījumiem atrisinājumi ir dažādi. Meklējamā funkcija atkarīga no daudziem mainīgiem lielumiem, kurus var sagrupēt divos līdzības kritērijos un geometriskajā simpleksā: Bio kritērijā $Bi = \frac{\alpha l}{\lambda}$, Furjē kritērijā $Fo = \frac{a\tau}{l^2}$ un geometriskajā simpleksā $G = x/l$.

Attiecības veidā nosakāmo funkciju temperatūras var izteikt ar šādu sakarību:

$$\frac{\theta}{\theta'} = f(Bi, Fo, G).$$

Parasti ir pietiekami zināt temperatūru starpību uz ķermeņa virsmas θ_v un uz vidusplaknes vai centrā θ_c . Tad G ir konstants un var rakstīt, ka

$$\frac{\theta_v}{\theta_c} = f(Bi, Fo) \quad \text{un} \quad \frac{\theta_v}{\theta'} = f(Bi, Fo),$$

kur θ_v — vides un ķermeņa virsmas temperatūru starpība,

$$\theta_v = t_{v1d} - t_{v1r},$$

t_{v1d} — vides temperatūra, °C; t_{v1r} — virsmas temperatūra, °C; θ' — temperatūru starpība procesa sākumā, t. i.,

$$\theta' = t_{v1d} - t_k,$$

t_k — ķermeņa sākuma temperatūra, °C; θ_c — ķermeņa virsmas un ķermeņa vidusplaknes temperatūru starpība,

$$\theta_c = t_{v1r} - t_0,$$

t_0 — temperatūra ķermeņa vidū, °C.

Parasti šo funkcionālo sakarību izsaka grafiski vai tabulu veidā.

Plakanai plāksnei temperatūras izmaiņu sildot vai dzesējot nosaka šāda funkcionāla sakarība:

$$\frac{\theta_v}{\theta'} = f_v \left(\frac{\alpha \delta}{\lambda}, \frac{a\tau}{\delta^2} \right),$$

kur α — vides siltumatdeves koeficients, W/(m²·K); δ — puse no plāksnes biezuma, m; λ — siltumvadītspējas koeficients, W/(m·K); a — temperatūras vadītspējas koeficients, $a = \frac{\lambda}{c\rho}$, m²/s; τ — laiks, s.

Dažreiz jāzina arī siltuma daudzums Q_τ , kas apmainās ķermenī laikā τ .

Procesa sākumā siltuma daudzumu džoulos uz plakanās plāksnes 1 m² var izteikt šādi:

$$Q' = 2\delta\rho c\theta'.$$

Siltuma izmaiņu ķermenī raksturo tie paši kritēriji, kas raksturo temperatūras izmaiņu, t. i., $\frac{Q_\tau}{Q'} = f_Q(Bi, Fo)$.

Nosakāmā lieluma iegūšanai vispirms nosaka kritēriju $Bi = \frac{\alpha \delta}{\lambda}$ un $Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}$ skaitliskās vērtības un pēc tam grafiski iegūst $\frac{\theta}{\theta'}$ un $\frac{Q\tau}{Q'}$. Tā kā lielumi θ' un Q' ir zināmi, tad nosaka θ un Q .

Cilindram funkcionālā sakarība ir tāda pati kā plakanai plāksnei. Kritēriji nosakāmi šādi:

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda} \quad \text{un} \quad Fo = \frac{a\tau}{R^2},$$

kur apzīmējumi ir iepriekšējie; R — cilindra rādiuss, m.

Procesa sākumā siltuma daudzumu džoulos, ja cilindra garums ir l , aprēķina šādi:

$$Q' = \pi R^2 c \rho l \theta'.$$

Sīkākī norādījumi par metodēm, kā noteikt siltuma vadišanu nestacionāram režīmam, doti speciālajā literatūrā.

7.2. SILTUMA STAROŠANA

Tehnikā, kur jāstāpjas ar augstām temperatūrām, piemēram, ceļos, krāsnīs, tvaika katlos, siltuma apmaiņa notiek galvenokārt siltuma starošanas veidā.

Siltuma starošana atšķirībā no citiem siltuma apmaiņas veidiem nav atkarīga no apkārtējās vides temperatūras. Siltuma starošana saistīta ar elektromagnētiskajiem viļņiem, ko izstaro ķermeņi un kas ar ātrumu $3 \cdot 10^8$ km/s pārvietojas līdz nākamai virsmai; tur šo viļņu ietekmē pieaug molekulu kinētiskā enerģija, un tas savukārt izpaužas ķermeņa sasilšanā. Šādas īpašības piemīt tikai noteiktam elektromagnētisko viļņu diapazonam — no $8 \cdot 10^{-6}$ līdz $35 \cdot 10^{-5}$ m. Šos elektromagnētiskos viļņus sauc par *siltuma stariem*.

Siltuma starojums, sastopot kādu ķermeni, daļu savas enerģijas A atdod tam, bet daļa R atstarojas. Tā starojuma daļa, kas nokļūst ķermenī, var izplūst tam cauri D vai arī palikt tanī, pārejot siltumā.

Apzīmējot kopējo uz ķermeni krītošo staroto siltumu ar vienu, saskaņā ar enerģijas nezūdamības likumu var uzrakstīt šādu vienādojumu:

$$A + R + D = 1.$$

Atkarībā no tā, kā ķermeni sasniegusi siltuma enerģija sadalās, izšķir trīs galējus ķermeņu veidus. Ja $A = D = 0$, tad $R = 1$, un šādu ķermeni sauc par *absolūti baltu ķermeni* (tas atstaro visu siltuma enerģiju). Ja $R = D = 0$, tad $A = 1$, un šādu ķermeni sauc par *absolūti melnu ķermeni* (tas absorbē visu siltuma enerģiju). Ja $A = R = 0$, tad $D = 1$, un šādu ķermeni uzskata par *absolūti caurspīdīgu* (dzidru) jeb *diatermisku ķermeni*.

Tehnikā lietojamie cietie un šķidrie ķermeņi siltuma stariem ir necaurļaidīgi, t. i., $D = 0$, tad

$$A + R = 1.$$

No šī vienādojuma izriet: jo labāk ķermeņa saista siltuma starus, jo mazāk tas tos atstaro — un otrādi.

Parasti nav nedz absolūti baltu, nedz absolūti melnu, nedz absolūti caurspīdīgu ķermeņu. Ķermeņus, kas neatbilst šiem nosacījumiem, sauc par *pelēkiem ķermeņiem*.

Siltuma staru saistīšanā un atstarošanā liela nozīme ir virsmai. Gludas un pulētas virsmas neatkarīgi no krāsas siltuma starus atstaro vairākkārt labāk nekā negludās virsmas.

Ķermeņa starošanas spēju E , kas atbilst noteiktai temperatūrai un fizikālām īpašībām, raksturo ar enerģijas daudzumu, ko tas izstaro no laukuma vienības laika vienībā. Vienādā temperatūrā maksimālā starošanas spēja piemīt absolūti melnai virsmai, bet minimālā starošanas spēja, kas vienāda ar nulli, — absolūti baltai virsmai.

Vienlaikus ar izstaroto enerģijas plūsmas blīvumu E_1 ķermeņa virsma no apkārtējās vides saņem enerģijas plūsmas blīvumu E_2 . Daļa no šīs enerģijas $E_2 A_1$ (ja A_1 ir ķermeņa absorbcijas koeficients) absorbējas (paliek ķermenī), otra daļa $E_2(1-A_1)$ atstarojas. Tādēļ ķermeņa faktiski starotais enerģijas plūsmas blīvums

$$E_{\text{ef}} = E_1 + E_2(1 - A_1)$$

un to sauc par *ķermeņa efektīvo starojumu*, kur E_1 — sakarsētā ķermeņa izstarotais enerģijas plūsmas blīvums, W/m^2 ; $E_2(1-A_1)$ — atstarotais enerģijas plūsmas blīvums, W/m^2 .

Staroto enerģiju attiecinot uz viļņa garuma vienību, iegūst *starošanas intensitāti* $I_{0\lambda}$. Starošanas intensitāte ķermeņiem vienādā temperatūrā, ja viļņa garums vienāds, ir dažāda. Maksimāla tā ir absolūti melnam ķermenim. Pēc Planka likuma, absolūti melnam ķermenim sakarība starp starošanas intensitāti, viļņa garumu un temperatūru izsakāma šādi:

$$I_{0\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/(\lambda T)} - 1)}, \quad (7.26)$$

kur λ — viļņa garums, m ; T — ķermeņa absolūtā temperatūra, K ; e — naturālā logaritma bāze; C_1 — konstante, kas vienāda ar $3,68 \cdot 10^{-16} W \cdot m^2$; C_2 — konstante, kas vienāda ar $1,43 \cdot 10^{-2} m \cdot K$.

Attēlojot cieta ķermeņa starošanas intensitāti $I_{0\lambda}$ kā funkciju no viļņa garuma λ un ķermeņa temperatūras T , iegūst 7.5. attēlā parādītos starojuma spektrus. No šī attēla redzams, ka sakarsēts ciets ķermeņa izstaro dažāda garuma viļņus (veido nepārtrauktu spektru). Ja $\lambda = \infty$, tad izstarotais enerģijas daudzums vienāds ar nulli, jo spektra līnijas asimptotiski tuvojas X asij. Aplūkojot spektru $T = \text{const}$, redzams, ka starošanas intensitāte pieaug garāko viļņu virzienā, līdz sasniedz maksimumu, bet pēc tam samazinās. Paaugstinoties ķermeņa temperatūrai, maksimums spēcīgāk izteikts un pārvietojas uz īsāko viļņu pusi.

Enerģijas plūsmas blīvumu, ko izstaro absolūti melns ķermeņa no $1 m^2$ virsmas, iegūst pēc Stefana—Bolcmaņa likuma:

$$E_0 = \sigma T^4, \quad (7.27)$$

kur σ — absolūti melna ķermeņa starošanas konstante, kas vienāda ar $5,75 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$.

Parasti formulu (7.27) raksta šādi:

$$E_0 = C_0(T/100)^4,$$

kur C_0 — absolūti melna ķermeņa starošanas koeficients; $C_0 = 5,75 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$.

Formulas rāda, ka ķermeņa starotais enerģijas plūsmas blīvums ir tieši proporcionāls tā virsmas absolūtai temperatūrai ceturtajā pakāpē.

Pelēkiem ķermeņiem saskaņā ar Stefana—Bolcmaņa likumu

$$E = C(T/100)^4,$$

kur E — pelēkā ķermeņa starotais enerģijas plūsmas blīvums, W/m^2 ; C — pelēkā ķermeņa starošanas koeficients, $C = 0 \dots 5,75 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T — ķermeņa temperatūra, K.

Attiecība starp pelēkā ķermeņa staroto enerģiju un absolūti melna ķermeņa staroto enerģiju vienādā temperatūrā ir ķermeņa relatīvā starošanas spēja jeb ķermeņa melnuma pakāpe ϵ :

$$\epsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{C(T/100)^4}{C_0(T/100)^4} = \frac{C}{C_0}. \quad (7.28)$$

Melnuma pakāpe mainās no 0 līdz 1.

Ja melnuma pakāpe ir zināma, var aprēķināt starotās enerģijas plūsmas blīvumu:

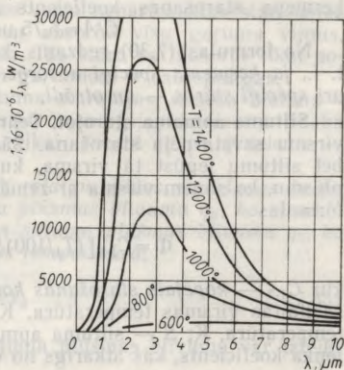
$$E = \epsilon E_0 = \epsilon C_0(T/100)^4 = \epsilon 5,75(T/100)^4. \quad (7.29)$$

Ķermeņa virsma staro enerģiju uz visām pusēm, bet ne ar vienādu intensitāti. Maksimālo enerģiju pārnes stari, kas perpendikulāri starojošai virsmai. Ja ar E_p apzīmē enerģijas plūsmas blīvumu, ko staro perpendikulārie stari, tad tie stari, kas vērsti leņķī φ , staros enerģijas plūsmas blīvumu E_φ :

$$E_\varphi = E_p \cos \varphi.$$

Sakarību starp ķermeņa starošanas un absorbēšanas spēju izsaka Kirhofa likums: attiecība starp starošanas spēju un absorbēšanas spēju visiem ķermeņiem ir konstants lielums, kas vienāds ar absolūti melna ķermeņa starošanas spēju šajā pašā temperatūrā un atkarīgs tikai no temperatūras, t. i., $E_1/A_1 = E_2/A_2 = \dots = E_0/A_0 = E_0$, jo $A_0 = 1$.

Tā kā starošanas spēja $E = C(T/100)^4$, tad E_1, E_2, \dots, E_0 vietā var likt C_1, C_2, \dots, C_0 ; $C_1/A = C_2/A_2 = \dots = C_0/A_0 = C_0$. Absolūti melna



7.5. att. Starošanas spektru līnijas.

ķermeņa starošanas koeficients $C_0=5,75$. Tādēļ var rakstīt, ka
 $C/A=5,75$ un $C=5,75A$. (7.30)

No formulas (7.30) redzams, ka lielumi A un C ir proporcionāli, t. i., ja ķermenis spēcīgi absorbē siltuma starus, tad sakarsēts tas arī spēcīgi staro — un otrādi.

Siltuma apmaiņa starojot. Tehnikā bieži sastopama divu paralēlu virsmu savstarpēja starošana. Šādā gadījumā staro abas virsmas, bet siltumu iegūst tā virsma, kurai temperatūra zemāka. Siltuma plūsmu, ko saņem virsma ar zemāko temperatūru, var aprēķināt pēc formulas

$$\Phi = C_{1-2}[(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4]S\varphi, \quad (7.31)$$

kur C_{1-2} — kopējais starošanas koeficients, $W/(m^2 \cdot K^4)$; T_1 — vairāk sasildītās virsmas temperatūra, K ; T_2 — mazāk sasildītās virsmas temperatūra, K ; S — siltuma apmaiņas virsma, m^2 ; φ — starošanas leņķa koeficients, kas atkarīgs no virsmu novietojuma.

Formula (7.31) lietojama visos savstarpējās starošanas gadījumos. Atkarībā no virsmas un tās stāvokļa mainās tikai lielumi C_{1-2} un φ .

Ja sienas paralēlas, $\varphi=1$ un kopējo starošanas koeficientu C_{1-2} var noteikt šādi:

$$C_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{5,75}}, \quad (7.32)$$

kur C_1 — pirmās virsmas starošanas koeficients, $W/(m^2 \cdot K^4)$; C_2 — otrās virsmas starošanas koeficients, $W/(m^2 \cdot K^4)$.

Kopējais starošanas koeficients vienmēr ir mazāks par atsevišķo virsmu starošanas koeficientiem. Aptuveni aprēķiniem C_{1-2} vietā var lietot tās virsmas starošanas koeficientu, kurai augstāka temperatūra.

Šķidrumi siltumu staro līdzīgi cietām vielām. Tehnikā siltuma starošanai no šķidrumiem ir maza nozīme, jo šķidrumos citi siltuma apmaiņas veidi ir dominējošie un kopējā siltuma apmaiņā šķidrumu starošanai ir niecīga nozīme.

Siltuma starošana gāzēs. Starošana gāzēs ievērojami atšķiras no cieto vielu starošanas. Vienatoma gāzes un divatomu gāzes, kas sastāv no vienādiem atomiem (N_2 , O_2 , H_2 utt.), praktiski siltuma apmaiņā nepiedalās, un tās uzskatāmas par siltuma stariem caurspīdīgām. Trisatomu un vairākatomu gāzes un tvaiki (CO_2 , H_2O , SO_2 , CH_4 , NH_3 u. c.), kā arī divatomu gāzes (CO , HCl u. c.), kas sastāv no diviem dažādiem atomiem, siltuma enerģiju staro un absorbē.

Siltuma starošana un absorbēšana gāzēs atkarīga no temperatūras, spiediena un gāzes slāņa biezuma. Siltuma absorbēšana gāzēs ir atkarīga ne tikai no stara noietā ceļa, bet arī no gāzes koncentrācijas. Aprēķinos parasti gāzes koncentrāciju aizvieto ar tai proporcionālu lielumu — gāzes parciālo spiedienu.

Atšķirībā no cietām vielām, kas veido nepārtrauktus starošanas un absorbcijas spektrus (staro un absorbē visu garumu viļņus, 7.5. att.), gāzu spektri ir pārtraukti. Tās staro vai absorbē tikai noteikta garuma viļņus, bet pārējiem garumiem ir caurspīdīgas.

Gāzes, būdamas selektīvas siltuma starotājas, neseko Stefana—Bolcmaņa likumam. Tomēr gāzes staroto enerģijas daudzumu izsaka tādā pašā veidā kā cietai vielai, tikai ievēdot jaunu jēdzienu — gāzes melnuma pakāpi ϵ_g .

Par gāzes melnuma pakāpi jeb relatīvo gāzes starošanas koeficientu sauc attiecību starp siltuma plūsmas blīvumu q_g , ko vienādā laika sprīdī staro gāzes slānis, un siltuma plūsmas blīvumu q_0 , ko staro absolūti melns ķermenis gāzes temperatūrā:

$$\frac{q_g}{q_0} = \epsilon_g. \quad (7.33)$$

No formulas (7.33) staroto siltuma plūsmas blīvumu var izteikt šādi:

$$q_g = \epsilon_g q_0 \quad \text{jeb} \quad q_g = \epsilon_g C_0 (T_g/100)^4, \quad (7.34)$$

kur C_0 — absolūti melna ķermeņa starošanas koeficients, $C_0 = 5,75 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_g — gāzes temperatūra, K.

Gāzes melnuma pakāpe ϵ_g ir funkcija no gāzes temperatūras t_g , parciālā spiediena p un gāzes slāņa efektīvā biezuma l , t. i.,

$$\epsilon_g = f(t_g, p, l).$$

Dūmgāzēs, ko tehnikā lieto par siltumnesēju, vienlaikus ir oglekļa(IV) oksīds un ūdens tvaiks, kuri piedalās siltuma starošanā. Tāda maisījuma melnuma pakāpi nosaka šādi:

$$\epsilon_g = \epsilon_{\text{CO}_2} + \beta \epsilon_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta \epsilon_g, \quad (7.35)$$

kur ϵ_{CO_2} — oglekļa(IV) oksīda melnuma pakāpe; $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ — ūdens tvaika melnuma pakāpe; β — koeficients, kas izsaka to, ka ūdens tvaika parciālajam spiedienam ir lielāka ietekme uz starošanu nekā gāzes slāņa efektīvajam biezumam; $\Delta \epsilon_g$ — lielums, kas izsaka oglekļa(IV) oksīda un ūdens tvaika savstarpējo starošanu. Tehniskajos aprēķinos šo lielumu ignorē. ϵ_{CO_2} , $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ un β iegūst no rokasgrāmatām kā t_g , p un l funkcijas.

Lai varētu noteikt gāzes melnuma pakāpi, jāzina gāzes slāņa efektīvais biezums, kas atkarīgs no tās telpas formas un izmēriem, kurā gāze atrodas (sk. rokasgrāmatas).

Pēc formulas (7.34) aprēķina siltumu, ko gāzes slānis staro bezgalībā. Starošana bezgalībā līdzīga starošanai uz absolūti melnu virsmu, ja $T = 0 \text{ K}$, jo arī tad siltuma stari netiek atstaroti.

Tehnikā gāzi parasti ierobežo sienas ar temperatūru virs absolūtās nulles un melnuma pakāpi ϵ_s , kas mazāka par vienu. Tad notiek savstarpēja starošana starp sienu un gāzes slāni.

Sādu siltuma apmaiņu var izteikt ar siltuma plūsmas blīvumu:

$$q_{gs} = \epsilon'_g \epsilon'_s C_0 [(T_g/100)^4 - (T_s/100)^4], \quad (7.36)$$

kur ϵ'_g — gāzes slāņa efektīvā melnuma pakāpe. Tā nosakāma šādi:

$$\epsilon'_g = \frac{\epsilon_g - A_g (T_s/T_g)^4}{1 - (T_s/T_g)^4},$$

kur ϵ_g — gāzes slāņa melnuma pakāpe, kas nosakāma pēc formulas (7.35); A_g — gāzes slāņa siltuma absorbcijas koeficients, ko var izteikt šādi: $A_g = \epsilon_{\text{CO}_2} (T_g/T_s)^{0,65} + \beta \epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$; ϵ'_s — sienas efektīvā melnuma pakāpe: $\epsilon'_s = \frac{\epsilon_s + 1}{2}$; ϵ_s — sienas melnuma pakāpe; T_g — gāzes slāņa temperatūra, K; T_s — sienas temperatūra, K.

Gāzes slāņa temperatūra T_g mainās garenvirzienā un šķērsvirzienā, tādēļ formulā (7.36) jāievieto ģeometriski vidējā temperatūra, ko iegūst pēc šādas formulas:

$$T_g = \sqrt[4]{T_1^2 T_2^2}, \quad (7.37)$$

kur T_1 — gāzes temperatūra plūsmas sākumā, K; T_2 — gāzes temperatūra plūsmas beigās, K.

Ja $T_s > T_g$, tad no vienādojuma (7.36) iegūst negatīvu rezultātu. Tas nozīmē, ka šajā gadījumā gāzes slānis ir siltumu uzņēmis.

7.3. SILTUMA APMAIŅA KONVEKCIJĀ [SILTUMA ATDEVE]

Siltuma apmaiņa konvekcijā notiek starp šķidru (gāzveida) vidi un cietu ķermeni (virsmu), tiem saskaroties. Retāk konvekcija notiek starp divām vai vairākām šķidrām (gāzveida) vidēm, piemēram, tieša sildīšana ar tvaiku, telpu apsildīšana ar karstu gaisu u. c.

Viens no svarīgiem faktoriem, kas ietekmē siltuma apmaiņu konvekcijā, ir vides plūsmas raksturs. Laminārā plūsmā atsevišķi šķidruma slāņi nesajaucas, tādēļ siltuma apmaiņa notiek siltumvadīšanas veidā, tāpat kā cietā ķermenī. Tā kā siltumvadītspējas koeficients šķidrumiem ir mazs, tad laminārai plūsmai siltuma apmaiņa ir niecīga. Turbulentai plūsmai siltuma apmaiņa starp virsmu un vidi ir daudz intensīvāka, jo vide labi sajaucas. Pie pašas virsmas arī turbulentai plūsmai ir robežkārtā, kurā plūsma ir lamināra, tādēļ tur notiek vāja siltuma apmaiņa. Robežkārtā rada pretestību siltuma plūsmai. Jo robežkārtā plānāka (lielāks vides kustības ātrums), jo ātrāk notiek siltuma apmaiņa.

Izšķir *brīvo konvekciju* un *piespiedu konvekciju*. *Brīvā konvekcija* ir šķidruma (gāzes) kustība gar virsmu, un tās pamatā ir siltā un mazāk siltā šķidruma blīvumu starpība. *Piespiedu konvekcija* ir šķidruma (gāzes) kustība gar virsmu spiedienu starpības dēļ. Spiedienu starpību var radīt sūkņi, maisītāji, limeņu starpība u. c.

Konvekcijā atdoto (uzņemto) siltumu var noteikt pēc Ņūtona atdesēšanas likuma. Saskaņā ar šo likumu *siltuma plūsma* $d\Phi$, ko *virsmā* dS *ar temperatūru* t_s *1 sekundē atdod apkārtējai videi ar tem-*

peratūru t_v , ir tieši proporcionāla temperatūru starpībai $t_s - t_v$ un virsmai dS , t. i.,

$$d\Phi = \alpha(t_s - t_v)dS. \quad (7.38)$$

Stacionāram režīmam, kad virsmas un vides temperatūras ir nemainīgas, siltuma plūsma

$$\Phi = \alpha(t_s - t_v)S, \quad (7.39)$$

kur α — siltumatdeves koeficients; S — virsma, m^2 ; t_s — virsmas temperatūra, $^{\circ}C$; t_v — vides temperatūra, $^{\circ}C$.

No vienādojuma (7.39) izriet, ka siltumatdeves koeficienta vienība ir

$$[\alpha] = \frac{[\Phi]}{[S](t_s - t_v)} = \frac{W}{m^2 \cdot K}.$$

Siltumatdeves koeficients α izsaka siltuma daudzumu, ko konvekcijā $1 m^2$ virsmas atdod (uzņem) apkārtējai videi 1 sekundē, ja temperatūru starpība starp sienu un vidi ir $1^{\circ}C$.

Siltumatdeves koeficients atkarīgs no daudziem fizikāliem lielumiem. To var izteikt kā funkciju

$$\alpha = f(\omega, \rho, \mu, c, t, p, d, l, \dots).$$

Sādas sarežģītas siltumatdeves koeficienta izteiksmes dēļ to nevar izteikt ar kopēju formulu, kas derīga visiem siltumatdeves variantiem.

Parasti siltumatdeves koeficientu aprēķina pēc formulas, kas iegūta eksperimentāli. Sādas formulas iegūšanai jāzina, kā organizēt eksperimentu, lai ar vienu aparātu iegūtos rezultātus bez kļūdām varētu attiecināt uz citiem aparātiem. Tādēļ siltumatdeves koeficientu nosaka pēc līdzības teorijas principiem un eksperimentos iegūtos rezultātus izsaka līdzības kritēriju funkcionālās sakarības veidā. Pamatojoties uz līdzības teoriju, noskaidro sakarību starp līdzības kritērijiem, kas raksturo pētāmo siltumatdeves procesu.

Konvekciju raksturo Furjē—Kirhofa diferenciālvienādojums

$$\begin{aligned} \rho c_p \left(\omega_x \frac{\partial t}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial t}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial t}{\partial z} \right) &= \\ &= \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \end{aligned} \quad (7.40)$$

Vienādojuma kreisajā pusē iekavās parādīta šķidrums elementārās daļiņas temperatūras izmaiņa ļoti īsā laika sprīdī, kurā tā no sākuma stāvokļa pārvietojas jaunā stāvoklī dx , dy , dz . Visa kreisā puse rāda to siltuma daudzumu, ko ievada elementārā tilpumā šķidrums, plūstot tam cauri (konvekcijas siltums). Izteiksme vienādojuma labajā pusē rāda siltumu, kas no elementārā tilpuma aizplūst vadīšanas rezultātā. Šis vienādojums kopumā parāda, ka stacionārajā režīmā abi siltuma plūsmas veidi līdzsvarojas.

Parasti vienādojumu (7.40) izsaka šādi:

$$w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \frac{\partial t}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \quad (7.41)$$

Iepriekš norādīts, ka siltums robežkārtā pie sildvirsmas izplatās vadīšanas veidā. Šo siltuma plūsmu, ja kārtas biezums ir dx , var izteikt ar siltuma vadīšanas vienādojumu

$$d\Phi = -\lambda \frac{dt}{dx} dS. \quad (7.42)$$

No otras puses, pēc Ņūtona likuma, šo pašu siltuma plūsmu var izteikt šādi:

$$d\Phi = \alpha \Delta t dS. \quad (7.43)$$

Pielīdzinot vienādojumus (7.42) un (7.43) vienu otram, iegūst, ka

$$\alpha \Delta t = -\lambda \frac{dt}{dx}. \quad (7.44)$$

Vienādojums (7.44) raksturo siltuma apmaiņu uz virsmas un šķidrums (gāzes) saskares robežas. Vienādojumi (7.41) un (7.44) raksturo konvekciju jebkurā sistēmā.

Siltumu līdzība. Lai siltumatdeves koeficienta noteikšanai iegūtu matemātisku sakarību starp līdzības kritērijiem, kas raksturo konvekciju, jāzina, kādi kritēriji raksturo siltumu līdzību.

Kritēriju savstarpējās sakarības iegūšanai pieņem, ka no siltuma apmaiņas viedokļa ir divas līdzīgas sistēmas, ko izsaka šādi vienādojumi:

$$\left. \begin{aligned} \text{pirmā sistēma } \frac{\partial t'}{\partial \tau'} + w'_x \frac{\partial t'}{\partial x'} + w'_y \frac{\partial t'}{\partial y'} + w'_z \frac{\partial t'}{\partial z'} = \\ = a' \left(\frac{\partial^2 t'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 t'}{\partial y'^2} + \frac{\partial^2 t'}{\partial z'^2} \right) \\ \alpha' \Delta t' = -\lambda' \frac{\partial t'}{\partial y'} \end{aligned} \right\} \quad (7.45)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{otrā sistēma } \frac{\partial t''}{\partial \tau''} + w''_x \frac{\partial t''}{\partial x''} + w''_y \frac{\partial t''}{\partial y''} + w''_z \frac{\partial t''}{\partial z''} = \\ = a'' \left(\frac{\partial^2 t''}{\partial x''^2} + \frac{\partial^2 t''}{\partial y''^2} + \frac{\partial^2 t''}{\partial z''^2} \right) \\ \alpha'' \Delta t'' = -\lambda'' \frac{\partial t''}{\partial y''} \end{aligned} \right\} \quad (7.46)$$

Ja sistēmas ir līdzīgas, var uzrakstīt šādas līdzības konstantes:

$$\frac{x''}{x'} = \frac{y''}{y'} = \frac{z''}{z'} = C_l; \quad \frac{t''}{t'} = \frac{\Delta t''}{\Delta t'} = C_t; \quad \frac{w''_x}{w'_x} = \frac{w''_y}{w'_y} = \frac{w''_z}{w'_z} = C_w;$$

$$\frac{\tau''}{\tau'} = C_\tau; \quad \frac{a''}{a'} = C_a; \quad \frac{\alpha''}{\alpha'} = C_{\alpha}; \quad \frac{\lambda''}{\lambda'} = C_\lambda.$$

Zinot līdzības konstantes, vienādojumu sistēmas (7.46) mainīgos lielumus var izteikt ar vienādojumu sistēmas (7.45) mainīgajiem lielumiem, jo $x'' = C_l x'$; $l'' = C_l l'$ utt. Tad iegūst

$$\left. \begin{aligned} \frac{C_\tau \partial t'}{C_\tau \partial \tau'} + \frac{C_w C_t}{C_l} \left(w'_x \frac{\partial t'}{\partial x'} + w'_y \frac{\partial t'}{\partial y'} + w'_z \frac{\partial t'}{\partial z'} \right) &= \\ = -\frac{C_a C_t}{C_l^2} a' \left(\frac{\partial^2 t'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 t'}{\partial y'^2} + \frac{\partial^2 t'}{\partial z'^2} \right) & \\ C_\alpha C_t \alpha' \Delta t' &= -\frac{C_\lambda C_t}{C_l} \lambda' \frac{\partial t'}{\partial y'} \end{aligned} \right\} \quad (7.47)$$

Vienādojumu sistēma (7.47), tāpat kā vienādojumu sistēma (7.45), raksturo siltuma apmaiņu līdzīgās sistēmās, tātad šīm vienādojumu sistēmām jābūt identiskām, t. i.,

$$\frac{C_t}{C_\tau} = \frac{C_w C_t}{C_l} = \frac{C_a C_t}{C_l^2} \quad \text{un} \quad C_\alpha C_t = \frac{C_\lambda C_t}{C_l}.$$

Tādēļ, ievērojot vienādojumu sistēmu (7.45) un (7.47) identitāti, var rakstīt šādas sakarības:

$$\frac{C_t}{C_\tau} = \frac{C_a C_t}{C_l^2} \quad \text{jeb} \quad \frac{C_a C_\tau}{C_l^2} = 1; \quad (7.48)$$

$$\frac{C_w C_t}{C_l} = \frac{C_a C_t}{C_l^2} \quad \text{jeb} \quad \frac{C_w C_l}{C_a} = 1; \quad (7.49)$$

$$C_\alpha C_t = \frac{C_\lambda C_t}{C_l} \quad \text{jeb} \quad \frac{C_\alpha C_l}{C_\lambda} = 1. \quad (7.50)$$

Vienādojumos (7.48), (7.49) un (7.50) līdzības konstanšu vietā raksta to attiecīgās nozīmes, tad

$$\frac{a' \tau'}{l'^2} = \frac{a'' \tau''}{l''^2} \quad \text{jeb} \quad \frac{a \tau}{l^2} = Fo = idem;$$

$$\frac{w' l'}{a'} = \frac{w'' l''}{a''} \quad \text{jeb} \quad \frac{w l}{a} = Pe = idem;$$

$$\frac{\alpha' l'}{\lambda'} = \frac{\alpha'' l''}{\lambda''} \quad \text{jeb} \quad \frac{\alpha l}{\lambda} = Nu = idem.$$

Lai būtu ievērota siltumu līdzība, tad Furjē, Peklē un Nuselta kritērijiem jebkuras sistēmas attiecīgos punktos līdzības momentos jābūt nemainīgiem.

Siltumatdeves koeficients a ietilpst Nuselta kritērijā $\frac{\alpha l}{\lambda}$, tādēļ, nosakot a , šis kritērijs ir *nosakāmais*, bet pārējie — *noteicošie kritēriji*.

Siltumatdeves vienādojums, izteikts ar kritērijiem, rakstāms šādi:

$$Nu = f(Fo, Pe).$$

Peklē kritēriju var pārveidot

$$Pe = \frac{\omega l}{a} = \frac{\omega l}{v} \frac{v}{a} = Re Pr \quad \text{jeb} \quad Pr = \frac{Pe}{Re} = \frac{v}{a} = \frac{\mu c}{\lambda}.$$

Gāzēm Prantla kritērijs nav atkarīgs no spiediena un temperatūras, bet tikai no atomu skaita molekulā. Vienatoma gāzēm $Pr = 0,67$, divatomu gāzēm $Pr = 0,72$, trisatomu gāzēm $Pr = 0,8$, četratomu gāzēm $Pr = 1$.

Siltuma apmaiņa konvekcijā saistīta ar šķidrums (gāzes) plūsmu, tādēļ, aplūkojot siltumatdevi, jāievēro ne tikai siltumu līdzība, bet arī hidrodinamiskā un ģeometriskā līdzība. Hidrodinamisko līdzību raksturo Reynoldsa Re , Frūda Fr un homohronais Ho kritērijs, bet ģeometriskā līdzību — simplekss G .

Brīvajā konvekcijā lietojot Frūda kritēriju, rodas grūtības ar šķidrums (gāzes) plūsmas ātruma noteikšanu. Šādos gadījumos izlīdzas ar Grashofa kritēriju, kuru iegūst no Arhimēda kritērija $Ar = \frac{g l^3 \Delta \rho}{v^2 \rho_0}$. Blīvumu starpība izsakāma šādi: $\Delta \rho = \rho_0 - \rho_0 (1 - \beta \Delta t) = \rho_0 \beta \Delta t$, tādēļ, Arhimēda kritērijā ievietojot $\Delta \rho$ vietā minēto izteiksmi, iegūst Grashofa kritēriju $Gr = \frac{g l^3 \rho^2 \beta \Delta t}{\mu^2}$.

Stacionārai siltuma un vides plūsmai atkrīt Furjē kritērijs un homohronais kritērijs. Vispārinātais siltumatdeves vienādojums stacionārai plūsmai izsakāms šādi:

$$Nu = f(Re, Pr, Gr, G). \quad (7.51)$$

Šo funkciju var izteikt kā pakāpju funkciju

$$Nu = C Re^k Pr^m Gr^n G^p. \quad (7.52)$$

Ievietojot attiecīgās kritēriju izteiksmes, iegūst

$$\alpha \frac{l}{\lambda} = C \left(\frac{\omega l \rho}{\mu} \right)^k \left(\frac{c \mu}{\lambda} \right)^m \left(\frac{g l^3 \rho^2 \beta \Delta t}{\mu^2} \right)^n \left(\frac{l}{d} \right)^p,$$

no šejienes

$$\alpha = C \frac{\lambda^{1-m} l^{2+k+n+p} \rho^{2+k+n} \mu^{m+n-k-2} c^m g^n R^n \Delta t^n}{d^p}, \quad (7.53)$$

kur λ — vides siltumvadītspējas koeficients, $W/(m \cdot K)$; l — noteicošais ģeometriskais izmērs, m ; d — iekārtas diametrs, m ; ω — plūsmas ātrums, m/s ; ρ — vides blīvums, kg/m^3 ; μ — vides dinamiskā viskozitāte, $Pa \cdot s$; c — vides īpatnējā siltumietilpība konstantā spiedienā, $J/(kg \cdot K)$; β — termiskais izplešanās koeficients; Δt — temperatūru starpība starp sienu un vidi — vai otrādi, $^{\circ}C$.

Vienādojums (7.53) uzskatāms par siltumatdeves koeficienta raksturojošo fizikālo lielumu sakarību iespējamiem konvekcijas veidiem. Konstanti C un pakāpes k , m , n un p iegūst eksperimentāli. Nosakot pakāpes, dažas no tām vienādas ar nulli. Tad attiecīgais kritērijs atkrīt un formula α noteikšanai iegūst vienkāršāku veidu.

7.4. SILTUMATDEVES KOEFICIENTA NOTEIKŠANA

Siltuma atdeves galvenie veidi ir šādi:

- 1) *siltuma atdeve, videi nemainot agregātstāvokli*: siltuma apmaiņa brīvā un piespiedu konvekcijā, siltuma apmaiņa divfāžu vidēs;
- 2) *siltuma atdeve, videi mainot agregātstāvokli*: šķidrumam verdot, iztvaikojot, tvaikam kondensējoties, vielai mainot agregātstāvokli cietās fāzes (kristālu) klātbūtnē;
- 3) *siltuma atdeve īpašos apstākļos*: dispersās un bioloģiskās sistēmās, ēkās un būvēs, apkārtējā vidē u. c.

Šajā grāmatā aplūkoti tikai daži ķīmiskajā rūpniecībā biežāk sastopamie siltuma atdeves gadījumi. Sīku informāciju par jaunākajiem pētījumiem siltuma atdeves jomā iespējams iegūt speciālajā literatūrā.

7.4.1. Siltuma atdeve brīvā konvekcijā

Brīvā konvekcija veidojas, šķidrumam (gāzei) saskaroties ar karstu virsmu.

Sildot vides kustība rodas Arhimēda spēka ietekmē, kurš pārvieto uz augšu karstai virsmai tuvāk esošos sasildītos (mazāk blīvos) šķidruma (gāzes) slāņus. Atbrīvotajā telpā ieplūst aukstā vide. Dzesējot — karstam šķidrumam (gāzei) saskaroties ar aukstu virsmu, notiek pretējs process.

Brīvā konvekcijā izšķir lamināro un turbulento plūsmu. Apakšā, kur sākas sildvirsmā, ir laminārais režīms, augstāk — turbulenta. Plūsmas režīms atkarīgs no temperatūru starpības starp virsmu un šķidrumu (gāzi). Ja $\Delta t < 15^\circ\text{C}$, tad pārsvarā ir laminārais režīms, ja $\Delta t > 15^\circ\text{C}$, tad — turbulenta režīms.

Plūsmas režīms izsakāms ar kritēriju reizinājumu $Gr Pr$: ja $Gr Pr \leq 10^9$, tad plūsmai ir laminārais režīms; ja $Gr Pr > 10^9$, tad plūsmai ir turbulenta režīms.

Siltuma apmaiņa atkarīga no virsmas stāvokļa.

Brīvās konvekcijas siltumatdeves koeficientu vertikālām virsmām var raksturot ar vienādojumu:

$$Nu = C (Gr Pr)^m (Pr/Pr_s)^n \quad (7.54)$$

Konstante C un pakāpes m un n atkarīgas no plūsmas režīma. To vērtības atkarībā no plūsmas režīma sakopotas 7.2. tabulā.

7.2. tabula

C , m un n vērtības atkarībā no plūsmas režīma

Plūsmas režīms	$Gr Pr$	C	m	n
Laminārais	$\leq 10^9$	0,75	0,25	0,25
Turbulenta	$> 10^9$	0,15	0,33	0,25

Attiecība $(Pr/Pr_s)^{0,25}$ ir fizikālo īpašību maiņas korekcija atkarībā no temperatūras; pieņem, ka gāzēm šī attiecība vienāda ar 1.

Vertikālām plāksnēm noteicošais ģeometriskais izmērs, kas ievietojams kritērijos, ir plāksnes augstums, horizontālām — to garums plūsmas virzienā. Kritērijos (bez indeksa) ietilpstošie fizikālie lielumi attiecināmi uz virsmas un šķidrums (gāzes) vidējo temperatūru $t_{vid} = (t_s + t_g)/2$, kur t_s — sildvirsmas vidējā temperatūra; t_g — vides temperatūra. Kritērijā Pr_s ietilpstošie šķidrums (gāzes) fizikālie lielumi attiecināmi uz sildvirsmas vidējo temperatūru.

Horizontālām virsmām ar siltuma apmaiņu, kas vērsta uz augšu, siltuma atdeve ir labāka un siltumatdeves koeficients α_n ir par 20...30% lielāks nekā siltumatdeves koeficients α_v vertikālai virsmai, kas aprēķināts pēc formulas (7.54). Horizontālām virsmām ar siltuma apmaiņu, kas vērsta uz leju, siltuma atdeve ir mazāka par 15...30% nekā vertikālām virsmām.

Vertikālām caurulēm lietojams vienādojums (7.54). Nuselta un Grashofa kritērijos kā noteicošo ģeometrisko izmēru ievieto caurules augstumu.

Horizontāliem cilindriem (caurulēm), ja $10^3 < Gr Pr < 10^8$, siltumatdeves koeficientu var noteikt pēc vienādojuma

$$Nu = 0,5 (Gr Pr)^{0,25} (Pr/Pr_s)^{0,25}. \quad (7.55)$$

Šajos kritērijos kā lineāro izmēru ievieto diametru.

Ja caurule novietota *leņķī* φ *pret horizontu*, formulā (7.55) diametra d vietā jāliek $d' = \frac{d}{\cos \varphi}$.

Lodei, ja $10^3 < Gr Pr < 10^8$, siltumatdeves koeficienta noteikšanai lietojama šāda formula:

$$Nu = 0,56 (Gr Pr)^{0,25} (Pr/Pr_s)^{0,25}.$$

Ja $10^8 < Gr Pr < 10^{10}$, tad

$$Nu = 0,13 (Gr Pr)^{0,33}.$$

Kritērijos garuma vietā lieto lodes diametru.

7.4.2. Siltuma atdeve piespiedu konvekcijā

Siltumatdeves koeficients turbulentai plūsmai taisnā apaļā caurulē. Siltumatdeves koeficients taisnām apaļām caurulēm turbulentai plūsmai izsakāms ar šādu vispārīgu vienādojumu:

$$Nu = A Re^m Pr^n (Pr/Pr_s)^{0,25}. \quad (7.56)$$

Šķidrumiem (nemetāliskiem), ievērojot plūsmas virziena ietekmi, ja $Re = 10^4 \dots 5 \cdot 10^6$ un $Pr = 0.6 \dots 2500$, siltumatdeves koeficientu var noteikt šādi:

$$\text{sildot } (t_s > t_v) \quad Nu = 0,021 \varepsilon_l Pr^{0,43} Re^{0,8} (Pr/Pr_s)^{0,06}; \quad (7.57)$$

$$\text{dzesējot } (t_s < t_v) \quad Nu = 0,021 \varepsilon_l Pr^{0,43} Re^{0,8} (Pr/Pr_s)^{0,25}. \quad (7.58)$$

Koeficienta ϵ_l skaitliskās vērtības

Re	l/d								
	1	2	5	10	15	20	30	40	50 un vairāk
$1 \cdot 10^4$	1,65	1,50	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03	1
$2 \cdot 10^4$	1,51	1,40	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02	1
$5 \cdot 10^4$	1,34	1,27	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,02	1
$1 \cdot 10^5$	1,28	1,22	1,15	1,10	1,08	1,06	1,03	1,02	1
$1 \cdot 10^6$	1,14	1,11	1,08	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1

Prantla, Reinoldsa un Nuselta kritērijos ietilpstošie fizikālie lielumi attiecināmi uz šķidrums vidējo temperatūru, bet Prantla kritērijā Pr_s — uz sienas vidējo temperatūru (t_s — sienas temperatūra, °C; t_v — vides temperatūra, °C). Noteicošais garums ir caurules diametrs. Koeficients ϵ_l koriģē caurules garuma un diametra attiecības ietekmi uz α vērtību. Koeficienta ϵ_l skaitliskās vērtības dotas 7.3. tabulā.

Siltumatdeves koeficientu ietekmē caurules šķērsriezuma veids. Izmantojot formulas (7.57) un (7.58) neapaļām caurulēm (kanāliem), ja $Pr > 0,6$ un $Re > 7000$, diametra vietā formulās jāievieto ekvivalentais diametrs, t. i., $d_{ekv} = \frac{4S}{\kappa}$, kur S — plūsmas šķērsriezuma laukums, m^2 ; κ — perimetrs, m.

Liektām caurulēm (glodenēm) siltumatdeves koeficients ir lielāks nekā taisnām caurulēm, jo rodas spēcīgāka virpuļošana. Šādām caurulēm kritiskais Reinoldsa skaitlis arī ir lielāks nekā taisnām caurulēm (pārejas josla ir, ja $Re = 2 \cdot 10^4 \dots 3 \cdot 10^4$) un to aprēķina šādi:

$$Re_k = 2300 \dots 10\,500 \left(\frac{d}{R}\right)^{0,2}, \text{ kur } R \text{ — liekuma rādiuss, m.}$$

Siltumatdeves koeficientu liektām caurulēm aprēķina pēc tām pašām formulām kā taisnām caurulēm, tikai tas jāpareizina ar lielumu x , t. i., $\alpha_R = x\alpha$, kur α_R — siltumatdeves koeficients liektai caurulei, $W/(m^2 \cdot K)$; $x = 1 + 1,77 \frac{d}{R}$; d — caurules iekšējais diametrs, m. Glo-

denei $x = 1 + 3,54 \frac{d}{D}$, kur D — glodenes locījuma diametrs, m.

Formulas (7.57) un (7.58) nav lietojamas, ja caurulē ir paplašinājumi, sašaurinājumi vai arī pildījums. Jo lielāks šķidrums (gāzes) caurteces ātrums, jo lielāks arī siltumatdeves koeficients (pastiprinās konvekcija). Tas izskaidrojams tādejādi, ka, pieaugot caurteces ātrumam, samazinās robežkārtas biežums.

Šķidriem metāliem siltumatdeves koeficients ir citāds nekā parastajiem šķidrumiem vai gāzei. Te ievērojami lielāka nozīme ir siltuma vadišanai. Aptuvenos aprēķinos, ja $15\,000 > Pe > 300$, šķidriem metāliem α nosakāms šādi: $Nu = 5 + 0,021Pe^{0,75}$.

Ja $20 < Pe < 300$, tad $Nu = 0,7Pe^{0,33}$.

Kritērijos ietilpstošo fizikālo lielumu skaitliskās vērtības attiecina uz šķidrā metāla vidējo temperatūru.

Ja $\frac{l}{d} < 30$, iegūtā siltumatdeves koeficienta vērtība jāreizina ar koeficientu $\varepsilon_l = 1,72 \left(\frac{d}{l}\right)^{0,16}$.

Siltumatdeves koeficienta noteikšana pārejas intervālā. Siltumatdeve pārejas intervālā, kas taisnās caurulēs novērojama, ja Re mainās no 2300 līdz 10 000 (liektās caurulēs un šaurās taisnstūrveida šķēsgriezuma caurulēs Re daudz lielāks), ir ļoti nestabila. Tādēļ siltumatdeves koeficienta noteikšanas precizitāte pārejas intervālā nav liela. Siltumatdeves koeficientu pārejas intervālā var noteikt no 7.6. attēlā dotās līknes, iepriekš nosakot Re .

Siltumapmainītājus šajā režīmā nav ieteicams projektēt.

Siltumatdeves koeficients laminārai plūsmai taisnās caurulēs. Ar pietiekamu precizitāti siltumatdeves koeficientu laminārai plūsmai aprēķina pēc šādas formulas:

a) *apaļām caurulēm,*

ja $Pe \frac{d}{l} > 20$ un $\mu/\mu_s \leq 6,7 \cdot 10^{-4}$, tad $Nu = 1,55 \left(Pe \frac{d}{l} \right)^{0,33} (\mu/\mu_s)^{0,14}$;

ja $Pe \frac{d}{l} < 20$, tad $Nu = 3,66$;

b) *taisnstūrveida kanāliem,*

ja $Pe \frac{2\delta}{l} > 70$, tad $Nu = 1,85 \left(Pe \frac{2\delta}{l} \right)^{0,33}$;

ja $Pe \frac{2\delta}{l} \leq 70$, tad $Nu = 7,60$,

kur δ — kanāla plātums, m; l — kanāla garums, m.

Gāzēm attiecību μ/μ_s neņem vērā. Noteicošā temperatūra $t = (t_s + t_g)^{0,5}$, kur $t_g = (t_{g \text{ sāk}} + t_{g \text{ beig}})^{0,5}$.

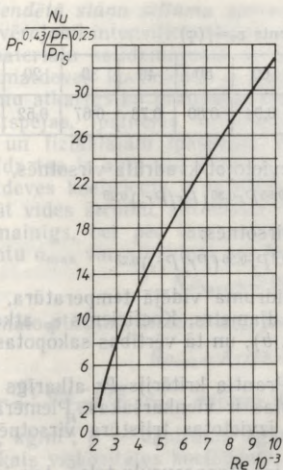
Siltumatdeves koeficients, šķidrūmam (gāzei) šķērsvirzienā apskalojot ribotu cauruļu kūli. Jebkādiem šķidrūmiem (gāzēm), ja $3 \cdot 10^3 < Re < 2,5 \cdot 10^4$ un $3 < \frac{d}{t} < 4,8$, siltumatdeves koeficientu var iegūt pēc šādas formulas:

$$Nu = C \left(\frac{d}{t} \right)^{-0,54} \left(\frac{h}{t} \right)^{-0,14} Re^n Pr^{0,4},$$

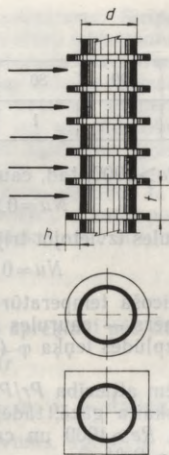
kur lielumi d , t , h doti 7.7. attēlā. Ja caurules novietotas kvadrāta virsotnēs, tad $C = 0,116$, $n = 0,72$; ja trijstūra virsotnēs (šahveidā), tad $C = 0,25$, $n = 0,65$. Noteicošā temperatūra — šķidrūma (gāzes) vidējā temperatūra, noteicošais izmērs — ribas solis t .

Gāzes (šķidrūma) plūsmai apskalojot caurules, tās ātrumu aprēķina attiecībā uz mazāko aktīvo šķēsgriezuma laukumu.

Rotējošas caurules siltumatdeves koeficients. Caurulei rotējot ap savu asi nekustīgā vidē, siltumatdeves koeficientu var noteikt pēc formulas (7.56). Ātruma vietā formulā jāievieto caurules virsmas lineārais ātrums.



7.6. att. Siltumatdeves koeficienta vērtības atkarībā no Reinoldsa skaitļa pārejas intervālā.



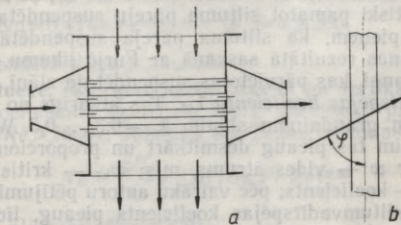
7.7. att. Ribotas caurules shēma.

Ja $Re = \frac{\omega d}{\nu} \leq 10^3$, tad $A = 10,6$; $m = 0$; $h = 0,35$.

Ja $10^3 < Re \leq 2,2 \cdot 10^3$, tad $A = 0,051$; $m = 0,76$; $n = 0,35$.

Siltuma atdeve, videi šķērsvirzienā apskalojot gludu cauruļu kūli. Aparātos ar vienreizēju perpendikulāru šķidruma plūsmu (7.8. att. a), ja $Re < 1000$, tad, caurules izvietojojot kvadrāta vai trijstūra virsotnēs:

$$Nu = 0,56 \epsilon_{\varphi} Re^{0,5} Pr^{0,36} (Pr/Pr_s)^{0,25}. \quad (7.59)$$



7.8. att. Starpcauruļu telpa ar vienreizēju perpendikulāru šķidruma (gāzes) plūsmu:

a — sildītājs, b — uzplādes leņķis φ .

Koeficients $\varepsilon_{\varphi} = f(\varphi)$

φ	90	80	70	60	50	40	30	20	10
ε_{φ}	1	1	0,98	0,94	0,80	0,78	0,67	0,52	0,42

Ja $Re > 1000$, tad, caurules izvietojot kvadrāta virsotnēs,

$$Nu = 0,22 \varepsilon_{\varphi} Re^{0,65} Pr^{0,36} (Pr/Pr_s)^{0,25}, \quad (7.60)$$

caurules izvietojot trijstūra virsotnēs:

$$Nu = 0,4 \varepsilon_{\varphi} Re^{0,6} Pr^{0,36} (Pr/Pr_s)^{0,25}. \quad (7.61)$$

Noteicošā temperatūra ir šķidrums vidējā temperatūra, noteicošais izmērs — caurules ārējais diametrs. Koeficients ε_{φ} atkarīgs no vides uzplūdes leņķa φ (7.8. att. b), un tā vērtības sakopotas 7.4. tabulā.

Gāzēm attiecība $Pr/Pr_s = 1$, Prantla kritērijs Pr atkarīgs tikai no atomu skaita gāzē, tādēļ formulas ir vienkāršākas. Piemēram, gaisam, ja $Re > 1000$ un caurules izvietotas trijstūra virsotnēs, $Nu = 0,356 \varepsilon_{\varphi} Re^{0,6}$.

Cauruļveida siltumapmainītājos starpcauruļu telpā, kur ievietotas šķērssienu, siltumatdeves koeficienta aprēķināšanai lietojamas formulas (7.59), (7.60) un (7.61), tikai $\varepsilon_{\varphi} = 0,6$.

Siltuma atdeve suspendētā (pseudosašķidrinātā) slānī. Siltuma apmaiņai suspendētā slānī ir tāda priekšrocība, ka iespējams vienmērīgs temperatūras sadalījums pa visu slāni. Salīdzinājumā ar stacionāru slāni suspendētā slāņa daļiņu kustība veicina ievērojamu siltumatdeves koeficienta palielināšanos starp slāni un sildvirsmu.

Suspendētā slānī iespējami trīs siltuma apmaiņas veidi:

1) siltuma pāreja pašā suspendētajā slānī; 2) suspendētā slāņa siltuma apmaiņa ar sildvirsmu; 3) siltuma apmaiņa pašā suspendētajā slānī starp šķidrums (gāzi) un cietajām daļiņām.

Siltuma pāreja pašā suspendētajā slānī. Siltumietilpība cietām daļiņām ievērojami lielāka nekā gāzei, tādēļ siltuma pāreju suspendētā slānī nosaka maisīšanas intensitāte. Cieto daļiņu sarežģītās kustības dēļ teorētiski pamatot siltuma pāreju suspendētajā slānī neizdodas. Tādēļ pieņem, ka siltuma pāreja suspendētā slānī notiek siltuma vadišanas rezultātā saskaņā ar Furjē likumu. Siltuma daudzuma noteikšanai, kas pārvietojas suspendētajā slānī, izmanto efektīvo siltumvadītspējas koeficientu λ_{ef} . Tas atkarīgs no vides ātruma.

Stacionāram graudainam slānim $\lambda_{ef} = 0,3 \dots 0,5$ W/(m·K), suspendētam slānim tas pieaug desmitkārt un proporcionāli izteiksmei $(\omega - \omega_{kr})^k$, kur ω — vides ātrums, m/s; ω_{kr} — kritiskais vides ātrums, m/s; k — koeficients; pēc vairāku autoru pētījumiem $k \approx 1 \dots 2$.

Efektīvais siltumvadītspējas koeficients pieaug, līdz suspendētā slāņa tilpums palielinās 1,5...1,7 reizes, tālāka tilpuma palielināšanās samazina λ_{ef} . Šķēršļi, kas ievietoti suspendētā slānī, samazina λ_{ef} , jo traucē cieto daļiņu plūsmu.

Suspendētā slāņa siltuma apmaiņa ar sildvirsmu. Suspendētais slānis ievērojami intensificē siltuma apmaiņu starp sildvirsmu un disperso materiālu salīdzinājumā ar šāda materiāla stacionāro slāni.

Siltumatdeves koeficients α suspendētam slānim attiecībā pret sildvirsmu atkarīgs no graudainā materiāla īpašībām (izmēriem, siltumvadītspējas, īpatnējās siltumietilpības) un no plūstošās vides ātruma un fizikālajām īpašībām. Palielinot šķidrums (gāzes) ātrumu, līdz tas ir aptuveni divas reizes lielāks par kritisko ātrumu, siltumatdeves koeficients α sasniedz maksimālo vērtību. Ja turpina palielināt vides ātrumu, siltumatdeves koeficients α kādā posmā paliek nemainīgs, bet pēc tam samazinās. Maksimālo siltumatdeves koeficientu α_{\max} var aprēķināt pēc formulas

$$Nu_{\max} = 0,86Ar^{0,2}. \quad (7.62)$$

Optimālo plūsmas ātrumu ω_{opt} iespējams aprēķināt pēc izteiksmes

$$Re_{\text{opt}} = Ar/18 + 5,22\sqrt{Ar},$$

kur $Ar = \frac{d^3 \rho (\rho_d - \rho) g}{\mu^2}$, d — daļiņas diametrs, m; ρ_d — daļiņu bēruma blīvums, kg/m³; ρ — šķidrums (gāzes) blīvums, kg/m³; μ — vides dinamiskais viskozitātes koeficients, Pa·s; g — brīvās krišanas paātrinājums, m/s².

$$Nu_{\max} = \alpha_{\max} l / \lambda; \quad Re_{\text{opt}} = \omega_{\text{opt}} \rho d / \mu,$$

kur l — sildvirsmas izmērs pa vertikāli, m.

Liela diametra daļiņām vienādojums (7.62), ja $Ar > 10^8$, nedod pareizu rezultātu, tad ieteicams lietot vienādojumu

$$Nu_{\max} = 0,85Ar^{0,19} + 0,006Ar^{0,5}Pr^{0,33}.$$

Pēc šī vienādojuma var iegūt apmierinošas α_{\max} vērtības, ja $Ar = 10^8 \dots 10^9$.

Siltuma apmaiņa pašā suspendētajā slāni starp šķidrumu (gāzi) un cietajām daļiņām. Siltumatdeves koeficientu aptuveni (precīzu formulu nav) var aprēķināt pēc formulām

$$Nu = 1,6 \cdot 10^{-2} (Re/\varepsilon)^{1,3} Pr^{0,33}, \quad \text{ja } Re/\varepsilon < 200; \quad (7.63)$$

$$Nu = 0,4 (Re/\varepsilon)^{0,4} Pr^{0,33}, \quad \text{ja } Re/\varepsilon > 200, \quad (7.64)$$

kur ε — suspendētā slāņa porainība.

Siltuma atdeve, šķidrums kārtai plūstot pa vertikālu virsmu. Siltumatdeves koeficientu, šķidrums kārtai turbulenti plūstot pa vertikālu virsmu ($Re > 2300$), aprēķina pēc šādas formulas:

$$Nu = \frac{\alpha H}{\lambda} = 0,01 (Ga Pr Re)^{0,33}.$$

Laminārai plūsmai ($Re < 2300$):

$$Nu = 0,67 (Ga^2 Pr^3 Re)^{\frac{1}{9}},$$

kur $Nu = \frac{\alpha H}{\lambda}$; $Re = \frac{\omega d_{ekv} \rho}{\mu}$; $Ga = \frac{H^3 \rho^2 g}{\mu^2}$; H — virsmas augstums, m.

Fizikālie lielumi kritērijos attiecināmi uz šķidruma vidējās kārtas temperatūru $t_{vid} = (t_s + t_{šk})0,5$, kur t_s — sienas temperatūra, °C; $t_{šk}$ — šķidruma temperatūra, °C.

Ja šķidrums plūst pa caurules iekšējo virsmu, tad

$$d_{ekv} = \frac{4(d - \delta)\delta}{d},$$

kur d — caurules iekšējais diametrs, m; δ — kārtas biezums, m.

Ja siltumapmainītājs sastāv no n caurulēm un sekundē iztek G kg šķidrums, tad

$$\omega = G / (Sn\rho) = G / (\pi(d - \delta)\delta n\rho),$$

$$Re = \omega d_{ekv} \rho / \mu = 4G / (\pi d n \mu).$$

Ja $Re \leq 1500$, tad δ iegūst šādi:

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{3G\mu}{\pi\rho^2 g}}.$$

Ja šķidrums plānā kārtā plūst uz leju, bet caurulē uz augšu pārvietojas gāze, tad siltumatdeves koeficients starp gāzi un šķidrumskārtu nosakāms pēc šādas formulas:

$$Nu = 0,028 Re^{0,8}.$$

Siltumatdeves koeficients, videi plūstot gar plakānu virsmu. Turbulentai plūsmai, kad $10^5 < Re < 5 \cdot 10^5$, siltumatdeves koeficientu aprēķina pēc šādas formulas:

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} = 0,037 Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr/Pr_s)^{0,25}.$$

Gaisam šī formula vienkāršojas: $Nu = 0,032 Re^{0,8}$.

Kritēriju Nu , Re un Pr formulās fizikālos lielumus attiecina uz plūsmas sākuma temperatūru, bet kritērijam Pr_s — uz virsmas temperatūru.

Kritēriji nosakāmi šādi: $Re = \frac{\omega l}{\nu}$ un $Pr = \frac{\nu}{a}$, kur l — virsmas izmērs plūsmas virzienā, m.

Laminārai plūsmai, kad $Re < 10^5$, tad $Nu = 0,66 Re^{0,5} Pr^{0,33} \times (Pr/Pr_s)^{0,25}$.

Gaisam lietojama šāda formula: $Nu = 0,66 Re^{0,5}$.

Ja laminārai plūsmai ir brīvā konvekcija, tad siltumatdeves koeficients jānosaka arī brīvajai konvekcijai un turpmākiem aprēķiniem jālieto lielākais siltumatdeves koeficients.

Siltuma atdeve, šķidrums maisot. Ķīmijas tehnoloģijā procesus bieži veic maisot, pievadot vai aizvadot siltumu.

Iekārtās, kurās vienlaikus notiek vides maisīšana un siltuma apmaiņa, siltumatdeves koeficientu nosaka, lai aprēķinātu nepieciešamo sildvirsmu (dzesēšanas virsmu).

Ja silda ar glodeni vai apvalku un aparātā ievietots maisītājs, siltumatdeves koeficientu nosaka šādi:

$$Nu = \alpha \frac{d_m}{\lambda} = C Re^m Pr^{0,33} (\mu/\mu_s)^{0,14} G^{-1}, \quad (7.65)$$

kur $Re = \frac{nd_m \rho}{\mu}$; $Pr = \frac{c\mu}{\lambda}$; $G = \frac{D}{d_m}$; D — tvertnes diametrs, m; λ — šķidrums siltumvadītspējas koeficients, W/(m·K); ρ — šķidrums blīvums, kg/m³; n — maisītāja apgriezieni, s⁻¹; d_m — maisītāja diametrs, m; c — īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K); μ_s — šķidrums dinamiskā viskozitāte sienas temperatūrā šķidrums pusē, Pa·s; μ — dinamiskā viskozitāte šķidrums vidējā temperatūrā, Pa·s.

Iekārtām ar apvalku $C=0,36$, $m=0,67$, iekārtām ar glodeni $C=0,87$, $m=0,62$. Kritēriju formulās fizikālos lielumus attiecina uz šķidrums vidējo temperatūru (izņēmums ir μ_s) ($t_{s\text{ vid}} + t_s$)/0,5.

Formula (7.65) lietojama, ja $Re=2 \cdot 10^2 \dots 4 \cdot 10^5$, un tā dod labus rezultātus lāpstiņu, propellerveida un turbīnveida maisītājiem, ja $G=D/d_m=2,5 \dots 4$ un D ir līdz 1,5 m.

Tvertnēs ievietotie atsietena vairogī, kas veicina virpuļu rašanos, uzlabo siltumatdevi.

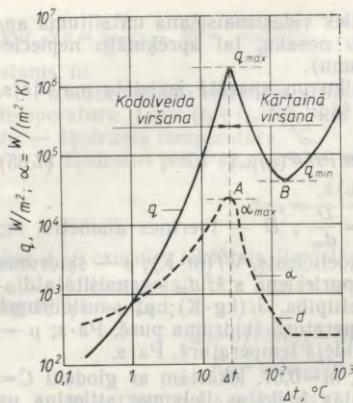
7.4.3. Siltuma atdeve, šķidrums verdot

Atkarībā no tā, kā veidojas tvaiks un notiek siltuma apmaiņa, izšķir trīs viršanas veidus.

Pirmais viršanas veids novērojams tad, ja temperatūru starpība Δt starp sildvirsmu un tvaiku virs verdošā šķidrums ir neliela. Tad raksturīga *mazintensīva viršana*. Siltums plūsmas blīvums q ir neliels. Ūdenim mazintensīva viršana novērojama, ja q ir līdz 5800 W/m² un Δt līdz 5 °C. Siltumatdeves koeficientu α pirmajam viršanas veidam aprēķina pēc brīvās konvekcijas formulas (7.54).

Paaugstinot temperatūru starpību Δt , siltumatdeves koeficients α un siltuma plūsmas blīvums q strauji pieaug (7.9. att.). Tas izskaidrojams tādējādi, ka veidojas daudz tvaika burbuliņu (kodolu), kas, ceļoties uz augšu, intensīvi sajauc šķidrums un veicina siltuma apmaiņu. Šādu viršanu sauc par *kodolveida viršanu*.

Šinī posmā siltumatdeves koeficients un siltuma plūsmas blīvums ļoti strauji palielinās, sasniedzot maksimumu. Ūdenim virstot parastajos apstākļos, šis posms novērojams, kad $\Delta t=5 \dots 25$ °C, bet $q=5,8 \cdot 10^3 \dots 1,16 \cdot 10^6$ W/m². Siltumatdeves koeficients sasniedz maksimālo vērtību. Temperatūru starpības Δt tālāka palielināšana (aiz punkta A 7.9. att.) siltumatdeves koeficientu α un siltuma plūsmas blīvumu q ievērojami samazina. Tas izskaidrojams tādējādi, ka, palielinot temperatūru starpību, tvaika burbuļu veidošanās



7.9. att. Siltuma plūsmas blīvuma q un siltumatdeves koeficienta α maiņa, ūdenim verdot atmosfēras spiedienā.

pārāk lielu temperatūru starpību starp sildvirsmu un šķidrumu.

Bez minētajiem viršanas veidiem vēl novēro *mikroviršanu* jeb *lokālo viršanu*. Tā notiek, ja šķidruma temperatūra ievērojami zemāka par tvaika temperatūru. Tad tvaika burbuļi, kas rodas uz sildvirsmas, nenasniedzot šķidruma virsmu, kondensējas. Ar šādu viršanas veidu sastopas, piemēram, lielā šķidruma tilpumā ieliekot sakaršētu priekšmetu, dažreiz tas novērojams arī caurulēs.

Pāreju no kodolveida viršanas uz kārtaino viršanu sauc par *kritisko viršanu*. Dažādiem šķidrumiem kritiskais siltuma plūsmas blīvums ir dažāds, piemēram, ūdenim atkarībā no sildvirsmas materiāla $q_{kr} = 6,3 \cdot 10^5 \dots 1,29 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$; etilspirtam $q_{kr} = 1,73 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ (ja ir alumīnija sildvirsmā); etilacetātam $q_{kr} = 1,3 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ (alumīnija sildvirsmā); metilspirtam $q_{kr} = 3,93 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ (vara sildvirsmā) utt.

Kritisko siltuma plūsmas blīvumu q_{kr} šķidrumiem, kas slapina sildvirsmu, var aprēķināt pēc šādas formulas:

$$q_{kr} = 3,38 \cdot 10^4 \frac{\lambda^{0,5} (\rho - \rho_t)^{0,542} (\rho_t r T_v)^{0,333} \sigma^{0,042}}{\rho^{0,417} c^{0,167}}, \quad (7.66)$$

kur λ — šķidruma siltumvadītspējas koeficients, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; ρ — šķidruma blīvums, kg/m^3 ; ρ_t — tvaika blīvums, kg/m^3 ; r — šķidruma iztvaikošanas siltums, J/kg ; T_v — šķidruma viršanas temperatūra, K ; σ — virsmas spraigums starp šķidrumu un tvaiku, N/m ; c — šķidruma īpatnējā siltumietilpība, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$. Nosakot q_{kr} , fizikālos lielumus formulā attiecina uz viršanas temperatūru.

centru skaits pieaug tiktāl, ka tie saplūst kopā un veido tvaika kārtiņu, kas atdala sildvirsmu no verdošā šķidruma; līdz ar to pasliktinās siltuma apmaiņa. Šādu režīmu sauc par *kārtaino viršanu*. Protams, šāda tvaika kārtiņa nav stabila — tā pārtūkst, veido lielus tvaika burbuļus, atkal atjaunojas utt.

Aiz punkta B (7.9. att.) sākas stabila kārtainā viršana. Šajā posmā, palielinoties Δt , pieaug arī q , jo siltuma pāreja caur tvaika kārtiņu siltuma vadīšanas, konvekcijas un starošanas rezultātā kļūst arvien intensīvāka.

Šķidrumu viršanas analīze rāda, ka siltuma apmaiņas uzlabošanai nav ieteicams pārsniegt viršanas otro veidu — kodolveida viršanu, t. i., radīt

Koeficienta φ vērtības

Vide	φ	Vide	φ
Benzols	0,31	Ūdens	1,00
Etilspirts	0,45	9% NaCl ūdens šķīdums	0,86
Gazolīns	0,27	24% NaCl ūdens šķīdums	0,62
Heptāns	0,46	26% glicerīna ūdens šķīdums	0,83
Metilspirts	0,36	25% cukura ūdens šķīdums	0,57
Petroleja	0,31...0,56	10% Na ₂ SO ₄ ūdens šķīdums	0,91

Kodolveida viršanai lielos tilpumos un caurulēs, kad siltuma plūsmas blīvums mazāks par kritisko, siltumatdeves koeficientu aptuveni aprēķina pēc formulas

$$\alpha = 0,075 [1 + 10(\rho_t / (\rho - \rho_t))^{2/3}] (\lambda^2 / \nu \sigma T)^{1/3} q^{2/3}, \quad (7.67)$$

kur ν — kinemātiskais viskozitātes koeficients, m²/s; q — siltuma plūsmas blīvums, W/m². Fizikālo lielumu (izņēmums ir ρ_t) skaitliskās vērtības noteiktas viršanas temperatūrā.

Lai aptuveni aprēķinātu α kodolveida viršanai spiedienā 0,02... 1 MPa un siltuma plūsmas blīvumam līdz 0,4 q_{kr} , izmanto izteiksmi

$$\alpha = 2,72 \cdot 10^{-2} \varphi p_{abs}^{0,4} q^{0,7},$$

kur p_{abs} — absolūtais spiediens, Pa; φ — koeficients, kas ietver šķidruma fizikālās īpašības. Krāsaino metālu sildvirsmām φ vērtības dotas 7.5. tabulā.

Šķidrumu un šķīdumu kodolveida viršanai vertikālās viršanas caurulēs (ietvaicētajos, iztvaicētajos) brīvā cirkulācijā siltumatdeves koeficienta α noteikšanai lietojama šāda formula:

$$\alpha = A q^{0,6}, \quad (7.68)$$

kur $A = 780 \frac{\lambda^{1,3} \rho^{0,5} \rho_t^{0,06}}{\sigma^{0,5} \nu^{0,6} \rho_0^{0,06} c^{0,3} \mu^{0,3}}$.

Fizikālie lielumi bez indeksiem attiecas uz šķidro fāzi un ir tādi paši kā formulā (7.67); ρ_0 , ρ_t — tvaika blīvumi spiedienā 0,1 MPa un darba spiedienā; c — šķidrās fāzes īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K); μ — dinamiskā viskozitāte, Pa·s.

Lai noteiktu siltumatdeves koeficientu, šķīdriem verdot, jāpieņem siltuma plūsmas blīvuma vērtība, un pēc α aprēķināšanas pieņemtā vērtība jāpārbauda.

7.4.4. Siltuma atdeve, tvaikam kondensējoties

Tvaikam kondensējoties uz sildvirsmas, iespējami divi kondensācijas veidi — *kārtainā kondensācija* un *pilienu kondensācija*. Kārtainā kondensācijā kondensāts plānā kārtiņā pārklāj visu virsmu,

pilienu kondensācijā tas rodas uz virsmas atsevišķu pilienu veidā, kuri, sasniedzot zināmu lielumu, noripo no virsmas.

Pilienu kondensācijā tvaiks brīvi piekļūst sildvirsmi, tādēļ siltuma atdeve ir ievērojami labāka nekā kārtainajā kondensācijā. Pēc dažu autoru datiem, pilienu kondensācijā α sasniedz pat 116 000 W/(m²·K).

Pilienu kondensācija iespējama tikai tad, ja virsma īpaši sagatavota un kondensāts to neslapina. Šim nolūkam virsmu pārklāj ar īpašām vielām — *hidrofobizatoriem*. To pašu panāk, pievienojot hidrofobizatorus tvaikam. Parasti par hidrofobizatoriem lieto stearīnskābi vai oleīnskābi vai to sāļus, kā arī merkaptānus (uz vara vai tā sakausējumu virsmām). Petroleja, minerāleļļas rada islaicīgu efektu, jo viegli noskalojas.

Parasti sildišanas (kondensēšanas) iekārtās, it īpaši, ja tvaika ātrums $w > 10$ m/s, novērojama kārtainā kondensācija. Udens tvaikam kondensējoties, bieži uz vienas sildvirsmas vienlaikus novērojami abi kondensācijas veidi.

Kārtainajā kondensācijā viss kondensācijas siltums pārvietojas cauri kondensāta kārtiņai. Tā kā kondensāta kārtiņas plūsma parasti ir lamināra, tad siltuma apmaiņa notiek siltuma vadīšanas rezultātā. Pētījumi rāda, ka kondensāta kārtiņas virsma ir viļņota (pseudolamināra plūsma).

Tvaikam kondensējoties uz vertikālām caurulēm, kas garākas par 7,5 m, siltumatdeves koeficients uz virsmas zināmu laiku ir nemainīgs un pēc tam pieaug. Tas izskaidrojams ar kondensāta kārtiņas plūsmas režīma maiņu no laminārā uz turbulento caurules apakšējā daļā.

Kondensāta kārtiņas laminārai plūsmai siltumatdeves koeficientu var izteikt ar šādu vispārīgu formulu:

$$Nu = C(Ga Pr Ku)^n,$$

kur C — vertikālām caurulēm 2,04; horizontālām — 1,28; $Ga = \frac{l^3 \rho^2}{\mu^2}$ — Galileja kritērijs; l — vertikālām caurulēm vienāds ar augstumu H ; horizontālām — ar diametru d , m; $Pr = \frac{c\mu}{\lambda}$ — Prantla kritērijs; $Ku = \frac{r}{c\Delta t}$ — Kutateladzes kritērijs; $\Delta t = t_t - t_s$ — tvaika t_t un sienas t_s temperatūru starpība; n — vertikālām un horizontālām caurulēm 0,25.

Ievietojot attiecīgās kritēriju izteiksmes, iespējams iegūt siltumatdeves koeficienta formulas jebkuru tvaiku kārtainai kondensācijai. Vertikālām caurulēm vai sienām

$$\alpha_v = 2,04 \epsilon_t \sqrt[4]{\frac{r \rho^2 \lambda^3}{\mu \Delta t H}}, \quad (7.69)$$

kur r — īpatnējais kondensācijas siltums, J/kg; ρ — kondensāta blīv-

vums, kg/m^3 ; λ — kondensāta siltumvadītspējas koeficients, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; μ — kondensāta dinamiskā viskozitāte, $\text{Pa}\cdot\text{s}$.

— Īpatnējais kondensācijas siltums jānosaka kondensācijas temperatūrā t_t , bet lielumi λ , μ un ρ — kondensāta vidējā temperatūrā, t. i., $t_{\text{vid}} = (t_t + t_s)/2$.

Koeficients ε_t aprēķināms pēc formulas

$$\varepsilon_t = [(\lambda_s/\lambda)^3 \mu/\mu_s]^{0,125},$$

kur λ_s , μ_s — attiecīgi kondensāta siltumvadītspējas koeficients un dinamiskais viskozitātes koeficients sildvirsmas temperatūrā.

Koeficients ε_t ir ievērojami liels, ja kondensējas tvaiki, kas veido viskozus kondensātus, un ja ir liela temperatūru starpība Δt . Ūdens tvaikam $\varepsilon_t = 1$.

Formula (7.69) lietojama kondensāta laminārai plūsmā. Turbulentam režīmam iegūst samazinātu siltumatdeves koeficientu.

Ūdens tvaikam kondensējoties, siltumatdeves koeficienta noteikšanai formula (7.69) pārveidojama šādi:

$$\alpha = 2,04 \frac{A}{(H\Delta t)^{0,25}}.$$

Siltuma plūsmu cauri sildvirsmā var izteikt ar vienādojumu

$$\Phi = \alpha \Delta t S,$$

kur Φ — siltuma plūsma, W ; $S = \pi dnH$ un n — cauruļu skaits; tad $\Phi = \alpha \Delta t \pi ndH$.

No otras puses, ja kondensējas G kg/s tvaika, siltuma plūsmu var izteikt arī šādi:

$$\Phi = Gr \text{ vai } Gr = \alpha \Delta t \pi ndH \text{ un } H\Delta t = \frac{Gr}{\alpha \pi dn},$$

kur r — īpatnējais kondensācijas siltums, J/kg .

Ievietojot šo izteiksmi formulā (7.69), iegūst

$$\alpha = 3,78 \varepsilon_t \lambda \sqrt[3]{\frac{\rho^2 dn}{\mu G}}. \quad (7.70)$$

Kondensējoties ūdens tvaikam, formula (7.70) pārveidojama šādi:

$$\alpha = 3,78B \sqrt[3]{\frac{dn}{G}}.$$

Koeficienta B vērtības dotas 7.6. tabulā.

Formulā (7.70) neietilpst lielumi Δt un H , tādēļ to dažreiz ērtāk lietot α noteikšanai nekā formulu (7.69).

Siltumatdeves koeficienta noteikšanai kondensāta kārtiņas turbulentai plūsmā lieto šādu izteiksmi:

$$\alpha = 4,9 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\lambda^3 \rho \Delta t H}{\mu^3 r} \right]^{0,5}. \quad (7.71)$$

Koeficientu A un B vērtības atkarībā no ūdens tvaika kondensācijas temperatūras

$t_k, ^\circ\text{C}$	100	110	120	140	160	180
A	6960	7100	7240	7420	7490	7520
B	1010	1040	1070	1120	1150	1170

Šī formula izmantojama, ja $Re_{kr} > 400$. Jāatzīmē, ka kondensāta kārtiņas plūsmas dažādi autori dod dažādas kritiskā Reinoldsa skaitļa vērtības ($Re_{kr} = 60 \dots 525$).

Reinoldsa skaitli plūstošai šķidrums kārtiņai aprēķina pēc formulas

$$Re = 4G/\pi d n \mu = 1,27G/dn\mu,$$

kur μ — kondensāta dinamiskais viskozitātes koeficients, Pa·s.

Tvaikiem kondensējoties uz horizontālu cauruļu kūļa, vidējo siltumatdeves koeficientu izsaka šādi:

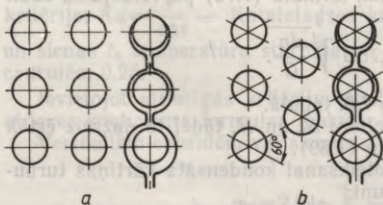
$$\alpha_h = 1,28 \varepsilon \varepsilon_t \sqrt[4]{\frac{r \lambda^3 \rho^2}{\mu \Delta t d}} = 2,02 \varepsilon \varepsilon_t \lambda \sqrt[3]{\frac{\rho^2 n l}{\mu G}}, \quad (7.72)$$

kur d — caurules ārējais diametrs, m; l — caurules garums, m. Pārējie apzīmējumi tie paši, kas formulā (7.70).

Formulu (7.72) var pārveidot šādi:

$$\alpha_h = 1,28 \varepsilon \frac{A}{(d \Delta t)^{0,25}} = 2,02 \varepsilon B \sqrt{\frac{n l}{G}}.$$

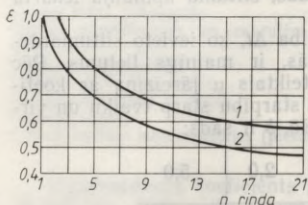
Horizontālam cauruļu kūlim, kas izvietots vairākās rindās, siltumatdeves koeficients mainās līdz ar cauruļu izvietojumu, jo kondensāta kārtiņas biežums nākamajās rindās atkarīgs no šī izvietojuma veida (7.10. att.). Kondensāta kārtiņa pieaug virzienā no augšas uz leju, bez tam samazinās caurplūstošā tvaika daudzums, tādēļ tālākās cauruļu rindās (no augšas uz leju) α samazinās. Minētajiem gadījumiem vidējo siltumatdeves koeficientu iegūst šādi:



7.10. att. Horizontālais cauruļu izvietojums:
a — kvadrāta virsotnēs, b — trijstūra virsotnēs (šahveidā).

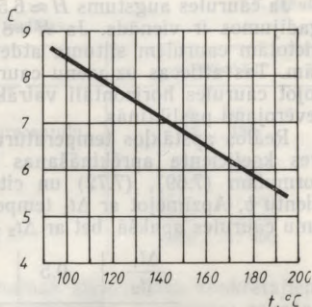
$$\alpha_{vid} = \varepsilon \alpha_h,$$

kur α_h — aprēķina pēc formulas (7.72); ε iegūst no 7.11. attēla atkarībā no cauruļu izvietojuma.



7.11. att. Koeficients ε atkarībā no cauruļu rindu skaita (skaitot no augšas):

1 — cauruļu izvietojums kvadrāta virsotnēs, 2 — cauruļu izvietojums šahveidā.



7.12. att. Koeficienta C vērtības.

Tvaikam kondensējoties glodenēs un horizontālās caurules iekšpusē, siltumatdeves koeficientu var aprēķināt pēc formulas

$$\alpha = 1,36Cq^{0,5}l^{0,35}d^{-0,25},$$

kur C — koeficients, kas ietver kondensāta un tvaika fizikālos lielumus (tā vērtības atkarībā no kondensācijas temperatūras dotas 7.12. attēlā); q — siltuma plūsmas blīvums, W/m^2 ; l — caurules garums, m ; d — caurules iekšējais diametrs.

Nav ieteicams veidot garas glodenes. Garās glodenēs to apakšējā daļā uzkrājas kondensāts un pazeminās tvaika spiediens, līdz ar to samazinās temperatūru starpība starp tvaiku un sienu.

Ja vidējā temperatūru starpība $\Delta t = 30 \dots 40^\circ C$, tad pieļaujamā maksimālā attiecība $(l/d)_{max}$ atkarībā no tvaika spiediena ieteicama šāda:

p, MPa	0,5	0,3	0,15	0,08
$(l/d)_{max}$	275	225	175	125

Ja Δt ir ar citu vērtību, tad ar tvaiku apsildāmām glodenēm attiecība $(l/d)_{max}$ jāpareizina ar koeficientu $6/\sqrt{\Delta t}$.

Dalot formulu (7.72) ar formulu (7.69), iegūst, ka

$$\alpha_h = 0,62\varepsilon \sqrt[4]{\frac{H}{d}} \alpha_v,$$

kur α_h — siltumatdeves koeficients horizontālai caurulei; α_v — siltumatdeves koeficients vertikālai caurulei.

Ja caurules augstums $H \approx 6,5d$, tad siltumatdeves koeficients abos gadījumos ir vienāds. Ja $H = 81d$, tad $\alpha_n \approx 1,88\alpha_v$. Horizontāli novietotām caurulēm siltuma atdeve ir labāka nekā vertikāli novietotām. Tas attiecas uz vienu cauruli vai pirmo cauruļu rindu. Novietojot caurules horizontāli vairākās rindās, siltuma apmaiņa iekārtā ievērojami pasliktinās.

Reālos apstākļos temperatūru starpība Δt , ko ievieto siltumatdeves koeficienta aprēķināšanas formulās, ir mainīgs lielums. Pēc formulām (7.69), (7.72) un citām noteiktais α jāreizina ar koeficientu b . Apzīmējot ar Δt_1 temperatūru starpību starp tvaiku un virsmu caurules apakšā, bet ar Δt_2 — augšā, b ir šāds:

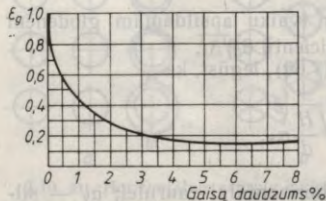
$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}$	0,5	1,0	2,0	5,0
b	0,96	1,0	1,06	1,15

Tvaikam kondensējoties, siltumatdeves koeficientu α ietekmē arī tvaika plūsmas virziens. Ja tvaika plūsma un kondensāta plūsma vērstas vienā virzienā, kondensāta ātrums pieaug, tā kārtiņas biežums samazinās un uzlabojas siltuma atdeve. Turpretī, ja tvaika plūsmas virziens ir pretējs un tvaika ātrums ir neliels, tvaiks bremsē kondensāta plūsmu, tādēļ tā kārtiņas biežums pieaug un siltuma apmaiņa pasliktinās. Tvaikam plūstot preti kondensātam ar lielu ātrumu, tas atrauj kondensātu no virsmas un siltuma apmaiņa uzlabojas.

Tvaikam kondensējoties, nekondensējamo gāzu (gaisa) piemaisījumi ievērojami samazina siltumatdeves koeficientu, jo ap sildvirsmu veidojas nekondensējamās gāzes kārtā, caur kuru tvaika molekulas var pārvietoties difundējot. Tādēļ jā rūpējas, lai nekondensējamās gāzes no siltumapmainītājiem tiktu savlaicīgi aizvadītas.

Ja tvaikā ir gaisa piemaisījumi, tad pēc iepriekš minētajām formulām aprēķinātais siltumatdeves koeficients jāreizina ar koeficientu ϵ_g , ko nosaka pēc 7.13. attēlā dotās liknes. Ja tvaikā ir 1% gaisa, siltuma atdeve pasliktinās aptuveni par 60%.

Ja ūdens tvaikam (spiedienā 0,1 MPa) siltumatdeves koeficientu pieņem par 100%, tad sērskābei tas aptuveni ir 80%, amonjakam — 70%, oglekļa dioksīdam — 50%, etilspirtam — 25% un benzolam — 20%.



7.13. att. Koeficienta ϵ_g vērtība.

Pārkarsēta tvaika kondensācijas aprēķiniem lietojamas tās pašas formulas, kuras lieto piesātinātam tvaikam, tikai r vietā jāievieto šāda summa: $r' = r + c_t(t_p - t_k)$, kur c_t — pārkarsēta tvaika īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K); t_p — pārkarsēta tvaika temperatūra, °C; t_k — kondensācijas temperatūra, °C.

Aptuvenās α vērtības

Siltuma atdeves veidi	α , W/(m ² ·K)
Gāzēm brīvā konvekcijā	6 ... 35
Gāzēm pārvietojoties pa caurulēm vai starpcauruļū telpā	12 ... 120
Tvaikam pārkarsētājā	120 ... 2300
Ūdenim brīvā konvekcijā	120 ... 1200
Ūdenim cirkulējot caurulēs	580 ... 11 600
Ūdenim verdot	2300 ... 11 600
Ūdens tvaikam kondensējoties (piesātinātam)	4600 ... 17 400

Siltumatdeves koeficients krasi mainās atkarībā no konkrētajiem apstākļiem. Aptuvenās siltumatdeves koeficienta α izmaiņas robežas sakopotas 7.7. tabulā.

Piesātinātam ūdens tvaikam kondensējoties siltumapmainītājos, ar praksei pietiekamu precizitāti pieņem, ka siltumatdeves koeficients vienāds ar 10 000 ... 12 000 W/(m²·K).

7.5. SILTUMA PĀREJA [PĀRNESE] NEMAINĪGĀ TEMPERATŪRĀ

Līdz šim tika aplūkota siltuma izplatīšanās vadišanas, starošanas un konvekcijas rezultātā. Reālos apstākļos jāstopas ar jauktiem siltuma izplatīšanās veidiem, kad vienlaikus notiek starošana un konvekcija vai pat visi trīs siltuma apmaiņas veidi.

Jaukta siltuma apmaiņa var notikt nemainīgos un mainīgos temperatūras apstākļos.

Siltuma atdeve, kurā vienlaikus noris starošana un konvekcija. Siltuma apmaiņas iekārtās, kur virsma saskaras ar gāzveida vidi, siltuma vienlaikus izplatās konvekcijas un starošanas rezultātā, piemēram, iekārtas sildīšana ar gaisu vai dūmgāzēm, siltumapmaiņas iekārtu siltuma zudumi apkārtējā vidē u. c.

Ja sienas temperatūra t_s lielāka par vides temperatūru t_v (var būt arī otrādi) un ja vide ir gāzveida, tad konvekcijas siltums Φ_k un starošanas siltums Φ_{st} aizplūst no virsmas vienlaikus. Kopējo no virsmas aizplūstošo siltuma plūsmu izsaka vienādojums

$$\Phi = \Phi_k + \Phi_{st} \quad (7.73)$$

No iepriekšteiktā zināms, ka

$$\Phi_k = \alpha(t_s - t_v)S, \quad (7.74)$$

kur Φ_k — siltuma plūsma konvekcijas rezultātā, W; α — siltumatdeves koeficients, W/(m²·K); S — virsma, kas piedalās siltuma apmaiņā, m².

Siltumu, kas aizplūst starojot, var noteikt pēc formulas (7.33), to reizinot un dālot ar izteiksmi $t_s - t_v$. Tad iegūst

$$\Phi_{st} = \frac{C_{1-2}[(T_s/100)^4 - (T_v/100)^4]\varphi}{t_s - t_v} (t_s - t_v)S. \quad (7.75)$$

Vienādojuma (7.75) izteiksmi $\frac{C_{1-2}[(T_s/100)^4 - (T_v/100)^4]q}{t_s - t_v}$ apzīmē ar α_{st} . Siltuma starošanas vienādojums tad uzrakstāms šādi:

$$\Phi_{st} = \alpha_{st}(t_s - t_v)S. \quad (7.76)$$

Koeficientu α_{st} sauc par tiešo *siltumatdeves koeficientu*. Tas rāda siltuma daudzumu, ko starojot atdod (uzņem) 1 m² virsmas 1 sekundē, ja temperatūru starpība starp virsmu un vidi ir 1°C.

No vienādojuma (7.76) iegūst koeficienta α_{st} vienību:

$$[\alpha_{st}] = \frac{[\Phi_{st}]}{[S][(t_s - t_v)]} = \frac{W}{m^2 \cdot K}.$$

Kopējo siltuma plūsmu, ko virsma atdod apkārtējai videi starošanā un konvekcijā (vienādojums (7.73)), var uzrakstīt šādi:

$$\Phi = \alpha_k(t_s - t_v)S + \alpha_{st}(t_s - t_v)S \quad \text{jeb} \quad (7.77)$$

$$\Phi = (\alpha_k + \alpha_{st})(t_s - t_v)S = \alpha(t_s - t_v)S.$$

Izteiksmi $\alpha_k + \alpha_{st} = \alpha$ (dažreiz apzīmē ar β) sauc par *kopējo (summāro) siltumatdeves koeficientu konvekcijā un starošanā*, W/(m²·K).

Siltuma pāreja caur plakanām sienām. Ļoti bieži ķīmiskās rūpniecības iekārtās siltuma apmaiņa starp divām vidēm notiek caur sienu. To sauc par *siltuma pāreju (pārnesi)*.

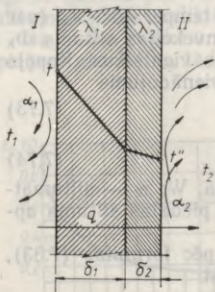
Ja temperatūra nemainās, siltuma pāreju saliktā sienā (7.14. att.) vispirms izsaka ar vides I konvekcijas rezultātā sienai atdoto siltuma plūsmas blīvumu:

$$q = \alpha_1(t_1 - t), \quad (7.78)$$

kur α_1 — vides I siltumatdeves koeficients.

Tā kā sistēmas temperatūra nemainās, tad viss siltums, kas no vides I pāriet uz virsmu, aizplūst cauri sienai. Sienā siltums izplatās vadišanas veidā, tādēļ var rakstīt, ka siltuma plūsmas blīvums

$$q = \frac{t - t''}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}}. \quad (7.79)$$



Sienai pieplūstošais siltums konvekcijas (vai arī konvekcijas un starošanas) rezultātā aizplūst uz vidi II. Apzīmējot vides II siltumatdeves koeficientu ar α_2 , var rakstīt, ka

$$q = \alpha_2(t'' - t_2). \quad (7.80)$$

Saskaitot vienādojumus (7.78), (7.79) un (7.80) un izdarot attiecīgas matemātiskas darbības, iegūst

$$q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_1 \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}(t_1 - t_2). \quad (7.81)$$

7.14. att. Siltuma pāreja saliktā sienā.

Vienādojuma (7.81) locekli $\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_1^n \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$ apzīmē ar k un sau par *siltumpārejas koeficientu*; tad

$$q = k(t_1 - t_2). \quad (7.82)$$

Siltuma plūsma, kas sekundē pāriet caur plakānu sienu ar laukumu S , ir šāda:

$$\Phi = k(t_1 - t_2)S. \quad (7.83)$$

Siltumpārejas koeficienta vienība ir

$$[k] = \frac{[\Phi]}{[S][\Delta t]} = \frac{W}{m^2 \cdot K}.$$

Siltumpārejas koeficients izsaka siltuma daudzumu, kas pāriet no vienas ar augstāku temperatūru cauri sienai uz vidi ar zemāku temperatūru caur 1 m² virsmas 1 sekundē, ja temperatūru starpība starp vidēm ir 1°C.

Siltumpārejas koeficienta locekļus $\frac{1}{\alpha_1} = R_1$ un $\frac{1}{\alpha_2} = R_2$ sauc par *siltumatdeves pretestību (ārējo pretestību)*, bet $\sum_1^n \frac{\delta}{\lambda} = R_3$ — par *siltumvadītspējas termisko pretestību (iekšējo pretestību)*. Šo pretestību summu sauc par *kopējo siltuma pārejas termisko pretestību*:

$$R = \frac{1}{k} = R_1 + R_2 + R_3, \quad (7.84)$$

kur R — kopējā termiskā pretestība, (m²·K)/W.

Ja iekšējā pretestība R_3 salīdzinājumā ar ārējām pretestībām ir niecīga (iekārtās ar mazu siltuma apmaiņas intensitāti), to var neievērot un siltumpārejas koeficientu tad iespējams noteikt šādi:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}.$$

Ja kāds no siltumatdeves koeficientiem ievērojami mazāks par otru, tad siltumpārejas koeficients aptuveni vienāds ar mazāko siltumatdeves koeficientu, t. i., ja $\alpha_1 < \alpha_2$, tad $k \approx \alpha_1$, ja $\alpha_1 > \alpha_2$, tad $k \approx \alpha_2$.

No formulas (7.83) var rakstīt, ka

$$R = \frac{1}{k} = \frac{\Delta t}{\Phi/S} = \frac{\Delta t}{q}.$$

Ja $q = 1$ W/m², tad $R = \Delta t$, t. i., termiskā pretestība ir temperatūru starpība, kas atbilst siltuma plūsmas blīvumam 1 W/m².

Siltumpārejas koeficienta aprēķināšanai ribotām caurulēm jālieto ekvivalentais siltumatdeves koeficients α_e , kas nosakāms pēc 7.15. attēlā dotā grafika atkarībā no aprēķinātās α vērtības.

Siltumpārejas koeficientu k , kas raksturo siltumpāreju (plūsmu) ribotām caurulēm caur sienu no siltākas vides uz aukstāku, aprēķina pēc formulas

$$(68.7) \quad k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \frac{S_a}{S_1}}$$

kur k — siltumpārejas koeficients, $W/(m^2 \cdot K)$; S_a, S_1 — ribotās caurules ārējo (ieskaitot ribas) un iekšējo virsmu laukumi uz vienu caurules garuma metru, m^2 ; α_2 — siltumatdeves koeficients caurules iekšējai plūsmai, $W/(m^2 \cdot K)$; $\sum \frac{\delta}{\lambda}$ — termiskās pretestības summa, ieskaitot nogulumus uz virsmām, $(m^2 \cdot K)/W$.

Aprēķinot siltumpārejas koeficientu siltuma apmaiņas iekārtām, jāievēro, vai uz sildvirsmas nav nogulumu kārtā. Nogulumu kārtā uz sildvirsmas ne tikai pasliktina siltuma pārejas intensitāti, bet vienlaikus paaugstina sienas temperatūru; tas dažreiz var būt par iemeslu avārijai. Aprēķinos pieņem, ka nogulumu kārtas biezums 0,5...1 mm, bet siltumvadītspējas koeficients 1,2...2,3 $W/(m \cdot K)$.

Siltuma pāreja caur cilindriskām sienām. Tehniskās iekārtās siltums bieži pāriet caur cauruļu un cilindriera sienām.

Tāpat kā plakanām sienām, cilindriera sienām var sastādīt trīs siltuma plūsmas blīvuma vienādojumus — atsevišķi iekšējai un ārējai videi un caurules sienai. Sastādot šos vienādojumus, siltuma plūsmas blīvumu izsaka uz vienu metru caurules garuma.

Ievērojot 7.16. attēlā dotos apzīmējumus, videi I siltuma plūsmas blīvums izsakāms šādi:

$$q_c = \alpha_1 (t_1 - t') \pi d_1.$$

Ja siltuma plūsmas notiek nemainīgā temperatūrā, tad siltuma plūsmas blīvumu sienai var noteikt šādi:

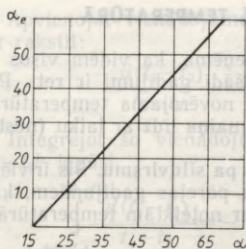
$$q_c = \frac{t' - t''}{\frac{1}{2,73\lambda} \lg \frac{d_2}{d_1}}.$$

Videi II siltuma plūsmas blīvumu izsaka vienādojums

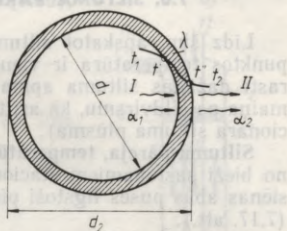
$$q_c = \alpha_2 (t'' - t_2) \pi d_2.$$

Saskaitot šos trīs vienādojumus un izdarot attiecīgas matemātiskas darbības, iegūst

$$(7.85) \quad q_c = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \pi d_1} + \frac{1}{2,73\lambda} \lg \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \pi d_2}} (t_1 - t_2).$$



7.15. att. Ekvivalentais siltumatdeves koeficients $\alpha_e = f(\alpha)$.



7.16. att. Siltuma pāreja cilindriskā caurulē.

Vienādojuma (7.85) izteiksmi

$$k_c = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \pi d_1} + \frac{1}{2,73\lambda} \lg \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \pi d_2}}$$

sauc par *cilindriskās sienas siltumpārejas koeficientu* (viendabīgai sienai).

Ja siena sastāv no vairākām kārtām, tad

$$k_c = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \pi d_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2,73\lambda} \lg \frac{d_{n+1}}{d_n} + \frac{1}{\alpha_2 \pi d_2}}$$

Koeficients k_c rāda to siltuma daudzumu, kas 1 sekundē pāriet no vienas vides uz otru cauri cilindriskai sienai, ja temperatūru starpība starp vidēm 1°C un sienas garums 1 m.

Kopējā siltuma plūsma, kas pāriet caur l metrus garu cilindrisku virsmu,

$$\Phi = k_c (t_1 - t_2) l.$$

Ja $\frac{d_2}{d_1} < 1,5$, siltuma pāreju cilindriskās sienās var aptuveni noteikt ar kļūdu 2...3% pēc formulas (7.83), kas attiecas uz plaknām sienām. Tad $S = \pi d_{vid} l$, kur d_{vid} — caurules vidējais diametrs. Ja $\alpha_1 \approx \alpha_2$, tad $d_{vid} = (d_2 + d_1) 0,5$; ja $\alpha_1 > \alpha_2$, tad $d_{vid} = d_2$, ja d_2 ir cilindra diametrs tās vides pusē, kurai mazāks siltumatdeves koeficients α_2 ; ja $\alpha_1 < \alpha_2$, tad $d_{vid} = d_1$.

7.6. SILTUMA PĀREJA MAINĪGĀ TEMPERATŪRĀ

Līdz šim, apskatot siltuma pāreju, pieņēmām, ka vidēm visos to punktos temperatūra ir vienāda. Praksē šādi gadījumi ir reti. Parasti dažādās siltuma apmaiņas iekārtās novērojama temperatūras maiņa pa sildvirsmu, kā arī temperatūras maiņa līdz ar laiku (nestacionāra siltuma plūsma).

Siltuma pāreja, temperatūrai mainoties pa sildvirsmu. Šis ir viens no bieži sastopamiem stacionāras siltuma pārejas gadījumiem, kad sienas abās pusēs ilgstoši pievada vides ar noteiktām temperatūrām (7.17. att.).

Ja vienai videi temperatūra gar sildvirsmu mainās no t_1^s līdz t_1^b , bet otrai — no t_2^s līdz t_2^b , tad pēc vienādojuma (7.83) pārejošo siltuma plūsmu noteikt nevar.

Laī aprēķinātu pārejošo siltuma plūsmu mainīgā temperatūrā, no sildvirsmas izdala bezgalīgi mazu virsmas daļu dS . Tad pēc vienādojuma (7.83) pārejošo siltuma plūsmu izsaka šādi:

$$d\Phi = k(t_1 - t_2)dS, \quad (7.86)$$

kur t_1 — siltākās vides temperatūra, °C; t_2 — aukstākās vides temperatūra, °C.

Ja vides *I* patēriņu apzīmē ar G_1 , bet vides *II* patēriņu — ar G_2 , tad siltuma plūsmu $d\Phi$, ko vide *I* atdod virsmai dS , radot bezgalīgi mazu temperatūras izmaiņu dt_1 , var izteikt šādi:

$$d\Phi = -G_1 c_1 dt_1. \quad (7.87)$$

Vienādojuma labajā pusē ir mīnusa zīme, jo dt_1 mainās no augstākās temperatūras uz zemāku (atdziest).

Pieņemot, ka viss siltums $d\Phi$ izplūst cauri sienai, vidē *II*, uzņemot šo siltumu, temperatūra izmainīsies par bezgalīgi mazu lielumu dt_2 , t. i.,

$$d\Phi = G_2 c_2 dt_2, \quad (7.88)$$

kur c_1 un c_2 — attiecīgās vides īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K).

No vienādojumiem (7.87) un (7.88) var rakstīt

$$dt_1 = -\frac{d\Phi}{G_1 c_1} \quad \text{un} \quad dt_2 = \frac{d\Phi}{G_2 c_2}.$$

No dt_1 atņemot dt_2 un apzīmējot reizinājumu Gc ar «ūdens ekvivalentu» U , var rakstīt, ka $G_1 c_1 = U_1$, $G_2 c_2 = U_2$ un $\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} = m$, tad iegūst

$$dt_1 - dt_2 = d(t_1 - t_2) = -d\Phi \left(\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} \right) \quad \text{vai}$$

$$d\Phi = -\frac{d(t_1 - t_2)}{m}. \quad (7.89)$$

Apvienojot vienādojumus (7.86) un (7.89), var rakstīt:

$$\frac{d(t_1 - t_2)}{t_1 - t_2} = -mk dS.$$

Integrējot šo vienādojumu no $t_1^s - t_2^s$ līdz $t_1^b - t_2^b$, iegūst

$$\int_{t_1^s - t_2^s}^{t_1^b - t_2^b} \frac{d(t_1 - t_2)}{t_1 - t_2} = -mk \int_0^S dS \quad \text{vai}$$

$$\ln \frac{t_1^b - t_2^b}{t_1^s - t_2^s} = \ln \frac{\Delta t_b}{\Delta t_s} = -mkS, \quad (7.90)$$

kur $\Delta t_b = t_1^b - t_2^b$ — beigu temperatūru starpība starp vidēm; $\Delta t_s = t_1^s - t_2^s$ — sākuma temperatūru starpība starp vidēm.

Ja vides I patēriņš ir G_1 un tās temperatūra mainās no t_1^s līdz t_1^b , tad šī vide zaudē šādu siltuma plūsmu:

$$\Phi = G_1 c_1 (t_1^s - t_1^b) = U_1 (t_1^s - t_1^b).$$

Pieņemot, ka vide II visu šo siltuma plūsmu uzņem, tad

$$\Phi = G_2 c_2 (t_2^b - t_2^s) = U_2 (t_2^b - t_2^s) \quad \text{vai}$$

$$U_1 = \frac{\Phi}{t_1^s - t_1^b} \quad \text{un} \quad U_2 = \frac{\Phi}{t_2^b - t_2^s}.$$

Koeficientu m var izteikt šādi:

$$m = \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} = \frac{(t_1^s - t_1^b) + (t_2^b - t_2^s)}{\Phi} = \frac{(t_1^s - t_2^s) - (t_1^b - t_2^b)}{\Phi} \quad \text{jeb}$$

$$m = \frac{\Delta t_s - \Delta t_b}{\Phi}. \quad (7.91)$$

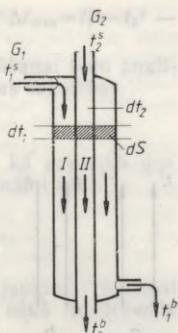
Vienādojumā (7.90) m vietā liekot izteiksmi (7.91), iegūst

$$\ln \frac{\Delta t_b}{\Delta t_s} = - \frac{\Delta t_s - \Delta t_b}{\Phi} kS \quad \text{jeb}$$

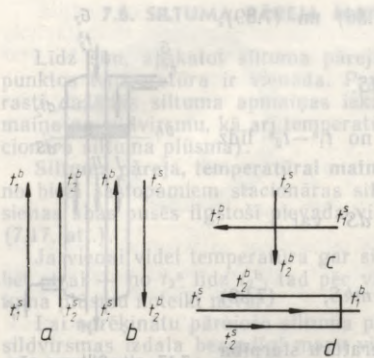
$$2,3 \lg \frac{\Delta t_s}{\Delta t_b} = \frac{\Delta t_s - \Delta t_b}{\Phi} kS. \quad (7.92)$$

Izsakot no vienādojuma (7.92) siltuma plūsmu, kas caur virsmu no vienas vides aizplūst uz otru, var rakstīt

$$\Phi = k \frac{\Delta t_s - \Delta t_b}{2,3 \lg \frac{\Delta t_s}{\Delta t_b}} S,$$

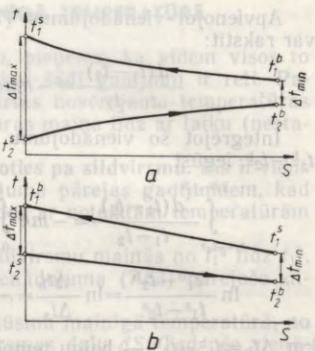


7.17. att. Siltuma pārēja mainīgā temperatūrā.



7.18. att. Plūsmu pamatveidu shēmas:

1 — līdzplūsma, 2 — pretplūsma, 3 — šķērsplūsma, 4 — jaukta plūsma.



7.19. att. Plūsmu temperatūru sadalījums pa sildvirsmu $t=f(S)$:

a — līdzplūsmai, b — pretplūsmai.

kur $\frac{\Delta t_s - \Delta t_b}{2,3 \lg \frac{\Delta t_s}{\Delta t_b}} = \Delta t_{vid}$ sauc par vidējo logaritmisko temperatūru starpību.

Risinājumā aplūkotajā siltuma pārejā abās vidēs ir vienāds plūsmas virziens. Šādu plūsmas veidu sauc par līdzplūsmu. Līdzplūsmas gadījumā, ja temperatūra mainās pa sildvirsmu, aizplūstošo siltuma plūsmu aprēķina pēc vienādojuma

$$\Phi = k \Delta t_{vid} S. \quad (7.93)$$

Temperatūru starpību Δt_{vid} nosaka kā vidējo logaritmisko temperatūru starpību, ja $\frac{\Delta t_s}{\Delta t_b} > 2$. Pārējos gadījumos to ar pietiekamu precizitāti var noteikt kā vidējo aritmētisko temperatūru starpību, t. i., $t_{vid} = (\Delta t_s + \Delta t_b) / 2$.

Bez aplūkotās līdzplūsmas siltuma apmaiņas iekārtās var būt pretplūsma, šķērsplūsma un jaukta plūsma (7.18. att.).

Lai nekļūdiģi varētu noteikt temperatūru starpību, temperatūras izmaiņu parasti attēlo t, S koordinātās (7.19. att. a, b).

Visām plūsmām, ja temperatūra mainās pa sildvirsmu, siltuma pāreju aprēķina pēc vienādojuma (7.93), mainās tikai vidējās logaritmiskās temperatūru starpības noteikšana.

Pretplūsmai Δt_{vid} nosaka šādi:

$$\Delta t_{vid} = \frac{\Delta t_{max} - \Delta t_{min}}{2,3 \lg \frac{\Delta t_{max}}{\Delta t_{min}}}, \quad (7.94)$$

kur $\Delta t_{\max} = t_1^b - t_2^s$ — lielākā temperatūru starpība; $\Delta t_{\min} = t_1^s - t_2^b$ — mazākā temperatūru starpība.

Visiem pārējiem plūsmas veidiem Δt_{vid} aprēķināšanai lieto analītisko, bet visbiežāk — grafisko paņēmieni pēc šādas sakarības:

$$\Delta t_{\text{vid}} = \psi \Delta t_{\text{vid}}$$

Koeficientu ψ iegūst no grafikiem (7.20. att.) kā sakarību $\psi = f(P, R)$, kur korigējošie parametri P un R aprēķināmi šādi:

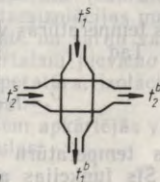
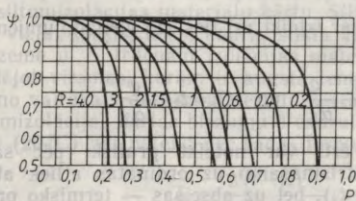
$$P = \frac{t_2^b - t_2^s}{t_1^s - t_2^s} \quad \text{un} \quad R = \frac{t_1^s - t_1^b}{t_2^b - t_2^s}$$

Vidējā temperatūru starpība šķērsplūsmā un jauktajai plūsmā vienmēr ir mazāka nekā pretplūsmā, bet lielāka nekā līdzplūsmā (jo $\psi < 1$).

Plūsmas veida izvēle siltuma apmaiņas iekārtās. Ir gadījumi, kad siltumapmainītajos vienai vai abām vidēm nemainās temperatūra vai arī temperatūra mainās abām vidēm. Ja vienai vai abām vidēm nemainās temperatūra, tad nav svarīgi, kāds ir plūsmas virziens, jo tas neietekmē siltuma pāreju un siltumnesēja patēriņu. Ja temperatūra mainās abām vidēm, tad jāizvēlas plūsmas veids, kurš nodrošina vislielāko vidējo temperatūru starpību (samazina nepieciešamo sildvirsmu), mazāko siltumnesēja patēriņu, zemāku maksimālo sienas temperatūru (samazina termisko deformāciju) un lielāko siltumpārejas koeficientu.

Pretplūsmas iekārtās vides temperatūru iespējams mainīt (sildot vai dzesējot) ievērojami plašākā intervālā nekā līdzplūsmas siltumapmainītajos. Pretplūsmas iekārtā salīdzinājumā ar vienādas sildvirsmas līdzplūsmas iekārtu ir mazāks siltumnesēja (aukstumnesēja) patēriņš, jo tas tiek pilnīgāk izmantots. Pretplūsmas aparātos pilnīgāk izmantojot siltumnesēju, samazinās vidējā temperatūru starpība Δt_{vid} , tādēļ no pretplūsmas un līdzplūsmas iekārtām ar vienādu ražīgumu lielāka sildvirsmā ir pretplūsmas iekārtām.

Nelielais siltumnesēja patēriņš pretplūsmas iekārtās dod lielāku ekonomisko efektu, neraugoties uz izdevumiem, kas saistīti ar lielākas iekārtas iegādi un ekspluatāciju. Tādēļ rūpniecībā plašāk lieto pretplūsmas iekārtas.



7.20. att. Koeficients $\psi = f(P, R)$.

Līdzplūsmas iekārtās maksimālā virsmas temperatūra ir zemāka nekā pretplūsmas iekārtās, tādēļ, ja vienai videi ir ļoti augsta temperatūra, termiskās deformācijas samazināšanai lieto līdzplūsmu. Līdzplūsmas iekārtas lieto arī termiski labilu vielu sildīšanai, lai pasargātu tās no sienas augstās temperatūras iedarbības.

Jauktai plūsmai, izveidojot vairākas virzienu maiņas, siltum-pārejas koeficients palielinās. Siltumapmainītājos, sadalot sekcijās cauruļu un starpcauruļu telpu, iespējams paaugstināt Δt_{vid} , līdz tā tuvojas pretplūsmas vidējai temperatūru starpībai. Jaukto plūsmu un šķērsplūsmu siltuma apmaiņas iekārtās lieto tad, ja konstruktīvi nav iespējams nodrošināt pretplūsmu.

Siltuma pāreja, temperatūrai mainoties līdz ar laiku. Ja temperatūra mainās līdz ar laiku, piemēram, sildot šķidrumus ar tvaiku, iegūst tādas pašas aprēķina formulas, kā mainoties temperatūrai pa sildvirsmu.

Sienas temperatūra. Siltumtehnikos aprēķinos nepieciešams noteikt sienas virsmas temperatūru, piemēram, nosakot siltum-pārejas koeficientu vai siltuma zudumus apkārtējā vidē, kā arī citos aprēķinos.

7.21. attēlā parādītajai siltuma apmaiņas shēmai siltuma plūsmas blīvumu var izteikt ar šādiem trim vienādojumiem:

$$q = \alpha_1 (t_1 - t'_s), \quad (7.94)$$

$$q = k (t_1 - t_2), \quad (7.95)$$

$$q = \alpha_2 (t''_s - t_2). \quad (7.96)$$

Pielīdzinot šos vienādojumus vienu otram, iegūst

$$t'_s = t_1 - \frac{k}{\alpha_1} (t_1 - t_2) \quad \text{un} \quad t''_s = t_2 + \frac{k}{\alpha_2} (t_1 - t_2).$$

Ja temperatūra mainās pa sildvirsmu vai laikā, tad vienādojumu (7.95) var uzrakstīt šādi:

$$q = k \Delta t_{\text{vid}},$$

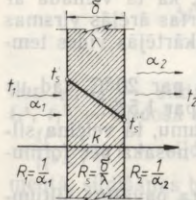
un sienas temperatūras

$$t'_s = t_1 - \frac{k}{\alpha_1} \Delta t_{\text{vid}} \quad \text{un} \quad t''_s = t_2 + \frac{k}{\alpha_2} \Delta t_{\text{vid}}.$$

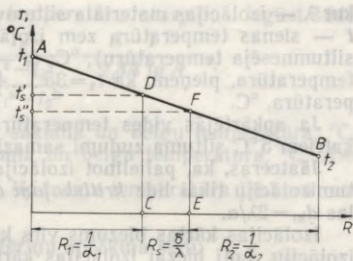
Sienas temperatūras var izteikt arī tieši no vienādojumiem (7.94) un (7.96). Tad

$$t'_s = t_1 - \frac{q}{\alpha_1} \quad \text{un} \quad t''_s = t_2 + \frac{q}{\alpha_2}.$$

Sienas temperatūru ērti var noteikt grafiski pēc sakarības $t = f(R)$. Šīs funkcijas atrisināšanai uz ordinātas atliek attiecīgās vides temperatūru (t_1 un t_2), bet uz abscisas — termisko pretestību summu: $R_1 + R_s + R_2$ (7.22. att.).



7.21. att. Sienas temperatūras noteikšanas shēma.



7.22. att. Sienas temperatūras noteikšanas grafiks.

Savienojot temperatūrām t_1 un t_2 atbilstošos punktus, iegūst taisni AB . No punkta C (kas atbilst pretestībai R_1) novelkot vertikāli, uz taisnes AB iegūst punktu D . Nogrieznis CD atbilst sienas temperatūrai t''_s , bet nogrieznis EF — sienas temperatūrai t'_s .

Siltuma zudumi un siltumizolācija. Siltuma apmaiņas iekārtu siltuma zudumi apkārtējā vidē atkarīgi no virsmas un apkārtējās vides temperatūras, kā arī no gaisa kustības ātruma. Zudumus apkārtējā vidē aprēķina kā kopējos zudumus, kas saistīti ar konvekciju un starošanu, pēc formulas (7.77):

$$\Phi = \alpha(t_s - t_v)S,$$

kur Φ — siltuma zudumi apkārtējā vidē, W ; α — kopējais siltumtādes koeficients (sk. 288. lpp.), $W/(m^2 \cdot K)$; t_s — sienas temperatūra, $^{\circ}C$; t_v — vides temperatūra, $^{\circ}C$; S — sienas virsma, m^2 .

Kopējo siltumtādes koeficientu aparātiem, kuriem sienas temperatūra ir līdz $150^{\circ}C$ un kuri novietoti telpās, var aprēķināt pēc formulas

$$\alpha = 9,3 + 0,058t_s. \quad (7.96)$$

Lai samazinātu siltuma zudumus apkārtējā vidē, jāsamazina siltuma pāreja no aparāta (caurules) iekšienes (kur ir augstāka temperatūra) uz apkārtējo vidi. Tas panākams, palielinot termisko pretestību, ko praktiski realizē, aplikot ap aparāta (caurules) ārējo virsmu siltumizolācijas materiālu kārtu. Siltumizolācijas materiāli ir azbests, vizla, korkis, koks, kūdra, stikla vate un šārņu vate, plastmasas, zeme u. c. Irdenam izolācijas materiālam pievieno saistvielas. Izolējot virsmas, kurām ir augsta temperatūra, izolācijas slāni izveido no vairākām dažādu materiālu kārtām.

Siltumizolācijas kārtas biezumu δ caurulēm apkārtējās vides temperatūrā ($20^{\circ}C$) var noteikt pēc šādas formulas:

$$\delta = \frac{\lambda(t - t_s)}{\alpha(t_s - t_v)}, \quad (7.97)$$

kur λ — izolācijas materiāla siltumvadītspējas koeficients, $W/(m \cdot K)$; t — sienas temperatūra zem izolācijas (pieņem, ka tā vienāda ar siltumnesēja temperatūru), $^{\circ}C$; t_s — izolācijas kārtas ārējās virsmas temperatūra, pieņem, ka $t_s = 35 \dots 45^{\circ}C$; t_v — apkārtējās vides temperatūra, $^{\circ}C$.

Ja apkārtējās vides temperatūra ir augstāka par $20^{\circ}C$, tad uz katrēm $5^{\circ}C$ siltuma zudumi samazinās aptuveni par 1,5%.

Jāatceras, ka, palielinot izolācijas kārtas biezumu, tā veicina siltumizolāciju tikai līdz *kritiskajam diametram*, ko nosaka pēc formulas $d_{kr} = 2\lambda/a$.

Izolācijas kārtas biezums virs kritiskā diametra pavājina siltumizolāciju. Ļoti biežai izolācijas kārtai siltuma zudumi nesamazinās, bet pat pieaug.

Siltuma pāreja, temperatūrai mainoties pa sildvirsmu un arī līdz ar laiku. Siltuma apmaiņas iekārtās nestacionārā režīmā temperatūra mainās pa sildvirsmu un arī līdz ar laiku. Tas novērojams periodiskas darbības sildītājos (dzēsinašajos) un arī nepārtrauktas darbības iekārtās sākuma stadijā, līdz sasniedz optimālo darba režīmu.

Pārgājušo siltuma plūsmu nestacionāram režīmam nosaka pēc tāda paša vienādojuma kā stationāram režīmam, t. i.,

$$\Phi = k\Delta t'_{vid}S.$$

Atšķirība ir tikai vidējās temperatūru starpības $\Delta t'_{vid}$ noteikšanas metodē.

Periodiskā dzesēšana. Ja karstu šķidrumu τ sekundes dzesē no t_1^s līdz t_1^b ar aukstu šķidrumu caur glodeni vai apvalku, tad aukstā šķidruma temperatūra pieaug no t_2^s līdz t_2^b . Vidējā temperatūru starpība periodiskai dzesēšanai

$$\Delta t'_{vid} = \frac{t_1^s - t_1^b}{2,3 \lg \frac{t_1^s - t_2^s}{t_1^b - t_2^s}} \cdot \frac{A - 1}{2,3A \lg A},$$

kur t_1^s, t_1^b — dzesējamā šķidruma sākuma un beigu temperatūra, $^{\circ}C$; t_2^s, t_2^b — dzesējošā šķidruma sākuma un beigu temperatūra, $^{\circ}C$; $A = \frac{t - t_2^s}{t - t_2^b}$; t — dzesējamā šķidruma temperatūra jebkurā momentā, $^{\circ}C$. Skaitlis A dotajam siltuma apmaiņas procesam ir konstants lielums. Ja nosaka dzesēšanai vajadzīgo virsmu, tad $t = t_1^b$.

Dzesējošā (aukstā) šķidruma patēriņu nosaka šādi:

$$G_1 = \frac{\Phi}{c_2(t_2^{vid} - t_2^s)}, \quad (7.98)$$

kur G_1 — dzesējošā šķidruma patēriņš, kg/s ; Φ — atņemamā siltuma plūsma, W ; c_2 — dzesējošā šķidruma īpatnējā siltumietilpība, $J/(kg \cdot K)$; t_2^{vid} — dzesējošā šķidruma vidējā beigu temperatūra, $t_2^{vid} = \Delta t'_{vid} 2,3 \lg A + t_2^s$.

Periodiskā sildīšana. Vidējo temperatūru starpību iegūst šādi:

$$\Delta t'_{\text{vid}} = \frac{t_2^b - t_2^s}{2,3 \lg \frac{t_1^s - t_2^s}{t_1^s - t_2^b}} \frac{A - 1}{2,3A \lg A},$$

kur t_2^s, t_2^b — sildāmā šķidruma sākuma un beigu temperatūra, °C; t_1^s, t_1^b — sildošā šķidruma sākuma un beigu temperatūra, °C; $A = \frac{t_1^s - t}{t_1^b - t}$; t — sildāmā (aukstā) šķidruma temperatūra jebkurā momentā, sildīšanas beigās $t = t_2^b$.

Sildošā (karstā) šķidruma patēriņu aprēķina šādi:

$$G_2 = \frac{\Phi}{c_2(t_1^s - t_2^{\text{vid}})}.$$

Sildošā šķidruma vidējo beigu temperatūru var noteikt pēc formulas $t_2^{\text{vid}} = t_1 - \Delta t'_{\text{vid}} 2,3 \lg A$.

Siltuma pāreja, ja siltumpārejas koeficients ir mainīgs. Līdz šim minētās siltuma pārejas formulas lietojamas tad, ja procesa laikā nemainās īpatnējā siltumietilpība un siltumpārejas koeficients.

Siltuma pārejas raksturošanai, ja siltumpārejas koeficients mainās, siltuma pārejas vienādojumu $d\Phi = k(t_1 - t_2)dS$ pielīdzina siltuma bilances vienādojumam $d\Phi = Gcdt_1$, kur G — sildāmā šķidruma patēriņš, kg/s; c — sildāmā šķidruma īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K); dt_1 — sildāmā šķidruma temperatūras izmaiņa, °C. Tad iegūst, ka

$$k(t_1 - t_2)dS = Gcdt_1 \quad \text{vai} \quad dS = \frac{Gcdt_1}{k(t_1 - t_2)}.$$

Pieņemot, ka aprēķinos lieto vidējo īpatnējo siltumietilpību, c un k ir mainīgs, tad

$$\int_0^S dS = Gc \int_{t_1^b}^{t_1^s} \frac{dt_1}{k(t_1 - t_2)} \quad \text{vai} \quad S = Gc \int_{t_1^b}^{t_1^s} \frac{dt_1}{k(t_1 - t_2)}.$$

Vienādojuma integrāli atrisina grafiski, meklējot sakarību starp $\frac{1}{k(t_1 - t_2)}$ un t_1 , kā tas parādīts piemērā.

Piemērs. Noteikt dzesēšanas iekārtas virsmu, ja tajā dzesē 1,39 kg/s karstas eļļas no 100 līdz 30 °C ar aukstu eļļu, kas sasilst no 20 līdz 45 °C. Abām vidēm īpatnējā siltumietilpība $c = 1675$ J/(kg·K). Siltumpārejas koeficientu raksturo dati:

Karstās eļļas t_1 , °C	100	80	60	40	30
Siltumpārejas koeficients k , W/(m ² ·K)	350	330	300	250	200

Risinājums. Tā kā k ievērojami mainās atkarībā no temperatūras, tad sildvirsmas noteikšanai izmanto vienādojumu

$$S = G_1 c_1 \int_{t_1^b}^{t_1^s} \frac{dt_1}{k(t_1 - t_2)}.$$

t_1	t_2	$t_1 - t_2$	k	$\frac{1}{k(t_1 - t_2)} \cdot 10^4$
100	45,0	55,0	350	0,52
80	37,9	42,1	330	0,72
60	30,7	29,3	300	1,14
40	23,6	16,4	250	2,14
30	20,0	10,0	200	5,00

kur t_1 — karstās eļļas temperatūra, °C; t_2 — aukstās eļļas temperatūra, °C. Integrāļa $\int_{30}^{100} \frac{dt_1}{k(t_1 - t_2)}$ grafiskai atrisināšanai sastāda 7.8. tabulu.

Ja pieņem, ka karstās eļļas atdotais siltums vienāds ar aukstās eļļas iegūto siltumu, tad

$$G_1 c_1 (t_1^a - t_1^b) = G_2 c_2 (t_2^b - t_2^a) \quad \text{un}$$

$$\frac{G_1 c_1}{G_2 c_2} = \frac{t_2^b - t_2^a}{t_1^a - t_1^b} = \frac{45 - 20}{100 - 30} = 0,357.$$

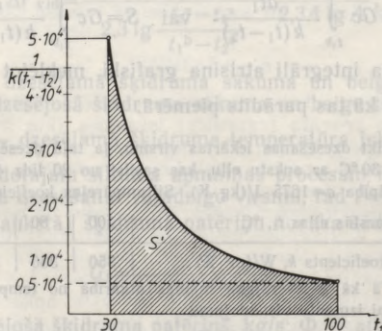
Ja karstās eļļas temperatūra $t_1 = 80$ °C, tad attiecīgā aukstās eļļas temperatūra

$$t_2 = t_2^b - \frac{G_1 c_1}{G_2 c_2} (t_1^a - t_1) = 45 - 0,357(100 - 80) \approx 37,9 \text{ °C.}$$

Tālāk aprēķina sakarību:

$$\frac{1}{k(t_1 - t_2)} = \frac{1}{330(80 - 37,9)} = 0,72 \cdot 10^{-4}.$$

Analogiski šos lielumus nosaka arī pārējām temperatūrām. Pēc 7.8. tabulas datiem grafiski attēlo sakarību starp $\frac{1}{k(t_1 - t_2)}$ un t_1 .



7.23. att. Grafiks $\frac{1}{k(t_1 - t_2)} = f(t_1)$.

7.23. attēlā iesvītotais laukums ekvivalents integrālim $\int_{30}^{100} \frac{dt}{k(t_1-t_2)}$.

Integrāļa skaitliskās vērtības iegūšanai ar planimetru nosaka laukumu $S' = 312 \text{ mm}^2$ un to reizina ar diagrammas mērogu M_{xy} , t. i., 1 mm^2 laukuma skaitlisko vērtību¹.

Ja abscisas virzienā $1 \text{ mm} = 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$, bet ordinātas virzienā $1 \text{ mm} = 0,125 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{W}$, tad $M_{xy} = 2,5 \cdot 0,125 \cdot 10^{-4} \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$ un

$$\int_{30}^{100} \frac{dt_1}{k(t_1-t_2)} = S M_{xy} = 312 \cdot 2,5 \cdot 0,125 \cdot 10^{-4} = 97,5 \cdot 10^{-4} \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}.$$

Nepieciešamā sildvirsuma

$$S = G_1 c_1 \int_{30}^{100} \frac{dt_1}{k(t_1-t_2)} = 1,39 \cdot 1675 \cdot 97,5 \cdot 10^{-4} = 22,7 \text{ m}^2.$$

Siltumpārejas koeficients atkarībā no konkrētajiem apstākļiem mainās plašās robežās. Aptuvenas siltumpārejas koeficienta vērtības sakopotas 7.9. tabulā.

7.9. tabula

Aptuvenas siltumpārejas koeficienta k vērtības, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Siltuma apmaiņas veids	Brīvā konvekcija	Piespiedu konvekcija
No gāzes uz gāzi (parastā spiedienā)	4 ... 12	12 ... 35
No gāzes uz šķidrumu (gāzes dzesinātajos)	6 ... 17	12 ... 58
No tvaika, kas kondensējas uz gāzi (gaisa sildītajos)	6 ... 12	12 ... 58
No šķidruma uz šķidrumu (ūdens)	139 ... 348	812 ... 1740
No šķidruma uz šķidrumu (eļļa)	29 ... 58	116 ... 290
No tvaika, kas kondensējas uz ūdeni (siltumapmainītajos)	290 ... 1160	812 ... 3480
No tvaika, kas kondensējas uz organiskiem šķidrumiem (siltumapmainītajos)	58 ... 174	116 ... 348
No organisko vielu tvaikiem, kas kondensējas uz ūdens (kondensatoros)	232 ... 464	348 ... 750
No tvaika, kas kondensējas uz verdošu šķidrumu (ietvaicētajos)	232 ... 3480	līdz 6960

¹ Zīmējums nav mērogā.

8. SILDĪŠANA, DZESĒŠANA UN KONDENSĒŠANA

8.1. SILDĪŠANA

8.1.1. Siltuma avoti un sildīšanas veidi

Ķīmijas tehnoloģijā gatavā produkta ieguvei izejvielas un pusfabrikāti jāapstrādā ļoti plašos temperatūru intervālos — temperatūrās, kas zemākas par -250°C un augstākas par 3000°C . Sildīšana ir nepieciešama tādu pamatprocesu norisei kā ietvaice, pārvaice, žāvēšana, ķīmisko reakciju veicināšana u. c.

Sildīšanā par siltuma avotiem rūpniecībā lieto *dūmgāzes, elektrisko enerģiju un siltumnesējus: karstu ūdeni un pārkarētu ūdeni, ūdens tvaiku, speciālus siltumnesējus, izkausētus sāļus un metālus*. Sildīšanai lieto arī atgāzes (no ceļiem, krāsnīm u. c.), attvaiku (no turbīnām, ietvaicētājiem u. c.) vai arī citas gāzes un šķidrums, ja to temperatūra pietiekami augsta.

Labam siltumnesējam jābūt

1) ar iespējami lielāku blīvumu, iztvaikošanas siltumu un īpatnējo siltumietilpību, lai ar maziem siltumnesēja tilpumiem varētu pārvietot lielus siltuma daudzumus. Tam jābūt ar mazu viskozitāti un ar iespējami augstu viršanas temperatūru zemos spiedienos. (Tad var izveidot sildīšanas iekārtas augstām temperatūrām ar plānām sienām.);

2) termiski izturīgam, tas nedrīkst veicināt iekārtas koroziju, pat ilgstoši to lietojot augstās temperatūrās. Nav vēlama nogulumu kārtas rašanās uz sildvirsmas, jo līdz ar to ievērojami samazinās sildītāja ražīgums. Tā tvaikiem jābūt veselībai nekaitīgiem un ugunsdrošiem;

3) siltumnesējam jābūt lētam.

Siltumnesēja izvēli nosaka sildīšanas īpatnības, galvenokārt maksimālā sildīšanas temperatūra, pieļaujamās temperatūru svārstības un ekonomiskie apsvērumi.

Sildot līdz 100°C , par siltumnesēju lieto *karstu ūdeni*, parasti kondensātu. Sildīšanas iekārtās ar karstu ūdeni viegli regulēt temperatūru.

Ķīmiskajā rūpniecībā sildīšanai bieži izmanto *piesātinātu ūdens tvaiku*. Parasti tvaika temperatūra nepārsniedz 180°C (izņēmums ir iekārtas, kas darbojas ar augstspiediena tvaiku — līdz 10 MPa). Sildīšanas iekārtās, kas apsildāmas ar ūdens tvaiku, iespējams sasniegt augstu siltumpārejas koeficientu, nodrošināt vienmērīgu sildīšanu un procesu viegli regulēt. Šādai iekārtai ir augsts lietderības koeficients.

Par siltumnesēju temperatūrās, kas augstākas par 180 °C, var lietot *pārkarsētu ūdeni*, kas 22,42 MPa lielā spiedienā (kritiskā spiedienā) līdz 374 °C temperatūrā (kritiskā temperatūrā) paliek šķidrā stāvoklī.

Daži *speciālie siltumnesēji* spēj nodrošināt temperatūru pat līdz 600 °C. Šādi siltumnesēji var būt minerāleļļas, difenils, difeniloksīds, dinils jeb dauterma (difenila un difeniloksīda eitektisks maisījums), dzīvsudrabs, dažādu sāļu un metālu kausējumi. Šīs vielas iegūst siltumu no dūmgāzēm vai elektriskās strāvas un tālāk atdod to sildāmai videi.

Sildīšanai līdz 1400 °C un augstākās temperatūrās par siltumnesēju bieži lieto *dūmgāzes* vai *tiešu liesmu*. Sildīšanai ar dūmgāzēm ir šādi trūkumi: lieli siltuma zudumi; zems siltumatdeves koeficients; grūti regulēt temperatūru šaurā intervālā; nevienmērīga sildīšana, tādēļ iespējama sildāmās vides vietēja pārkarsēšana; ugunsnedrošība, sildot viegli uzliesmojošas vielas.

Sildot ar elektrisko strāvu, var sasniegt temperatūru, kas augstāka par 3200 °C. Šim sildīšanas veidam daudz priekšrocību, bet ekonomisku apsvērumu dēļ to ķīmiskajā rūpniecībā lieto mazāk.

8.1.2. Sildīšana ar ūdens tvaiku

Sildīšanai nepieciešamo tvaiku iegūst tvaika katlos vai arī izmanto attvaiku no spēkmašīnām un sekundāro tvaiku no ietvaicētājiem.

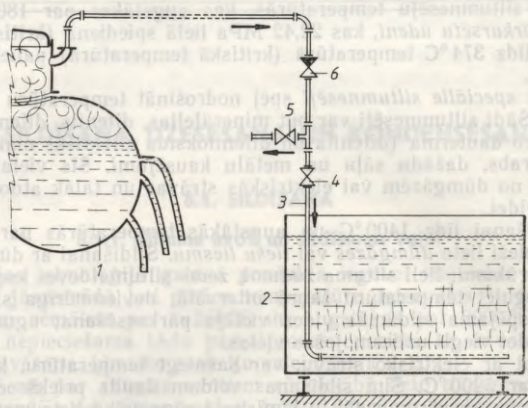
Sildīšanu ar tvaiku var izdarīt *tieši un netieši*.

Tiešā sildīšana ar tvaiku. Šīs sildīšanas pamatā ir tvaika ievadīšana sildāmajā šķidrumā. Tvaiks, saskaroties ar auksto šķidrumu, kondensējas. Vienlaikus ar šķidruma temperatūras paaugstināšanos tajā uzkrājas kondensāts. Tas turpinās līdz viršanai. Sildot verdošus ūdens šķīdumus, uz katru kilogramu ievadītā tvaika no virsmas izdalās 1 kg tvaika. Tādēļ tieši ar tvaiku parasti silda, nevis iztvaicē.

Iztvaicēšanu ar tvaiku lieto šķidrumiem ar mazu iztvaikošanas siltumu, piemēram, etilspirtam $r=882$ kJ/kg; anilīnam $r=475$ kJ/kg. Tad, kondensējoties 1 kg ūdens tvaika (ūdenim 0,1 MPa spiedienā iztvaikošanas siltums $r=2268$ kJ/kg), iztvaiko $\frac{2268}{882}=2,57$ kg etilspirta un $\frac{2268}{475}=4,78$ kg anilīna.

Rūpniecībā tieši ar tvaiku izdara arī destilāciju, lai pazeminātu grūti gaistošu komponentu viršanas temperatūru.

Sildīšanas iekārtā ar tvaika tiešu ievadīšanu šķidrumā parādīta 8.1. attēlā. Tā sastāv no tvaika ģeneratora (tvaika katla) 1, tvertnes 2, kurā iepildīts sildāmais šķidrums un iegremdēta saliekta tvaika caurule 3. Caurules horizontālajā daļā ir sīki caurumiņi, kas veicina vienmērīgu tvaika sadali pa šķidrumu, vai arī uz tās gala uzstiprināts ežektorveida uzgalis. Ievadot tvaiku pa vaļēju caurules galu, it



8.1. att. Sildīšana, tvaiku tieši ievadot šķidrumā.

īpaši sildīšanas sākumā, rodas stipri trokšņi un spēcīga sistēmas vibrācija. Pirms tvaika ievadīšanas atver nopūšanas ventili 5 un no tvaikvada izpūš kondensātu. Pēc tam, iepriekš aizverot nopūšanas ventili, atver tvaika ventili 4. Lai sildāmais šķidrums neieklūtu caurulēs un tvaika katlā, sildīšanas iekārtā ir vienvirziena vārsts 6.

Aprēķinot šādu sildīšanas iekārtu, jānosaka sildīšanai nepieciešamā tvaika masa D_m . Siltumnesēja masu jebkurai sildīšanas iekārtai nosaka, sastādot *siltuma bilanci*.

Ja no t_1 līdz t_2 °C jāsilda m kg šķidruma, kura īpatnējā siltumietilpība c J/(kg·K), tad, lai noteiktu nepieciešamo tvaika masu, vispirms aprēķina siltuma daudzumu, ko *ievada* sistēmā un *aizvada* no tās.

Ja tvaika entalpija h J/kg (iegūst no piesātināta ūdens tvaika tabulām atkarībā no tvaika spiediena, entalpiju agrāk izdotajā literatūrā bieži apzīmēja ar burtu i), tad sistēmā ievadītais siltuma daudzums veidojas 1) no siltuma daudzuma, kas ievadīts ar D_m kg tvaika, $D_m h$ džouli, un 2) no siltuma daudzuma, kas ievadīts ar auksto šķidrumu, mct_1 džouli.

Pēc sasildīšanas no sistēmas siltums tiek aizvadīts 1) ar karsto šķidrumu mct_2 džouli un 2) ar kondensātu $D_m c_k t_2$ džouli. Bez tam sildīšanas laikā no iekārtas ārējām virsmām starošanas un konvekcijas rezultātā apkārtējā vidē aizplūst Q_z džoulu siltuma.

Pamatojoties uz enerģijas nezūdamības likumu, sistēmā ievadītajam siltuma daudzumam jābūt vienādam ar siltuma daudzumu, kas aizvadīts no sistēmas:

$$D_m h + mct_1 = mct_2 + D_m c_k t_2 + Q_z.$$

Sildīšanai nepieciešamā tvaika masa

$$D_m = \frac{mc(t_2 - t_1) + Q_z}{h - c_k t_2} \quad (8.1)$$

Ja nav pieļaujama kondensāta piejaukšanās sildāmajam šķidrums, silda netieši ar tvaiku.

Netiešā sildīšana ar tvaiku. Sildot netieši ar tvaiku, sildāmais šķidrums (gāze) ar tvaiku nesaskaras. Tvaiks kondensējas sildvirsmas vienā pusē, vienlaikus sasildot sienu. Sildvirsmas otru pusi apskalo sildāmā vide.

Netiešo sildīšanu ar tvaiku izdara dažāda veida siltumapmainītājos, kas iedalās šādi: 1) *glodenes*; 2) *tvaika apvalki*; 3) *cauruļveida siltumapmainītāji*; 4) *spirālveida siltumapmainītāji*; 5) *plākšņuveida siltumapmainītāji*; 6) *siltumapmainītāji ar ribotām virsmām (kaloriferi)*.

Sildīšanai ar tvaiku lieto piesātinātu ūdens tvaiku, kuram siltumatdeves koeficients ir ievērojami lielāks nekā pārkarsētam tvaikam. Pārkarsēta ūdens tvaika lietošana pazemina siltumapmainītāja ražīgumu.

Sajās sildīšanas iekārtās tvaiku parasti pievada no augšas, lai tvaika plūsma netraucētu kondensāta noplūdi pa sildvirsmu. Kondensātu izvada no aparāta zemākās vietas. Siltumapmainītājos izlieto *tikai tvaika kondensācijas siltumu*. Pieņem, ka *kondensāta temperatūra vienāda ar tvaika temperatūru*.

8.1.3. Siltumapmainītāji

Glodenes. Glodenes siltumapmainītājus lieto neliela šķidruma tilpuma sildīšanai. To pamatveidi parādīti 8.2. attēlā. Glodenes siltumapmainītājus ievieto tvertnēs (reaktoros) stacionāri vai arī tie ir iegremdējami un izceļami. Tvaiku ievada glodenē, bet ap to atrodas sildāmais šķidrums.

Glodenes siltumapmainītāji var būt periodiskas vai nepārtrauktas darbības.

Atkarībā no sildāmā šķidruma īpašībām glodenes izgatavo no tērauda, vara, misiņa, plastmasas, keramikas, stikla, svina un citiem materiāliem. Maksimālais caurules diametrs nepārsniedz 65 mm. Ja diametrs lielāks, cauruli grūti izlikt.

Siltuma apmaiņa norisinās labāk, ja šķidrums gar glodenes ārējo virsmu plūst straujāk. To panāk, ieliekot tvertnē cilindrisku ieliktni *I*, kas veido gredzenveida spraugu, pa kuru šķidrums plūst ar lielāku ātrumu (8.3. att.).

Labākai kondensāta novadīšanai, ja tvaika spiediens ir 0,3... 0,5 MPa, glodenes izgatavo garumā $(225 \dots 275)d_c$, kur d_c — caurules diametrs. Ja vajadzīgās sildvirsmas iegūšanai jālieto garāka caurule, tad no kopējā garuma izveido vairākas glodenes; parasti glodenes ievieto vienu otrā vai vienu virs otras.

Glodenei aprēķina pievadāmā tvaika patēriņu un sildvirsmu.

Tvaika patēriņu aprēķina, sastādot siltuma bilanci. Ja glodenē sildāmā šķidrums patērē G kg/s un pievadāmā tvaika patērē D kg/s, tad, lietojot tāds pašus pārējos apzīmējumus, kā tieši sildot ar tvaiku, un apzīmējot kondensāta temperatūru ar t_k (kas vienāda ar piesātināta tvaika temperatūru), var rakstīt, ka sistēmā ievadīta siltuma plūsma: ar tvaiku — Dh vati un ar auksto šķidrumu — Gct_1 vati.

No sistēmas aizvada ar karsto šķidrumu Gct_2 vatus, ar kondensātu — $Dc_k t_k$ vatus un ar zudumiem apkārtējā vidē — Φ_z vatus.

Saskaņā ar enerģijas nezūdamības likumu

$$Dh + Gct_1 = Gct_2 + Dc_k t_k + \Phi_z.$$

Netiešai sildīšanai ar tvaiku nepieciešamais tvaika patēriņš ir

$$D = \frac{Gc(t_2 - t_1) + \Phi_z}{h - c_k t_k}.$$

Ja $Gc(t_2 - t_1) + \Phi_z = \Phi$, tad

$$D = \frac{\Phi}{h - c_k t_k}. \quad (8.2)$$

Vienādojums (8.2) lietojams tvaika patēriņa noteikšanai, netieši sildot ar tvaiku neatkarīgi no siltumapmainītāja veida.

Ja zināms vajadzīgais tvaika patēriņš D , var noteikt tā caurteci

$$Q = \frac{D}{\rho_t},$$

kur Q — tvaika caurtece, m^3/s ; ρ_t — tvaika blīvums attiecīgā spiedienā un temperatūrā, kg/m^3 .

Pieņemot tvaika ātrumu, tam ieplūstot glodenē (parasti $w = 30 \dots 40$ m/s), nepieciešamo caurules diametru var aprēķināt šādi:

$$d_c = \sqrt{\frac{4Q}{\pi w}} = 1,129 \sqrt{\frac{Q}{w}}.$$

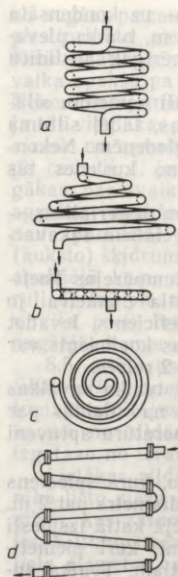
kur d_c izteikts metros.

Pēc aprēķinātā caurules diametra izvēlas cauruli ar valsts standartam atbilstošu diametru. Ja aprēķinātais caurules diametrs ir par lielu, tvaika plūsmu sadala pa vairākām sekcijām. Glodenes locījumu diametru izvēlas atkarībā no aparāta iekšējiem izmēriem. Ja siltumapmainītājā ievietots maisītājs, glodenes locījuma iekšējam diametram jābūt lielākam par maisītāja diametru.

Glodenes sildvirsmu aprēķina pēc šādas formulas:

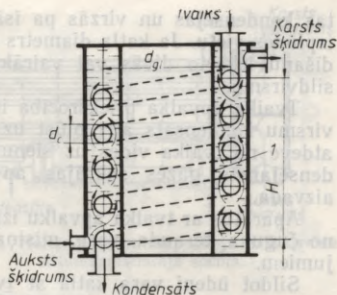
$$S = \frac{\Phi'}{k\Delta t_{vid}},$$

kur S — sildvirsmas laukums, m^2 ; Φ' — siltuma plūsma caur sildvirsmu, W , $\Phi' = Gc(t_2 - t_1)$; k — siltumpārejas koeficients, $W/(m^2 \cdot K)$;

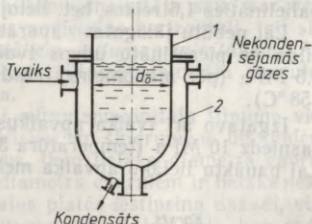


8.2. att. Glodeņu pamatveidi:

a — cilindriskā, *b* — koniskā,
c — plakanā spirālveida, *d* —
 cilpveida glodene.



8.3. att. Sildītājs ar cilindrisku ieliktni.



8.4. att. Katls ar tvaika apvalku.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}; \Delta t_{\text{vid}} \text{ — vidējā temperatūru starpība, } ^\circ\text{C}; G \text{ —}$$

sildāmā šķidruma patēriņš, kg/s.

Glodes kopējo garumu *l* nosaka pēc formulas

$$l = \frac{S}{\pi d_c},$$

kur *l* izsaka metros.

Glodes ieteicams lietot tad, ja sildvirsmā jāizgatavo no speciāla materiāla, kā arī tad, ja šķidrā fāzē satur mehāniskus piemaisījumus un sildišana jāveic verdošā stāvoklī. Dažreiz glodeni lieto kā papildu sildvirsmu.

Tvaika apvalki. Nelielu šķidruma daudzumu sildišanai, kā arī aparātos, kur nav iespējams ievietot glodeni, lieto tvaika apvalkus. Tvaika apvalkā (8.4. att.) tvaiku ievada starp katliem 1 un 2, kur

tas kondensējas un virzās pa īsāko ceļu uz leju — uz kondensāta izplūdes vietu. Ja katla diametrs d_0 ir lielāks par 1 m, tvaika pievadišanu iekārto divās vai vairāk vietās, lai vienmērīgāk apsildītu sildvirsmu.

Tvaika apvalka priekšrocība ir tā, ka pa vertikāli novietotu sildvirsmu kondensāts ātri plūst uz leju un neuzkrājas, tādēļ siltuma atdeve no tvaika vides uz sienu ir labāka nekā glodenēm. Nekondensējamās gāzes sakrājas apvalka augšdaļā, no kurienes tās aizvada.

Aparātus ar tvaika apvalku izgatavo no dažādiem materiāliem — no čuguna, tērauda, vara, misiņa un dažādiem speciāliem sakausējumiem.

Sildot ūdeni vara katlā ar tvaika apvalku, siltumpārejas koeficients ir $1160 \dots 4640 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ atkarībā no katla diametra: jo lielāks katla diametrs, jo mazāks siltumpārejas koeficients. Ievadot tvaiku apvalkā no vairākām pusēm, tā siltumpārejas koeficients var palielināties 1,5 reizes, bet, lietojot maisītāju, — pat 2 reizes.

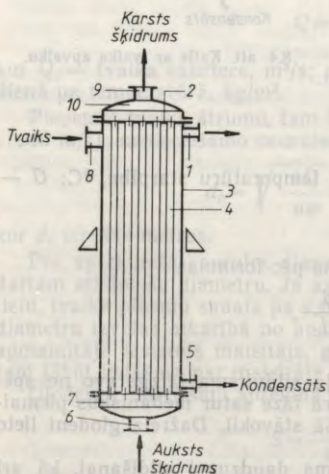
Lai nebūtu jāizgatavo aparāti ar biežām sienām, tvaika apvalkus silda ar piesātinātu ūdens tvaiku, kura spiediens nav lielāks par 0,5 MPa (pēc manometra, tātad virsspiediens, temperatūra aptuveni 158°C).

Izgatavo arī tvaika apvalkus, ko silda ar tvaiku, kura spiediens sasniedz 10 MPa (temperatūra 300°C) un apvalka diametrs pat 2 m. Lai panāktu lielāku apvalka mehānisko izturību, ārējā katlā izspiesti koniski izvīzījumi, kuri piemērināti iekšējam katlam. Tvaika apvalkus izgatavo ar sildvirsmu līdz 10 m^2 .

Sildīšanas iekārta (katls) ar tvaika apvalku var būt *vaļēja* (8.4. att.) vai *slēgtā*. Slēgtām iekārtām iekšējais katls pārsegts ar vāku. Slēgtā katlā var uzturēt dažādu spiedienu. Ja katlā ir virsspiediens, tad šādas iekārtas sauc par *autoklāviem*.

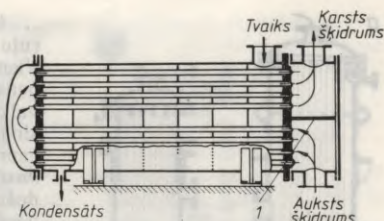
Cauruļveida siltumapmainītāji. Ja nepārtraukti jāsilda lieli šķidrums tilpumi, ne glodenes, ne tvaika apvalki nav piemēroti. Šādos gadījumos lieto *cauruļveida siltumapmainītājus*.

Cauruļveida siltumapmainītājs (8.5. att.) sastāv no caurulēm 4, kas ar galiem iestiprinātas platēs 2. Caurules ievietotas apvalkā 3, un to vaļējie gali izbeidzas apakšējā kamerā 7 un augšējā kamerā 10. Tvaiku ievada starpcauruļu telpā



8.5. att. Cauruļveida siltumapmainītāja shēma.

no augšas pa cauruli 8, kas piestiprināta pie apvalka. Kondensātu aizvada apvalka apakšā pa cauruli 5. Nekondensējamās gāzes, ja tās vieglākas par tvaiku, aizvāc no apvalka augšas pa cauruli 1, ja tās smagākas par tvaiku, tad no apvalka apakšas (attēlā nav parādīts). Sildāmo (auksto) šķidrumu pievada apakšējā kamerā pa cauruli 6, lai plūsma nebūtu virzīta pretī brīvajai konvekcijai. Sasildīto šķidrumu aizvada no augšējās kameras pa cauruli 9.



8.6. att. Horizontālā vairākpakāpju cauruļveida siltumapmainītāja shēma.

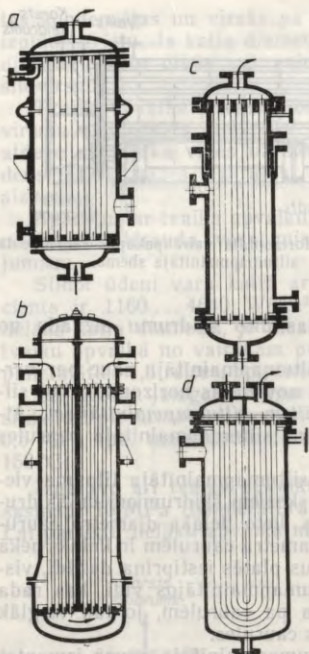
8.5. attēlā parādīto cauruļveida siltumapmainītāju sauc par *vertikālo siltumapmainītāju*. Ja caurules novietotas horizontāli, tad siltumapmainītājus sauc par *horizontāliem siltumapmainītājiem*. Atkarībā no sildāmā šķidruma īpašībām siltumapmainītāja caurules izgatavo no tērauda, vara vai misiņa.

Lielākas sildvirsmas izvietojšanai siltumapmainītāja tilpuma vienībā lieto maza diametra caurules. Viskoziem šķidrumiem un šķidrumiem, kas satur cietus piemaisījumus, lieto lielāka diametra caurules. Siltumpārejas koeficients maza diametra caurulēm ir lielāks nekā liela diametra caurulēm. Cauruļu galus platēs iestiprina dažādi, visbiežāk tās ievēl. Cauruļveida siltumapmainītājos vidi, kas rada nogulumus vai arī ir agresīva, virza pa caurulēm, jo tad vieglāk notīrīt sildvirsmu un apmainīt bojātās caurules.

8.5. attēlā dotajā cauruļveida siltumapmainītājā nevar izmantot lielu caurplūstošā šķidruma ātrumu, jo īsajā caurplūdes laikā (ja šķidruma ātrums ir liels) šķidrums neuzņem vajadzīgo siltuma daudzumu.

Lai palielinātu sildāmā šķidruma ātrumu, vienlaikus uzturot nepieciešamo beigu temperatūru, caurules sadala vairākās grupās, tā iegūstot *vairākpakāpju cauruļveida siltumapmainītāju* (8.6. att.). Šādā siltumapmainītājā šķidrums plūst cauri nevis uzreiz visām caurulēm, bet tikai daļai cauruļu. Tādēļ siltumapmainītāja kamerās ievietotas šķērssienu 1. Vairākpakāpju siltumapmainītājos ir līdz 12 pakāpju, līdz ar to sildāmā šķidruma ātrums caurulēs palielinās, sasniedzot 1,5...2 m/s.

Cauruļveida siltumapmainītājos darba laikā rodas ievērojama temperatūru starpība starp cauruļu sienu un apvalku. Tas rada termisko deformāciju, kas sevišķi bīstama (var saplēt caurules), ja apvalks un caurules ir no dažāda materiāla. Ja temperatūru starpība caurulēs un apvalkā pārsniedz 50 °C, lieto dažādus paņēmienus termiskās izplešanās kompensēšanai. Daži termiskās izplešanās efekta samazināšanas veidi parādīti 8.7. attēlā. *Lēcveida kompensatorus* (8.7. att. a) paredz tad, ja termiskā izplešanās ir 10...



8.7. att. Daži termiskās izplešanās kompensēšanas veidi.

... 15,5 mm un spiediens starpcauruļu telpā nepārsniedz 0,25 MPa. Viens lēcveida paplašinājums kompensē 4...5 mm, tādēļ vienā apvalkā var būt vairāki šādi paplašinājumi. 8.7. attēlā *b* parādīts cauruļveida siltumapmainītājs ar *kustīgu apakšējo kameru* (ar «peldošu galvīņu»), bet 8.7. attēlā *c* parādīts termiskās izplešanās kompensators ar *kustīgu cauruļu plati* (ar blīvējumu). *U* veida siltumapmainītāji (8.7. att. *d*) rūpniecībā samērā maz izplatīti, jo tiem grūti tīrāma sildvirsmas un sarežģīta izgatavošana.

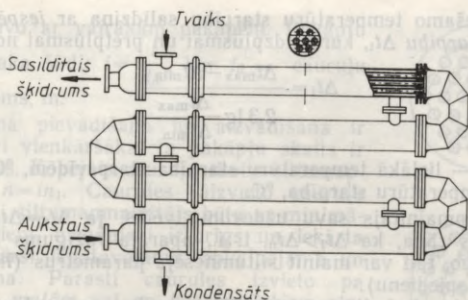
Sekciju siltumapmainītāji piekaitāmi pie cauruļveida siltumapmainītājiem. Tos lieto vidēm ar vienādu plūsmas ātrumu, ja nemainās to agregātstāvoklis. Šie siltumapmainītāji izveidoti pēc vairākpakāpju siltumapmainītāja principa, tikai starpcauruļu telpu parasti veido bez šķērssienām. Sekciju siltumapmainītājiem viegli var samazināt vai palielināt sildvirsmu, atvienojot vai pievienojot kādu sekciju. Sekciju cauruļveida siltumapmainītājs parādīts 8.8. attēlā.

Nelielu šķidrums daudzumu sildīšanai cauruļu skaitu sekcija samazina līdz vienai. Tad iegūst atsevišķus sildīšanas elementus, kas izveidoti no divām caurulēm, kur pa vienu plūst sildāmais šķidrums, bet pa otru — siltumnesējs (8.9. att.). Šādus siltumapmainītājus sauc par *cauruli caurulē*; atsevišķos elementus savieno virknē. Siltumapmainītājos caurule caurulē, mainot cauruļu diametrus, var nodrošināt lielus ātrumus un līdz ar to augstus siltumpārejas koeficientus. Parasti šādus siltumapmainītājus lieto augstiem spiedieniem un agresīviem šķidrumiem.

Cauruļveida siltumapmainītāju aprēķini. Siltumapmainītāji jāaprēķina pēc *siltumtehnikiem, konstruktīviem un hidrauliskiem rādītājiem*.

Siltumtehniko rādītāju aprēķinā nosaka nepieciešamo sildvirsmu un tvaika patēriņu:

$$S = \frac{\Phi}{k\Delta t_{\text{vid}}}; \quad D = \frac{\Phi}{h - c_k t_k}$$

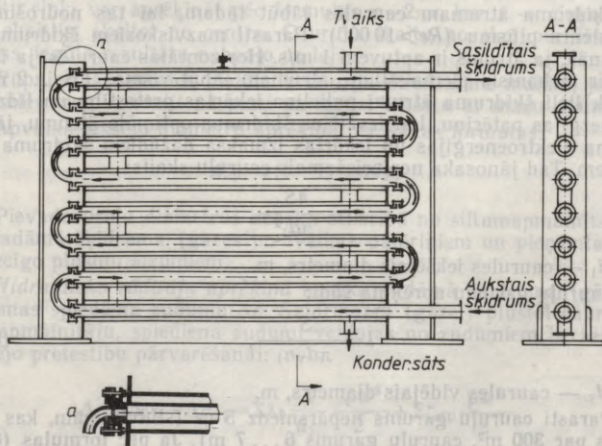


8.8. att. Sekciju cauruļveida siltumapmaiņtāja shēma.

kur S — sildvirsmā, m^2 ; Φ — nepieciešamā siltuma plūsma, W ; k — siltumpārejas koeficients, $W/(m^2 \cdot K)$; Δt_{vid} — vidējā temperatūru starpība, $^{\circ}C$; D — tvaika patēriņš, kg/s ; h — tvaika entalpija, J/kg ; c_k — kondensāta siltumietilpība, $J/(kg \cdot K)$; t_k — kondensāta temperatūra, $^{\circ}C$.

Vajadzīgajai siltuma plūsmai nosaka nepieciešamo temperatūru starpību Δt_n pēc formulas $\Delta t_n = \frac{\Phi}{kS}$.

Izvēloties kādu siltumapmaiņtāju, izdara kontrolaprēķinus, lai noskaidrotu, kā dotais aparāts nodrošinās vajadzīgo ražīgumu, un lai izvēlētos labāko sildīšanas variantu.



8.9. att. Siltumapmaiņtāja caurule caurulē shēma.

Nepieciešamo temperatūru starpību salīdzina ar *iespējamo temperatūru starpību* Δt_1 , kuru līdzplūsmāi un pretplūsmāi nosaka šādi:

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{2,3 \lg \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}}}$$

kur Δt_{\max} — lielākā temperatūru starpība starp vidēm, °C; Δt_{\min} — mazākā temperatūru starpība, °C.

Siltumapmainītājs savu uzdevumu veiks, ja $\Delta t_1 = \Delta t_n$. Ja kontrolaprēķins rāda, ka $\Delta t_1 > \Delta t_n$, t. i., aparāta ražīgums lielāks par nepieciešamo, tad var mainīt siltumnesēja parametrus (lietot tvaiku ar zemāku spiedienu).

Ja $\Delta t_1 < \Delta t_n$, tad siltumapmainītājs neveiks savu uzdevumu un jāapsver iespējas, kā palielināt siltumpārejas koeficientu (palielinot sildāmās vides ātrumu); var lietot augstāka spiediena tvaiku; samazināt siltuma plūsmu vai palielināt sildvirsmu.

Konstruktīvo rādītāju aprēķina uzdevums ir noskaidrot iekārtas pamatizmērus un tās konstruktīvos parametrus.

Vispirms, vadoties no sildāmā šķidruma patēriņa G_1 , nosaka cauruļu šķēsgriezuma laukumu

$$S_c = \frac{G_1}{\rho_s \omega_1},$$

kur S_c — cauruļu šķēsgriezuma laukums, m²; G_1 — šķidrums patēriņš, kg/s; ρ_s — sildāmā šķidrums blīvums, kg/m³; ω_1 — šķidrums ātrums caurulēs, m/s.

Šķidrums ātrumam caurulēs jābūt tādā, lai tas nodrošinātu turbulentu plūsmu ($Re > 10\,000$). Parasti mazviskoziem šķidrums to panāk, ja ātrums ir aptuveni 1 m/s. Horizontālās caurulēs, ja ūdeņim ir mehāniski piemaisījumi, ātrumam jābūt vismaz 1,5...2 m/s. Pārāk lieli šķidrums ātrumi palielina iekārtas pretestību un līdz ar to enerģijas patēriņu. Lai izvēlētos šķidrums optimālo ātrumu, jāsalīdzina elektroenerģijas un iekārtas izmaksa dažādiem šķidrums ātrums. Tad jānosaka nepieciešamais cauruļu skaits:

$$n_1 = \frac{4S_c}{\pi d_1^2},$$

kur d_1 — caurules iekšējais diametrs, m.

Cauruļu garums aprēķina šādi:

$$l = \frac{S}{\pi d_v n_1}, \quad (8.3)$$

kur d_v — caurules vidējais diametrs, m.

Parasti cauruļu garums nepārsniedz 5 m (sildvirsmām, kas lielākas par 300 m², cauruļu garums 6...7 m). Ja pēc formulas (8.3) aprēķinātais caurules garums ir lielāks par norādīto, siltumapmaini-

tāju izgatavo ar vairākām pakāpēm. Pakāpju skaitu nosaka šādi: $i = \frac{l}{l_d}$, kur l_d — cauruļu darba garums, m.

Šķidruma pievadišana un aizvadišana ir konstruktīvi vienkāršāka, ja pakāpju skaits ir pāra skaitlis. Kopējais cauruļu skaits siltumapmainītājā $n = in_1$. Caurules jāizvieto cauruļu platē tā, lai siltumapmainītājs būtu ar minimāliem izmēriem, mehāniski izturīgs un iekārta būtu vienkārši izgatavojama, apkalpojama un remontējama. Parasti caurules izvieto pa daudzstūru malām vai pa koncentriskiem riņķiem.

Izvietojojot caurules pa sešstūru malām (8.10. att. a), kopējo cauruļu skaitu iegūst šādi: $n = 3a(a-1) + 1 = \frac{3}{4}(b^2 - 1) + 1$, kur a — cauruļu skaits lielākā sešstūra malā, b — cauruļu skaits pa lielākā sešstūra diagonāli; $b = 2a - 1$.

Minimālā atstarpe t starp caurulēm (tā saucamais solis) atkarīga no cauruļu iestiprināšanas veida: caurules ievēlējot, $t = (1,25 \dots 1,3)d_2$, kur d_2 — caurules ārējais diametrs; iestiprinot ar blīvējumu, $t = d_2 + 9$ mm; metinot $t = 1,25d_2$.

Izvietojojot caurules pa koncentriskiem riņķiem (8.10. att. b), to skaitu riņķi var aprēķināt pēc formulas $n = 2\pi x$, kur x — riņķa kārtas skaitlis, skaitot no centra. Cauruļu skaitu nosakot pēc šīs formulas, iegūto rezultātu noapaļo uz leju.

Rūpniecībā caurules biežāk izvieto pa daudzstūru malām, jo tad caurules viegli sadalīt pa plati un iegūst iekārtu ar mazu diametru.

Apvalka iekšējo diametru aprēķina pēc šādas formulas:

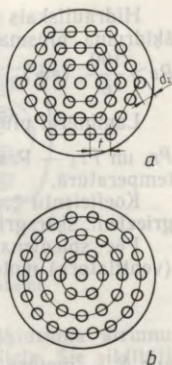
$$d_{ap} = t(b-1) + 4d_2.$$

Pievadcauruļu diametrus nosaka atkarībā no siltumapmainītājam pievadāmā šķidruma (gāzes un tvaika) patēriņiem un pieņemtajiem attiecīgo plūsmu ātrumiem.

Hidraulisko rādītāju aprēķinā nosaka sildāmā šķidrums (gāzes) plūsmas spiediena zudumu Δp . Šķidrumam (gāzei) plūstot caur siltumapmainītāju, spiediena zudumi veidojas no zudumiem berzes un vietējo pretestību pārvarēšanai:

$$\Delta p = \Delta p_b + \Delta p_{vp} = \Sigma \lambda_b \frac{l}{d_1} \frac{\rho \omega^2}{2} + \Sigma \zeta_{vp} \frac{\rho \omega^2}{2},$$

kur ω — šķidrums ātrums attiecīgā posmā, m/s.



8.10. att. Cauruļu izvietojums platē.

Hidrauliskais pretestības koeficients λ_b neizotermiskai turbulentai šķidruma plūsmai ir atkarīgs no sienu relatīvā raupjuma ε . Ja $Re > \frac{100}{\varepsilon}$, tad $\lambda_b = 0,1 \sqrt[4]{\varepsilon} (Pr_s/Pr_s)^{0,33}$.

Laminārai plūsmai $\lambda_b = \frac{64}{Re} \left(\frac{Pr_s}{Pr_s} \right)^{0,33} \left[1 + 0,22 \left(\frac{Gr Pr}{Re} \right)^{0,15} \right]$, kur Pr_s un Pr_s — Prantla kritēriji šķidrumam sienas un vidējā šķidruma temperatūrā.

Koeficientu ζ_{vp} iegūst atkarībā no vietējās pretestības veida (pagriezieni, šķērsgriezuma maiņa utt.).

Pēc spiediena zudumiem sildītājā nosaka nepieciešamo sūkņa (ventilatora) motora jaudu

$$N = \frac{Q \Delta p}{1000 \eta},$$

kur N — motora jauda, kW; Q — siltumapmainītājam caurplūstošā šķidruma (gāzes) caurtece, m³/s; η — sūkņa (ventilatora) lietderības koeficients.

Spiediena zudumi Δp raksturo sildīšanas iekārtu no ekonomiskā un siltumtehnikā viedokļa. Attiecīgās iekārtas spiediena zudumu Δp samazināšana saistīta ar šķidruma (gāzes) ātruma un līdz ar to siltumpārejas koeficienta k samazināšanu (klūst biežāka robežkārtā).

Mainot pievadāmā šķidruma patēriņu no G_1 uz G_2 , sildītāja pretestība mainīsies šādi:

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left(\frac{G_1}{G_2} \right)^{1,8}.$$

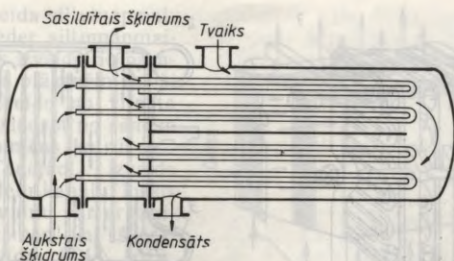
Nemainot ražīgumu, i siltumapmainītājus (elementus, sekcijas) saslēdzot virknē, spiediena zudumi palielināsies $i^{2,8}$ reizes. Iekārtas pretestību ietekmē arī spiediens un šķidruma viršana.

Hidrauliskie aprēķini viskoziem šķidrumiem dod aptuvenus rezultātus, jo attiecīgās sakarības iegūtas ūdenim, tātad lietojamas mazviskoziem šķidrumiem. Pārējos gadījumos precīzus datus iespējams iegūt tikai mēģinājumos, nosakot spiedienu pirms un aiz siltumapmainītāja.

Siltumapmainītāji ar dubultcaurulēm. Ķīmiskajā rūpniecībā lieto arī siltumapmainītājus ar dubultcaurulēm (8.11. att.). Pa caurulēm plūst sildāmais šķidruma vai gāze. Ārējās caurules apskalo siltumnesējs.

Spirālveida siltumapmainītāji. Spirālveida siltumapmainītāji izveidoti no divām metāla loksņēm, kas izlocītas spirālēs. Salīdzinājumā ar cauruļveida siltumapmainītājiem spirālveida siltumapmai-

¹ Relatīvais raupjums $\varepsilon = \frac{k}{r}$, kur k — absolūtais raupjums; r — caurules rādiuss. Ja lieto vilktas tērauda caurules, tad jaunām caurulēm $k=0,1$ mm; ilgi lietotām caurulēm, bet bez nogulumu kārtas un nekoroģējušām $k=0,2 \dots 0,3$ mm; caurulēm ar netīru, koroģējušu virsmu $k=0,5 \dots 0,8$ mm.



8.11. att. Siltumapmainītāja ar dubultcaurulēm shēma.

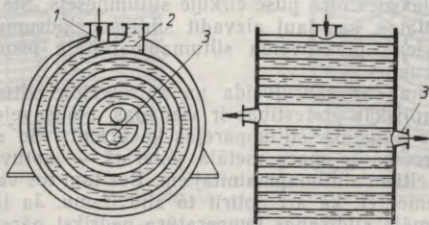
nītājiem ir augsts siltumpārejas koeficients, jo šķidruma ātrumu iespējams palielināt līdz 2 m/s un pretestība ir neliela. Šie sildītāji ir kompakti, piemēram, vienā kubikmetrā iespējams izvietot 34... 72 m² sildvirsmas, turpretī cauruļveida siltumapmainītājos tikai 18... 40 m².

8.12. attēlā parādīts spirālveida siltumapmainītājs, ko lieto šķidruma sildīšanai ar šķidrumu. Sildīšanai paredzētais šķidrums ieplūst pa kanālu 2. Kanāla 1 ievada siltumnesēju. Sasildītais šķidrums aizplūst pa izvadu 3. Attālums starp metāla loksniem (kanāla platums) nav liels — 6... 15 mm. Siltumapmainītāja augstums atkarīgs no metāla loksnes platuma, parasti līdz 1,1... 1,2 m. Siltumapmainītāja gali noslēgti ar noņemamiem vākiem. Tas atvieglo piekļūšanu sildvirsmai, kad tā jātīra. Šādi siltumapmainītāji darbojas labi pat tad, ja temperatūru starpība starp vidēm ir 2... 3 °C.

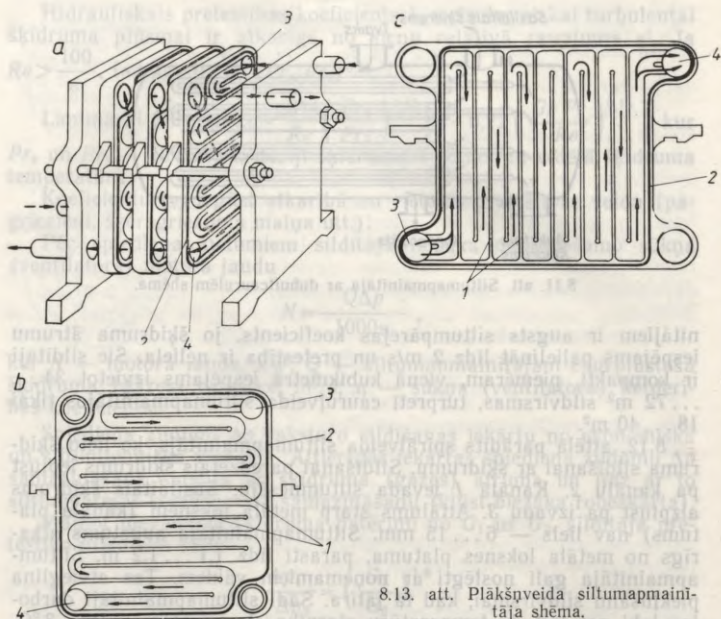
Sildot ar tvaiku, spirālveida siltumapmainītāju novieto vertikāli (uz gala). Tvaiku pievada no augšas vienlaikus visos tvaika kanālos.

Rūpniecībā dažreiz atsevišķus spirālveida siltumapmainītājus savstarpēji virknē, izveidojot sekcijveida vai blokveida siltumapmainītājus.

So siltumapmainītāju trūkumi: sarežģīta izgatavošana, iekārtas grūti remontējamas un nav lietojamas spiedieniem, kas augstāki par 1 MPa (parasti līdz 0,6 MPa). Lielākiem spiedieniem nepieciešamas biezas metāla loksnes, kas grūti salokāmas spirālē.



8.12. att. Spirālveida siltumapmainītāja shēma.



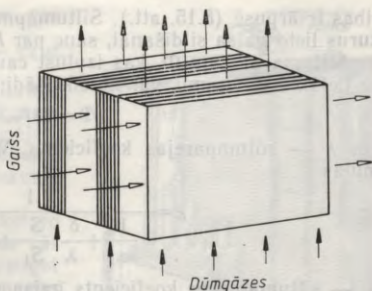
8.13. att. Plākšņveida siltumapmaiņtāja shēma.

Plākšņveida siltumapmaiņtāji. Plākšņveida siltumapmaiņtāji sastāv no vairākām plāksnēm, kuras saspiež kopā līdzīgi kā rāmjus filtrspiedēs (8.13. att. a). Plākšņu virsma ir ar ribām 1 un gumijas blīvējumu 2 gar malām. Saspiežot šādas plāksnes, izveidojas šauras (aptuveni 9 mm) spraugas — kanāli, pa kuriem plūst šķidrums. Kanāli var būt horizontāli vai vertikāli (8.13. att. b un c). Plākšņveida siltumapmaiņtājus izgatavo arī ar viļņotu virsmu.

Sildāmo šķidrumu ievada no viena stūra 3 un no pretējā stūra 4 to aizvada. Plāksnes otrā pusē cirkulē siltumnesējs. Starp plāksnēm var ievietot plates, kas ļauj aizvadīt sildāmo šķidrumu un ievadīt citu. Tādēļ vienā plākšņveida siltumapmaiņtājā iespējams sildīt vairākus šķidrumus.

Salīdzinājumā ar cauruļveida un spirālveida siltumapmaiņtājiem, ja hidrauliskās pretestības ir vienādas, plākšņveida siltumapmaiņtājiem ir augstāks siltumpārejas koeficients. Šo siltumapmaiņtāju priekšrocība ir mazs metāla patēriņš — aptuveni 2 reizes mazāks nekā citiem siltumapmaiņtājiem. Bez tam tos var ērti salikt, izjaukt un remontēt, kā arī notīrīt to sildvirsmu. Ja lieto gumijas blīves, maksimālā sildīšanas temperatūra nedrīkst pārsniegt 150°C. Sildīšanu var veikt līdz 1,5 MPa spiedienā.

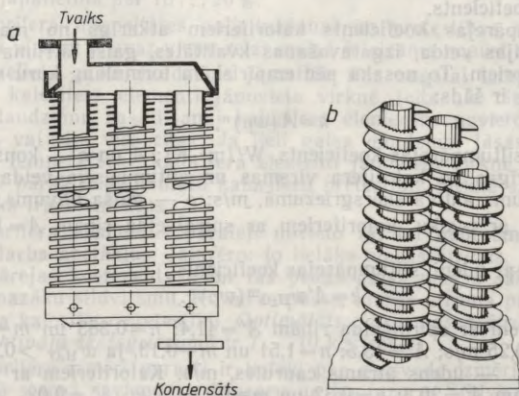
Pie šā veida siltumapmaiņtājiem pieder siltumapmaiņtāji, kurus izveido no paralēlām skārda plāksnēm (bieži plāksnes izveido no viļņota skārda), noslēdzot no sāniem un gala pamišus katru otro kanālu. Tādējādi izveido grupu paralēlu kanālu, kuros siltuma apmaiņu var organizēt pretplūsmas vai šķērsplūsmas veidā (8.14. att.). Šādus siltumapmaiņtājus lieto tad, ja abām vidēm ir aptuveni vienāds siltumatdeves koeficients, piemēram, sildot gaisu ar dūmgāzēm.



8.14. att. Plākšņveida siltumapmaiņtājs gāzēm.

Plākšņveida siltumapmaiņtāji ir kompakti un vienkārši. To īpatnējā sildvirsmas sasniedz $200 \dots 300 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

Siltumapmaiņtāji ar ribotām sildvirsmām (kaloriferi). Parasti siltumapmaiņtājus ar ribotām virsmām lieto, ja siltuma apmaiņa notiek starp vidēm ar stipri atšķirīgiem siltumatdeves koeficientiem, piemēram, sildot gaisu, kuram $\alpha_1 = 10 \dots 60 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, ar ūdens tvaiku, kuram $\alpha_2 \approx 11\,600 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Šādos gadījumos siltuma apmaiņas veicināšanai tajā pusē, kur atrodas vide ar mazāku siltumatdeves koeficientu, palielina virsmu, izveidojot ribas. Parasti vide, kurai ir mazāks siltumatdeves koeficients, atrodas ārpusē, tādēļ arī



8.15. att. Ribotu cauruļu veidi:

a — ar plākšņveida ribām, b — ar spirālveida ribām.

ribas ir ārpusē (8.15. att.). Siltumapmainītājus ar ribotu sildvirsmu, kurus lieto gaisa sildīšanai, sauc par *kalorifieriem*.

Siltuma plūsmu Φ , kas izplūst caur ribotajām caurulēm, izsakot uz lielāko sildvirsmu, var noteikt šādi:

$$\Phi = k \Delta t_{\text{vid}} S,$$

kur k — siltumpārejas koeficients, $W/(m^2 \cdot K)$, ko nosaka pēc formulas

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} \frac{S}{S_1} + \frac{1}{\alpha_2} \frac{S}{S_1}};$$

α_1 — siltumatdeves koeficients gaisa pusē, $W/(m^2 \cdot K)$; α_2 — siltumatdeves koeficients caurulēs, $W/(m^2 \cdot K)$; S_1 — gludās virsmas laukums, m^2 ; S — ribotās virsmas laukums, m^2 ; Δt_{vid} — vidējā temperatūru starpība, $^{\circ}C$; δ — sienas biezums, m ; λ — siltumvadītspējas koeficients, $W/(m \cdot K)$.

Kaloriferos par siltumnesēju lieto tvaiku vai karstu ūdeni. Gāzes fāzes plūsma jāvirza perpendikulāri caurulēm, jo tad sildvirsmu izmanto pilnīgi.

Rūpniecībā kaloriferus lieto gaisa uzsildīšanai, žāvēšanā, telpu apsildei vai gaisa kondicionēšanai. Visbiežāk šādām vajadzībām lieto kaloriferus ar plākšņveida ribām. Tie sastāv no caurulēm, kurām uzstiprinātas skārda (1 mm biezas) plāksnes. Cauruļu gali izbeidzas kamerās (8.16. att.).

Kaloriferu caurules sagrupē sekcijās. Vienā sekcijā ir 4...8 caurules. Sekciju skaits — 2...7. Silda ar tvaiku. Kaloriferus novieto vertikāli. Tad kondensāts labāk noplūst un ir augstāks siltumpārejas koeficients.

Siltumpārejas koeficients kalorifieriem atkarīgs no materiāla, konstrukcijas veida, izgatavošanas kvalitātes, gaisa ātruma un citiem faktoriem. To nosaka pēc empīriskām formulām, kuru vispārīgais veids ir šāds:

$$k = A (\omega \rho)^n,$$

kur k — siltumpārejas koeficients, $W/(m^2 \cdot K)$; A un n — konstantes, kas atkarīgas no kalorifera virsmas un siltumnesēja veida; ω — gaisa ātrums aktīvā šķērsgriezumā, m/s ; ρ — gaisa blīvums, kg/m^3 .

Sildot ar tvaiku, kalorifieriem ar spirālveida ribām $A = 17,5$ un $n = 0,47$.

Sildot ar ūdeni, siltumpārejas koeficients

$$k = A' \omega_{H_2O}^m (\omega \rho)^n.$$

Kalorifieriem ar spirālveida ribām $A' = 41,4$; $n = 0,383$ un $m = 1,9$, ja $\omega_{H_2O} \leq 0,25$ m/s ; $A' = 15,5$; $n = 1,51$ un $m = 0,13$, ja $\omega_{H_2O} > 0,25$ m/s , kur ω_{H_2O} — ūdens ātrums caurulēs, m/s . Kalorifieriem ar plākšņveida ribām $A' = 20,3$; $n = 0,32$ un $m = 0,13$, ja $\omega_{H_2O} = 0,02 \dots 1$ m/s .

Reizinājumu $\omega \rho$ sauc par gaisa *masas ātrumu*, tā vienība $[\omega \rho] = [m/s] \cdot [kg/m^3] = kg/(m^2 \cdot s)$.

Masas ātrumu kaloriferiem var noteikt šādi: $\omega\rho = \frac{G}{S_a}$, kur G — caur kaloriferu izplūstošā gaisa patēriņš, kg/s; S_a — aktīvais šķēsgriezuma laukums (aptuveni 40% no kopējā), m^2 (aktīvais šķēsgriezuma laukums ir visu spraugu kopējais laukums gaisa plūsmas virzienā).

Otrs svarīgs lielums, kas raksturo kaloriferu, ir tā *pretestība*. No tās atkarīga ventilatora jauda. Pieaugot kalorifera pretestībai, pieaug nepieciešamā jauda — un otrādi.

Kalorifera pretestību H_k , līdzīgi siltumpārejas koeficientam, izsaka kā masas ātruma funkciju, t. i., $H_k = f(\omega\rho)$. Kaloriferiem pretestību nosaka šādi: kaloriferiem ar spirālveida ribām $H_k = 1,1z(\rho\omega)^{1,97}$, ar plākšņveida ribām $H_k = 0,71z(\rho\omega)^{1,62}$, kur z — pakāpju skaits, tvaika kaloriferiem $z = 1$.

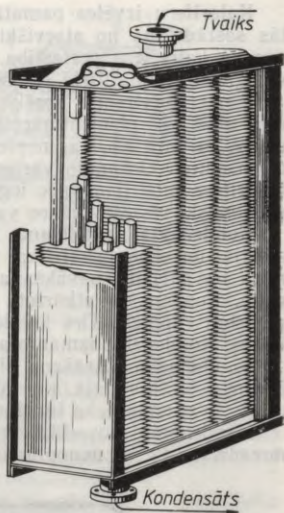
Ja gaisa plūsmas virzienā novieto vairākus kalorifera elementus (virknē), tad kopējo pretestību iegūst, pareizinot viena elementa pretestību ar to skaitu virknē. Ja caur kaloriferu plūst putekļains gaiss, pretestība jāpalielina par 10...20%.

Kalorifera intensitātes palielināšanai un pretestības samazināšanai tā virsmu vismaz vienu reizi maiņā ieteicams nopūst ar tvaiku.

Ja neliels gaisa daudzums jāsasilda līdz augstai temperatūrai, vairāki kalorifera elementi jānovieto virknē (cits aiz cita). Lielu gaisa daudzumu sasildīšanai kalorifera elementus novieto paralēli (blakus vai citu virs cita). Ja lieli gaisa daudzumi jāsasilda līdz augstai temperatūrai, kalorifera elementi jānovieto virknē un paralēli. Lai pārāk nepalielinātu kaloriferu pretestību, virknē saslēdz ne vairāk kā trīs elementus.

Kalorifera elementus paralēli novieto tā, lai nodrošinātu optimālos darba apstākļus. Jāievēro: jo lielāks masas ātrums, jo lielāks siltumpārejas koeficients k un tās pašas gaisa masas sasildīšanai vajag mazāku sildvirsmu. No otras puses, masas ātruma pieaugums palielina kalorifera pretestību. *Optimālais gaisa masas ātrums kalorifera aktīvajā šķēsgriezumā* ir 7...10 kg/($m^2 \cdot s$).

Kalorifera izmēri parasti ir lielāki par gaisvada izmēriem, tādēļ tos savā starpā savieno ar difuzoru un konfuzoru. Sildvirsmas tīrīšanai un apskatei, novietojot kalorifera elementus citu aiz cita, starp tiem jāatstāj līdz 200...250 mm liela atstarpe.



8.16. att. Kalorifera elements ar plākšņveida ribām.

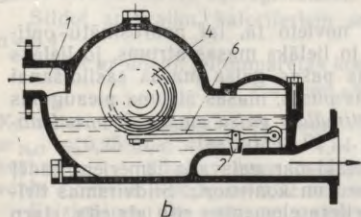
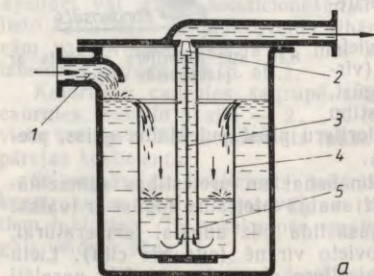
Kaloriferu izvēles pamatā ir sildvirsmas lieluma noteikšana un tās sastādīšana no atsevišķiem kalorifera elementiem. Bez tam jānosaka kalorifera pretestība. Kaloriferu izvēli var izdarīt analītiski vai grafiski. Analītiski sildvirsmu nosaka pēc formulas (7.93).

Pirms sildvirsmas aprēķināšanas izvēlas kalorifera modeli un paredz atsevišķo elementu izvietojumu, jo citādi nav iespējams noteikt masas ātrumu w_p , kas nepieciešams siltumpārejas koeficienta k aprēķināšanai. Optimālo variantu iegūst, izdarot aprēķinus dažādiem kalorifera modeļiem; pēc iegūtajiem rezultātiem izvēlas tehniski un ekonomiski visizdevīgākos variantus.

Kondensāta novadišana. Ar tvaiku apsildāmie aparāti darbosies efektīvi un ekonomiski tikai tad, ja tiek nodrošināta kondensāta pareiza novadišana, savākšana un tālāka izmantošana tehnoloģiskajā ciklā. Kondensāta atkārtota izmantošana ievērojami ietaupa ūdens patēriņu rūpniecībā. Tīrs kondensāts ir ideāls tvaika katlu barošanas ūdens. Kondensāts izmantojams arī par siltumnesēju.

Kondensāta uzkrāšana sildīšanas kamerā pazemina iekārtas ražīgumu, jo tajā daļā, kur atrodas kondensāts, siltumpārejas koeficients ir zemāks nekā tur, kur kondensējas tvaiks.

Kondensāta novadītājiem jānodrošina automātiska kondensāta novadišana tā, lai nenoplūstu tvaiks.

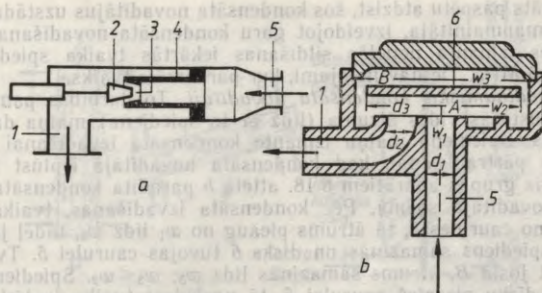


8.17. att. Kondensāta novadītāju shēmas.

Kondensāta novadītāji iedalāmi trīs grupās: 1) *pludiņu*; 2) *termostatiskie* un 3) *termodinamiskie kondensāta novadītāji*.

Pludiņu kondensāta novadītāji (kondenspodi). Sildīšanas aparātiem kondensāta novadītājus lieto ar *vaļēju* un *slēgtu pludiņu*. Šie kondensāta novadītāji nodrošina nepārtrauktu kondensāta novadišanu sistēmās ar piesātinātu un pārkarsētu tvaiku arī tad, ja ir ievērojamas kondensāta daudzuma svārstības. Kondensāta novadītājus ar vaļēju pludiņu lieto zemākiem spiedieniem, bet ar slēgtu pludiņu — vidējiem spiedieniem (līdz 1,6 MPa). Šo kondensāta novadītāju trūkumi: sarežģīta konstrukcija, lieli gabarīti.

Kondensāta novadītājs ar vaļēju pludiņu shematiski parādīts 8.17. attēlā a. Pa cauruli 1 ieplūst kondensāts. Tad,



8.18. att. Termostatisko un termodinamisko kondensāta novadītāju shēmas.

kad sasniegts attiecīgais līmenis, kondensāts pārlīst pāri skārda pludiņa 4 augšējai malai un sāk to piepildīt. Pludiņam sasniedzot attiecīgu masu, tas grimst un kopā ar to uz leju virzās stienis 3 un konuss 2, atverot vākā izplūdes caurumu, un kondensāts tāpēc, ka kondensāta novadītājā ir lielāks spiediens, pa cauruli 5 ceļas uz augšu un izplūst no kondensāta novadītāja.

Kad noteikts tilpums kondensāta izvadīts, pludiņš kļūst vieglāks, ceļas uz augšu un konuss noslēdz izplūdes vietu. Šī darbība atkārtojas.

Kondensāta novadītājs ar slēgtu pludiņu parādīts 8.17. attēlā b. Ievadot kondensātu pa cauruli 1, tā līmenis ceļas un paceļ skārda pludiņu 4, kuram piestiprināta svira 6 un noslēdzējkonusus 2. Pludiņam ceļoties uz augšu, konuss atver izplūdes vietu un kondensāts izplūst no kondensāta novadītāja. Pazeminoties kondensāta līmenim, pludiņš grimst, un konuss noslēdz izplūdes vietu. Ja kondensāts vienmērīgi ieplūst kondensāta novadītājā, pludiņš paliek noteiktā augstumā un tiek nodrošināta kondensāta nepārtraukta noplūde.

Uzstādot šos kondensāta novadītājus, jāseko, lai pludiņa ass būtu vertikāla, kā arī tie jānovieto vismaz 0,5 m zemāk par kondensāta izplūdes vietu (no siltumapmainītāja).

Termostatiskie kondensāta novadītāji. To darbība pamatojas uz metālu dažādu termisko izplešanos. Visiem šā veida kondensāta novadītājiem, ieplūstot tvaikam (sakarā ar to, ka tvaikam augstāka temperatūra nekā kondensātam), izbeidzas kondensāta noplūde.

Termostatiskā kondensāta novadītāja shēma dota 8.18. attēlā a. Kondensātam ieplūstot pa ieplūdni 5, no krāsainiem metāliem izgatavotā caurule 4 saraujas, konuss 2 atbrīvo izplūdes vietu 3 un kondensāts izplūst pa izplūdni 1. Kad caurulē 4 ieplūst tvaiks, tā pagarinās un konuss 2 aizspiež izplūdni 3, aizkavejot tvaika noplūšanu.

Termostatiskie kondensāta novadītāji ir vienkārši pēc uzbūves, droši darbā un ievērojami mazāki par pludiņu kondensāta novadītājiem. Tie ir jutīgi pret tvaika spiediena maiņu. Temperatūru starpībai starp tvaiku un kondensātu jābūt vismaz 2...4°C. Lai

kondensāts paspētu atdzist, šos kondensāta novadītājus uzstāda tālāk no siltumapmainītāja, izveidojot garu kondensāta novadišanas cauruli. Tos izmanto nelielās sildīšanas iekārtās tvaika spiedieniem 0,1...1,6 MPa. Tie nav lietojami, kur pārkarsēts tvaiks.

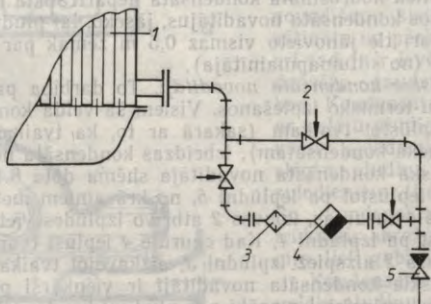
Termodinamiskie kondensāta novadītāji. To darbības pamatā ir cauri plūstošās vides ātruma (līdz ar to spiediena) maiņa dažādās tā joslās. Spiediena maiņu izmanto kondensāta izvadišanai un tā plūsmas pārtraukšanai, kad kondensāta novadītājā ieplūst tvaiks.

No šīs grupas aparātiem 8.18. attēlā *b* parādīta kondensāta diskveida novadītāja shēma. Pēc kondensāta izvadišanas, tvaikam izplūstot no caurules 5, tā ātrums pieaug no w_1 līdz w_2 , tādēļ joslā *A* tvaika spiediens samazinās un diska 6 tuvojas caurulei 5. Tvaikam ieplūstot joslā *B*, ātrums samazinās līdz w_3 ; $w_3 < w_2$. Spiediens pieaug un disku piespiež caurulei 5, tā noslēdzot tvaika izplūdi. Kad caurulē ieplūst kondensāts un temperatūra pazeminās, spiediens zem diska paceļ to un kondensāts izplūst pa izplūdni 1. Lai kondensāta novadītājs normāli darbotos, jāievēro šādas attiecības $d_3/d_1 = 3 \dots 4,5$ un $d_1/d_2 = 1 \dots 3$.

Termodinamiskie kondensāta novadītāji ir nelieli un viegli, bez regulēšanas darbojas arī tad, ja ir pārkarsēts tvaiks. Tie vislabāk darbojas, ja tvaika izplūdes pretspiediens nepārsniedz 20...30% no ieplūdes spiediena. Šie kondensāta novadītāji nav lietojami, ja tvaika spiediens ir zemāks par 0,1 MPa.

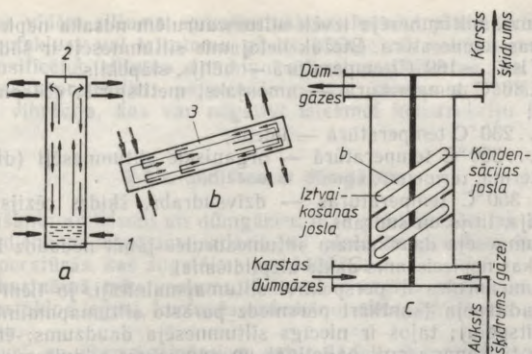
Kondensāta novadītāja pievienošana siltumapmainītājam shematiski parādīta 8.19. attēlā. Katram siltumapmainītājam vēlams ierīkot savu kondensāta novadītāju. Nav ieteicams no dažādiem siltumapmainītājiem kondensātu ievadīt kolektora vadā. Katram kondensāta novadītājam, ja to ievada kolektora vadā, jābūt vienvirziena ventilim (sk. 8.19. att. 5).

Lai kondensāta novadītājs kalpotu ilgāk, pirms tā novieto filtru 3. Kondensāta novadītājus (izņēmums ir termostatiskie novadītāji) novieto pēc iespējas tuvāk siltumapmainītājam. Ja kondensāta



8.19. att. Kondensāta novadītāja pievienošana siltumapmainītājam:

1 — siltumapmainītājs, 2 — ventīlis, 3 — filtrs, 4 — kondensāta novadītājs, 5 — vienvirziena ventīlis.



8.20. att. Siltumcauruļu un sildīšanas iekārtas shēma.

temperatūra pirms un aiz kondensāta novadītāja ir vienāda, tad notiek tvaika noplūde.

Siltumcaurules. Siltumcaurulēm raksturīga ļoti intensīva siltuma apmaiņa, vienkārša konstrukcija un nēcīgs enerģijas patēriņš siltumnesēja pārvietošanai. Pie tām pieder arī termosifoni (Perkinsa caurule).

8.20. attēlā *a* parādīts *termosifons* — vertikāla caurule ar šķidruma iztvaicēšanas joslu *1*. Ja silda caurules apakšējo galu, šķidrums iztvaiko. Tvaiks plūst uz caurules augšējo galu *2*, kur kondensējas un atdod siltumu. Attālumu starp caurules iztvaikošanas un kondensācijas joslu sauc par adiabatisko joslu. Kondensāts smaguma spēka ietekmē plūst pa caurules iekšējo virsmu uz iztvaikošanas joslu, nodrošinot nepārtrauktu iztvaikošanu un kondensāciju.

Termosifona trūkums — iztvaicēšanas joslai jāatrodas zem kondensācijas joslas.

Analogiski izveidotas un darbojas siltumcaurules (diametrs 15... 100 mm, garums līdz 6 m). 8.20. attēlā *b* parādītā siltumcaurule atšķiras no termosifona ar to, ka darbināma jebkurā stāvoklī. Kondensācijas josla var atrasties pat zemāk par iztvaicēšanas joslu. Siltumcaurulēs gar iekšējo caurules virsmu novietots kapilāra materiāla oderējums *3* (vilnas audums, stikla audums, polimēri, metāla sieti, kapilārs metāla sakausējums, keramika u. c.). To sauc par dakti. Dakts nodrošina kondensāta atgriešanos no kondensācijas joslas uz iztvaikošanas joslu (kapilāro spēku iedarbībā) neatkarīgi no caurules stāvokļa.

Ir arī tādas siltumcaurules, kurās kondensāta atgriešanos uz iztvaicēšanas joslu nodrošina centrālās spēks (caurule rotē).

Sildītāja shēma, kurā ir siltumcaurules, parādīta 8.20. attēlā *c*. Siltumnesēji siltumcaurulēs ir šķidrums ar augstu iztvaikošanas siltumu, augstu siltumvadītspēju, mazu viskozitāti, lielu virsmas

spraigumu. Siltumnesēja izvēli siltumcaurulēm nosaka nepieciešamā sildīšanas temperatūra. Biežāk lietojamie siltumnesēji ir šādi:

— 271 ... — 160 °C temperatūrā — hēlijs, slāpeklis;

0 ... 80 °C temperatūrā — amonjaks, metilspirts, etilspirts, acetons;

80 ... 230 °C temperatūrā — ūdens;

230 ... 350 °C temperatūrā — organiskie siltumnesēji (dinils jeb dauterma, termens);

virš 350 °C temperatūras — dzīvsudrabs, šķidrās cēzijs, kālijs, nātrijs, litijs un sudrabs.

Siltumnesēja daudzumam siltumcaurulēs jābūt nedaudz lielākam par to, kas nepieciešams dakts aizpildīšanai.

Siltumcaurules ir perspektīvi siltumapmainītāji, jo tiem ir liela siltumvadītspēja (simtkārt pārsniedz parasto siltumapmainītāju siltumvadītspēju); tajos ir nēcīgs siltumnesēja daudzums; ērta sildvirsmas tīrīšana; viegli palielināt un samazināt sildvirsmu, mainot siltumcauruļu skaitu; bojātu siltumcauruli viegli apmainīt pret jaunu, nepastādinot sildīšanas iekārtu.

Siltumapmainītāju intensifikācija. Siltumapmainītāju intensifikācija bieži saistīta ar to hidrauliskās pretestības palielināšanos. Tas ekspluatācijas laikā rada patērējamās enerģijas palielināšanos nepieciešamo plūsmu nodrošināšanai. Izmantojams tikai tāds intensifikācijas veids, kas dod ekonomisku efektu.

Paaugstinot siltumapmainītāju darbības intensitāti, jāseko sildvirsmas stāvoklim. Sildvirsmai no abām pusēm jābūt tīrai (bez katlākmens un nogulumiem).

Konstruējot siltumapmainītājus, jāorientējas uz minimālo termisko pretestību (δ/λ), izvēloties attiecīgu metālu un pēc iespējas plānāku sienu.

Cauruļveida siltumapmainītājos intensifikācijas nolūkā starpcauruļu telpā novieto šķērssienu. Kondensējot tvaiku, cenšas samazināt kondensāta kārtas termisko pretestību, piestiprinot pie caurulēm slīpas virsmas, paātrinot tvaika plūsmas ātrumu. Sildvirsmu pārklāj ar hidrofobām vielām, kas novērš sildvirsmas slapināšanu, un kārtainās kondensācijas vietā rodas pilienu kondensācija.

Tālāk minētie intensificēšanas veidi paredzēti, lai samazinātu vai nepārtraukti atjaunotu robežkārtu, kas rodas, vidēm pārvietojoties gar sildvirsmu. Robežkārtā plūsma ir lamināra, tādēļ tā bremzējoši darbojas uz siltuma pāreju, jo siltums robežkārtā izplatās vadīšanas rezultātā. Caurulēs garenvirzienā un šķērsvirzienā ievieto ribas, spirāles (turbolizatorus), kas palielina siltumatdeves koeficientu α līdz piecām reizēm; caurules iekšpusē rada mākslīgu sienas raupjumu; tās aizpilda ar dažāda veida pildķermeņiem (lodēm, gredzeniem, spirālēm u. c.). Sildvirsmu veido no dažāda diametra caurulēm plūsmas virzienā (difuzors—konfuzors), no viļņotām caurulēm.

Viršanas intensificēšanai cenšas palielināt burbuļu rašanās centrus, pārklājot virsmu ar porainu slāni. Organizē viršanu cietu vielu suspendētā (pseudosašķidrinātā) slānī.

Siltuma apmaiņu intensificē, palielinot plūsmu ātrumu.

Gāzes vidēm siltuma apmaiņu uzlabo, ievadot plūsmā cietas daļiņas (putekļus) vai trisatomu gāzes (CO₂); tas veicina starošanu.

Intensificējot siltuma apmaiņu aparātos, jāatceras, ka līdz ar hidrauliskās pretestības palielināšanos var sākties arī pastiprināta cauruļu vibrācija, kas var negatīvi ietekmēt konstrukciju izturību.

8.1.4. Sildīšana ar dūmgāzēm

Sildīšanai ar liesmu un dūmgāzēm ir tā priekšrocība, ka atmosfēras spiedienā to iespējams izdarīt ļoti plašā temperatūru intervālā, pat temperatūrās, kas augstākas par 1400 °C.

Īss kurināmā raksturojums. Siltuma enerģiju sildīšanai rūpniecības apstākļos iegūst, kurtuvēs sadedzinot cieto, šķidro vai gāzveida kurināmo.

Jebkurš no šiem kurināmiem satur šādus elementus: oglekli C, ūdeņradi H, skābekli O, slāpekli N un sēru S. Bez tam kurināmais satur mitrumu U un nedegošus savienojumus, kurus sauc par pelniem A. Atsevišķo komponentu saturu izsaka procentos un *kurināmo darba stāvoklī* raksturo ar šādu sastāvu:

$$C^d + H^d + O^d + N^d + S^d + A^d + U^d = 100\%.$$

Pirmo četru elementu saturs attiecīgam kurināmajam ir nemainīgs vai tuvu nemainīgam, un to summu, izteiktu procentos, sauc par *kurināmā organisko masu*:

$$C^o + H^o + O^o + N^o = 100\%.$$

Pārējās kurināmā sastāvdaļas veido *balastu*, t. i.,

$$B = S^d + A^d + U^d.$$

Sērs kā kurināmā sastāvdaļa deg, tomēr to pieskaita balastam, jo pēc sadegšanas rodas sēra dioksīds SO₂, kas izraisa iekārtas koroziju. Kurināmais sēru var saturēt sulfātu, sulfīdu un organisku savienojumu veidā. Pēdējie divi sēra savienojumu veidi deg, tādēļ šādu sēru sauc par *gaistošo sēru* S_g^d. Sulfāti nedeg un paliek sārņos; tos sauc par *negaistošo sēru* S_{ng}^d.

Jebkuru kurināmo raksturo tā *sadedgšanas siltums* (siltumspēja). Kurināmā sadegšanas siltums ir siltuma daudzums, kas atbrīvojas, *pilnīgi sadegot* 1 kg cietā vai šķidrā vai 1 m³ gāzveida kurināmā.

Ja kurināmā atbrīvotajam siltumam pieskaita siltumu, kas rodas, degšanas laikā iegūtajam ūdens tvaikam kondensējoties un atdziesot līdz 0 °C, tad iegūst tā saucamo *augstāko kurināmā sadegšanas siltumu* Q_a^d. Ja neievēro ūdens tvaika kondensācijas un atdzišanas siltumu, iegūst zemāko *kurināmā sadegšanas siltumu* Q_z^d.

Kurināmā augstāko sadegšanas siltumu var noteikt pēc Mendeļejeva formulas

$$Q_a^d = 339,1C^d + 1256H^d - 109(O^d - S_g^d),$$

kur Q_a^d izteikts vienībā kJ/kg.

Aptuvenu sakarību starp augstāko un zemāko sadegšanas siltumu var izteikt ar šādu vienādojumu:

$$Q_z^d = Q_a^d - 25,1(9H^d + U^d),$$

kur $9H^d + U^d$ ir ūdens tvaika saturs, %, kas rodas, sadegot 1 kg kurināmā. Sadegšanas siltums kurināmiem mainās ļoti plašās robežās.

Dažādu kurināmo salīdzināšanai ieviests jēdziens *nosacītais kurināmais*. Par nosacīto kurināmo uzskata tādu kurināmo, kas, pilnīgi sadegot, izdala 29 309 kJ/kg vai gāzveida kurināmam 29 309 kJ/m³ siltuma. Dāļot attiecīgā kurināmā sadegšanas siltumu ar 29 309, iegūst skaitli (ekivalentu), kas rāda, par cik konkrētais kurināmais atšķiras no nosacītā kurināmā.

Kurināmo raksturo arī tā gaistošo vielu saturs. Akmeņogles raksturo arī koksa saķepšana un pelnu kūstamība.

Kurināmā sadedzināšana. Siltumtehnikos aprēķinos vienkāršības dēļ pieņem šādu gaisa sastāvu (procentos): gaisā pēc tilpuma ir 21% skābekļa un 79% slāpekļa, pēc masas — 23,2% skābekļa un 76,8% slāpekļa.

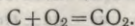
Gāzu blīvumi, kādus pieņem siltumtehnikos aprēķinos, sako poti 8.1. tabulā.

Ja degšanai lieto kurināmo ar sastāvu

$$C^d + H^d + O^d + N^d + S_g^d + A^d + U^d = 100\%,$$

tas nozīmē, ka 1 kg šāda kurināmā satur 0,01C^d kg oglekļa, 0,01H^d kg ūdeņraža utt.

Oglekļa degšana. Ja notiek pilnīga sadegšana, ogleklim sadegot, rodas oglekļa dioksīds. Uz vienu molu oglekļa jāpievada viens mols skābekļa, un rodas viens mols oglekļa dioksīda



t. i., 12 kg oglekļa savienojoties ar 32 kg skābekļa, rodas 44 kg oglekļa dioksīda.

1 kg oglekļa sadegšanai nepieciešami $\frac{32}{12} \approx 2,667$ kg jeb $\frac{2,667}{1,429} \approx 1,866$ m³ skābekļa.

Pilnīgi sadegot 1 kg oglekļa, rodas $\frac{44}{12} \approx 3,667$ kg jeb $\frac{3,667}{1,977} \approx 1,855$ m³ oglekļa dioksīda.

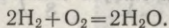
8.1. tabula

Gāzu blīvumi
(101 325 Pa spiedienā, 0 °C temperatūrā)

Gāze	Blīvums, kg/m ³	Gāze	Blīvums, kg/m ³
Gaiss	1,293	Skābeklis	1,429
Oglekļa dioksīds	1,977	Slāpeklis	1,257
Oglekļa monoksīds	1,250	Ūdens tvaiks	0,804
Sēra dioksīds	2,927	Ūdeņradis	0,089

Sadedzinot oglekli, kas atrodas 1 kg kurināmā, vajag $2,667 \cdot 0,01C^d$ kg skābekļa.

Udeņraža degšana. Kurināmā esošais ūdeņradis sadeg šādi:



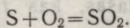
1 kg ūdeņraža sadegšanai nepieciešami $\frac{32}{4} = 8$ kg skābekļa un rodas $\frac{36}{4} = 9$ kg ūdens tvaika, t. i., pēc tilpuma $\frac{8}{1,429} = 5,598$ m³ skābekļa un $\frac{9}{0,804} \approx 11,194$ m³ ūdens tvaika.

Ja 1 kg kurināmā kopumā satur $0,01H^d$ kg ūdeņraža, tad sadeg nevis viss ūdeņradis, bet tikai *brīvais ūdeņradis*, — tas ūdeņradis, kas nav savienojies ar skābekli. Brīvo ūdeņradi aprēķina, no ūdeņraža kopējā satura atņemot *saistīto ūdeņradi* H_s^d . Saistīto ūdeņradi aprēķina, pieņemot, ka viss kurināmā esošais skābeklis savienojas ar ūdeņradi. Zināms, ka 8 kg skābekļa saista 1 kg ūdeņraža. Tātad, zinot kurināmajā esošo skābekļa saturu, var noteikt saistīto ūdeņradi $H_s^d = \frac{O^d}{8}$.

1 kg kurināmā satur šādu brīvā ūdeņraža masu — $0,01\left(H^d - \frac{O^d}{8}\right)$.

Skābekļa masa, kas nepieciešama šādas ūdeņraža masas sadedzināšanai, ir $0,01\left(H^d - \frac{O^d}{8}\right)8$.

Sēra degšana. Gaistošais sērs kurināmajā sadeg, veidojot sēra dioksīdu:



1 kg sēra sadegšanai vajadzīgs $\frac{32}{32} = 1$ kg skābekļa; rodas $\frac{64}{32} = 2$ kg sēra dioksīda. Ja 1 kg kurināmā satur $0,01S_g^d$ kg sēra, tad sēra sadedzināšanai vajadzīga tāda pati skābekļa masa.

Tādēļ 1 kg kurināmā sadedzināšanai teorētiski nepieciešamā skābekļa masa ir

$$O_t = \left[2,667C^d + 8 \left(H^d - \frac{O^d}{8} \right) + S_g^d - O^d \right] 0,01 \quad \text{jeb}$$

$$O_t = 0,02667C^d + 0,08 \left(H^d - \frac{O^d}{8} \right) + 0,01(S_g^d - O^d).$$

Parasti kurināmā sadegšanai lieto nevis tīru skābekli, bet gaisu, kas satur tikai 23,2% skābekļa (masas procentos). Teorētiski nepieciešamo sausā gaisa masu iegūst šādi:

$$L_t = \frac{0,02667C^d + 0,08 \left(H^d - \frac{O^d}{8} \right) + 0,01(S^d - O^d)}{0,232},$$

pēc izdalīšanas

$$L_t = 0,115C^d + 0,345 \left(H^d - \frac{O^d}{8} \right) + 0,043(S^d - O^d), \quad (8.4)$$

kur L_t — sadegšanai nepieciešamā teorētiskā gaisa masa, kg/kg.

Degšanas procesos gaiss ar kurināmo sajaucas nepilnīgi, tādēļ kurtuvē jāievada lielāka gaisa masa, nekā teorētiski nepieciešams.

Faktiski nepieciešamo gaisa masu L_t aprēķina šādi:

$$L_t = \alpha L_t,$$

kur α — gaisa pārākuma koeficients.

Gaisa pārākuma koeficients rāda, cik reizu kurtuvē ievadītā gaisa masa pārsniedz teorētiski nepieciešamo. Sis koeficients atkarīgs galvenokārt no kurināmā veida, t. i., no tā, cik labi gaiss sajaucas ar kurināmo.

Var pieņemt, ka gaisa pārākuma koeficients cietam kurināmajam ir 1,3...1,7; šķīdram kurināmajam — 1,1...1,2; gāzveida kurināmajam — 1,05...1,2. Putekļveida kurināmā degšana līdzīga gāzveida kurināmā degšanai. Gaisa pārākuma koeficients dažreiz var būt arī ievērojami lielāks (piemēram, žāvētavu kurtuvēs, kur nav nepieciešams iegūt augstu temperatūru, $\alpha = 2 \dots 5$).

Lai aprēķinātu dūmvadu, jāzina dūmgāzu masa, kas rodas, sadedzinot kurināmo.

Kopējā dūmgāzu masa, kas rodas, sadegot 1 kg kurināmā, veidojas

1) no oglekļa dioksīda masas $3,667C^d \cdot 0,01 = 0,03667C^d$;

2) no ūdens tvaika masas, kas rodas, ūdeņradim sadegot, $9H^d \cdot 0,01 = 0,09H^d$;

3) no ūdens tvaika masas, kurš iekļuvis dūmgāzēs, iztvaikojot kurināmā mitrumam, $0,01U_d$;

4) no ūdens tvaika masas, kurš iekļuvis dūmgāzēs ar gaisu, jo kurināmā sadegšanai kurtuvē pievada nevis sausu gaisu, bet mitru.

Ja gaisa mitruma saturs $x \frac{\text{kg mitruma}}{\text{kg sausa gaisa}}$, tad ar gaisu dūmgāzēs ievada mitrumu $xL_t = \alpha xL_t$;

5) no skābekļa masas, jo praktiski kurtuvē ievada skābekli vairāk, nekā tas vajadzīgs kurināmā degšanai. Ja 1 kg gaisa satur 0,232 kg skābekļa, tad skābekļa masa dūmgāzēs ir $0,232(L_t - L_t) = 0,232L_t(\alpha - 1)$;

6) no slāpekļa masas, kurš ievadīts kurtuvē līdz ar gaisu, $0,768L_t = 0,768\alpha L_t$;

7) no kurināmā esošā slāpekļa, kas viss pāriet dūmgāzēs, t. i., $0,01N^d$.

Kopējā dūmgāzu masa, kas rodas, sadegot 1 kg kurināmā, izsakāma šādi:

$$G_d = 0,03667C^d + 0,09H^d + 0,01U^d + \alpha xL_t + 0,232L_t(\alpha - 1) + 0,768\alpha L_t + 0,01N^d \quad (8.5)$$

vai dūmgāzu tilpums

$$V_d = \frac{G_d}{\rho_d},$$

kur V_d — dūmgāzu tilpums no 1 kg kurināmā, m^3 ; ρ_d — dūmgāzu blīvums, kas normālos apstākļos ir $\sim 1,32 \frac{kg}{m^3}$.

Pēc formulām (8.4) un (8.5) aprēķina nepieciešamo gaisa masu un dūmgāzu masu, sadedzinot cieto un šķidro kurināmo.

Kurināmā patēriņa noteikšana. Kurtuves, dūmeju aprēķinos un gaisa pievadīšanas iekārtas projektēšanā jāzina kurināmā patēriņš. To nosaka tāpat kā sildīšanai nepieciešamo tvaika patēriņu, sastādot sildīšanas iekārtas siltuma bilanci. Siltuma bilances sastādīšanai izmantojama 8.21. attēlā parādītā sildīšanas iekārtas shēma.

Siltuma daudzums, ko ievada sistēmā, veidojas šādi:

1) *kurināmā fizikālais siltums*. Uz katru kilogramu kurināmā tas nosakāms šādi:

$$q_1 = c_k t_k,$$

kur q_1 — siltuma daudzums, J/kg; c_k — kurināmā īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K); t_k — kurtuvē ievadāma kurināmā temperatūra, °C;

2) *kurināmā sadegšanas siltums* Q_2^d , J/kg;

3) siltums, ko sistēmā ievada līdz ar degšanai nepieciešamo gaisu:

$$q_2 = (1005 + 1968x)t_g L_f,$$

kur x — gaisa mitruma saturs, $\frac{kg \text{ ūdens}}{kg \text{ sausa gaisa}}$; t_g — kurtuvē ieplūstošā gaisa temperatūra, °C; L_f — faktiski nepieciešamā gaisa masa 1 kg kurināmā sadedzināšanai, kg/kg; 1005 un 1968 ir sausa gaisa un ūdens tvaika īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K).

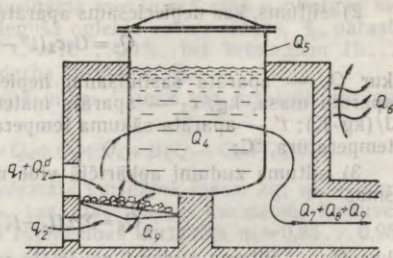
Sistēmā patērēto siltuma daudzumu veido

1) siltums, kas nepieciešams šķidruma uzsildīšanai:

$$Q_4 = G_1 c_1 (t_2 - t_1),$$

kur Q_4 — šķidruma uzsildīšanai nepieciešamais siltums, J; G_1 — sildāmā šķidruma masa, kg; c_1 — sildāmā šķidruma īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K); t_1 — šķidruma sākuma temperatūra, °C; t_2 — šķidruma beigu temperatūra, °C.

Ja kādai vielai mainās agregātstāvoklis vai reakciju rezultātā izdalās siltums, tad arī tas jāievēro;



8.21. att. Sildīšanas iekārtas shēma.

2) siltums, kas nepieciešams aparāta sasildīšanai

$$Q_5 = G_2 c_2 (t'' - t'),$$

kur Q_5 — aparāta sasildīšanai nepieciešamais siltums, J; G_2 — aparāta masa, kg; c_2 — aparāta materiāla īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K); t' — aparāta sākuma temperatūra, °C; t'' — aparāta beigu temperatūra, °C;

3) siltuma zudumi apkārtējā vidē no katla un apmūrējuma virsmas

$$Q_6 = \Sigma \alpha (t_s - t_v) S \tau,$$

kur Q_6 — siltuma zudumi apkārtējā vidē, J; α — kopējais siltum-atdeves koeficients, W/(m²·K), $\alpha = \alpha_k + \alpha_{st}$; t_s — virsmas temperatūra, °C; t_v — apkārtējās vides temperatūra, °C; S — virsma, kas atdod siltumu apkārtējai videi, m²; τ — procesu norises laiks, s;

4) siltuma zudumi no katra kilograma kurināmā, kuri rodas, dūmgāzēm aizplūstot:

$$Q_7 = G_d c_d \Delta t_d,$$

kur Q_7 — siltuma zudumi ar dūmgāzēm, J; G_d — dūmgāzu masa no 1 kg kurināmā, kg; c_d — dūmgāzu īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K); t_d — aizplūstošo dūmgāzu temperatūra, °C;

5) siltuma zudumi, kas rodas, kurināmajam ķīmiski nepilnīgi sadegot.

Sadedzinot 1 kg oglekļa līdz CO₂ (*pilnīgā sadegšana*), izdalās 339·10⁵ J/kg siltuma, turpreti, ja tāda pati oglekļa masa sadeg līdz CO (*nepilnīgā sadegšana*), tad izdalās tikai aptuveni 102·10⁵ J/kg siltuma.

Sadedzinot kurināmo nepilnīgi, uz katru kilogramu oglekļa zaudē 237·10⁵ J. Tādēļ siltuma zudumus, kas rodas nepilnīgā sadegšanā uz katru kilogramu sadedzināmā kurināmā, var izteikt šādi:

$$Q_8 = 237 \cdot 10^5 C^d \frac{CO}{CO_2 + CO},$$

kur Q_8 — siltuma zudumi kurināmā nepilnīgas sadegšanas dēļ, J; C^d — oglekļa saturs darba kurināmā, %; CO — oglekļa oksīda saturs aizplūstošās dūmgāzēs, % (pēc tilpuma); CO₂ — oglekļa dioksīda saturs aizplūstošās dūmgāzēs, % (pēc tilpuma);

6) siltuma zudumi, kas rodas mehāniskā ziņā nepilnīgas sadegšanas dēļ. Šādi siltuma zudumi rodas tāpēc, ka kurināmais daļēji izbirst caur ārdū spraugām; daļa kurināmā tiek aizrauta līdzī dūmgāzēm, un daļa paliek nesadegusi sārņos. Siltuma zudumus, kas rodas mehāniskā ziņā nepilnīgas sadegšanas dēļ, aprēķina, neievērojot izbīrušo kurināmo, kas oglēm ir aptuveni 0,3%. Šādus siltuma zudumus uz katru kilogramu kurināmā aprēķina pēc formulas

$$Q_9 = \frac{339,15 \cdot 10^5 C^s + 502,44 \cdot 10^5}{100 - C^s} A^d,$$

kur Q_9 — siltuma zudumi kurināmā mehāniskā ziņā nepilnīgas sadegšanas dēļ, J; C^s — nesadedegušā oglekļa saturs sārņos, %, parasti antracītam un akmeņoglēm $C^s = 15 \dots 20\%$, bet brūnoglēm $15 \dots 25\%$; A^d — pelnu saturs darba kurināmā, %.

Saskaņā ar enerģijas nezūdamības likumu var uzrakstīt siltuma bilances vienādojumu

$$B\eta_k(q_1 + Q_z^d + q_2) = Q_4 + Q_5 + Q_6 + B(Q_7 + Q_8 + Q_9),$$

kur B — procesa laikā sadedzinātā kurināmā masa, kg; η_k — kurtuves lietderības koeficients, kas atkarīgs no kurināmā, kurtuves un degšanas režīma, parasti rūpniecības kurtuvēm $\eta_k = 0,85 \dots 0,95$.

Sadedzinātā kurināmā masa

$$B = \frac{Q_4 + Q_5 + Q_6}{\eta_k(q_1 + Q_z^d + q_2) - (Q_7 + Q_8 + Q_9)}.$$

Zinot kurināmā patēriņu, var iegūt kopējo gaisa masu, kas ik sekundi jāpievada iekārtā:

$$L_{kop} = \frac{L_p B}{\tau},$$

kur L_{kop} — kopējais gaisa patēriņš, kg/s; τ — procesa norises ilgums, s.

Dūmgāzu tilpums, kas sekundē rodas, sadedzinot kurināmo:

$$V_{kop} = \frac{V_d B}{\tau},$$

kur V_{kop} — kopējais dūmgāzu tilpums, kas rodas sekundē, m^3/s .

Kurtuvju pamatizmēru noteikšana. Sildīšanas iekārtu kurtuvēm nosaka degšanas telpas lielumu un ārdū laukumu.

Kurtuves degšanas telpas lieluma noteikšanai jāzina *kurtuves tilpuma termiskā slodze Φ/V . Kurtuves tilpuma termiskā slodze rāda to siltuma daudzumu, kas izdalās kurtuvē katrā sekundē no $1 m^3$ degšanas telpas, kurināmajam pilnīgi sadegot.*

Kurtuves tilpuma termiskā slodze atkarīga no kurināmā veida, dedzinot kūdru, malku — $(232 \dots 290) \cdot 10^3 \text{ W/m}^3$; akmeņogles, antracītu — $(290 \dots 348) \cdot 10^3 \text{ W/m}^3$; skaidas un citus zāģētavu atkritumus — $(174 \dots 232) \cdot 10^3 \text{ W/m}^3$; gāzveida kurināmo — $(232 \dots 348) \cdot 10^3 \text{ W/m}^3$; mazutu — $(232 \dots 348) \cdot 10^3 \text{ W/m}^3$.

Kurtuves degšanas telpas tilpumu V_k nosaka šādi:

$$V_k = \frac{BQ_z^d}{\frac{\Phi}{\tau \cdot V}}, \quad (8.6)$$

kur V_k — kurtuves degšanas telpas tilpums, m^3 ; B — procesa laikā sadedzinātais kurināmais, kg; Q_z^d — kurināmā sadegšanas siltums, J/kg; τ — procesa ilgums, s.

Nepieciešamo ārdū laukumu nosaka pēc kopējā siltuma daudzuma, kas jāiegūst laika vienībā, un ārdū termiskās slodzes $\frac{\Phi}{R}$. Ārdū termiskā slodze rāda no siltuma daudzumu, kas izdalās no 1 m² ārdū virsmas laukuma katrā sekundē, kurināmo pilnīgi sadedzinot.

Atkarībā no kurināmā un ārdū veida nelielai kurtuvei ar horizontāliem ārdū termiskā slodze ir šāda: dedzinot kūdrā, malķu — (696...928) · 10³ W/m², antracītu — (464...696) · 10³ W/m², akmeņogles — (580...696) · 10³ W/m².

Ārdū laukumu aprēķina pēc formulas

$$R = \frac{BQ_z^d}{\frac{\Phi}{\tau R}}, \quad (8.7)$$

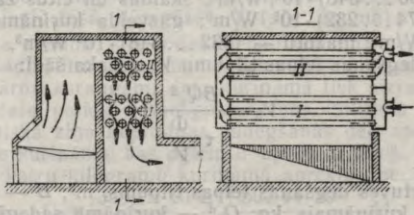
kur R — ārdū laukums, m².

Ar dūmgāzēm sildāmo iekārtu veidi. Iekārtas sildīšanai ar dūmgāzēm darbojas periodiski vai nepārtraukti.

Periodiskas darbības iekārtas sildīšanai ar dūmgāzēm ir dažāda veida katli, kas ievietoti tieši kurtuvē vai arī dūmejās. Katla izmantošanu pildzina, ja tā dibenu no tieša starojuma pasargā ar velvi, kurā ir radiālas spraugas. Lai palielinātu sildvirsmu, katliem izveido ieliektus vai izliektus dibenus. Ja sildīšanai nepieciešami vairāki katli, tad tos ieteicams novietot vienā dūmejā ar kopēju kurtuvi, tādējādi palielinot iekārtas lietderības koeficientu.

Katlu apmūrējumu izveido tā, lai siltuma zudumi būtu pēc iespējas mazāki, bet dūmeju šķersgriezumi būtu tādi, ka dūmgāzes tajās pārvietotos ar ātrumu 2...8 m/s. Dūmejas nav ieteicams izveidot ar krasiem pagriezieniem un straujām šķersgriezumu maiņām, jo tas ievērojami palielina iekārtas pretestību. Tādā gadījumā dabiskajai velkmei vajadzīgi augstāki dūmeņi, bet mākslīgajai velkmei — lielāks enerģijas patēriņš dūmsūcēja darbināšanai.

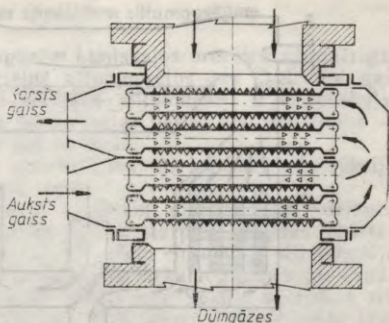
Nepārtrauktas darbības iekārtas sildīšanai ar dūmgāzēm izveidotas no caurulēm, kas ievietotas dūmejās (8.22. att.). Sildīšanai



8.22. att. Nepārtrauktas darbības iekārta sildīšanai ar dūmgāzēm.

paredzēto šķidrumu nepārtraukti ievada cauruļu kūlī *I*, tālāk tas pārvietojas uz cauruļu kūlī *II*, no kurienes karsto šķidrumu aizvada. Caurules no ārpusēs apskalo dūmgāzes, kas plūst no kurtuves uz dūmeni.

No krāsnīm un cepliem aizplūstošo dūmgāzu siltuma tālākai izmantošanai ir liela nozīme šo iekārtu siltumenerģētisko rādītāju paaugstināšanā. Aizplūstošo dūmgāzu siltumu var izmantot *rekuperatoros, reģeneratoros un utilizācijas katlos.*



8.23. att. Cauruļveida rekuperators ar adatveida izciļņiem.

Rekuperatori ir parastie nepārtrauktas darbības virsmas siltumapmainītāji, kuros gar sienas vienu pusi plūst sildāmais gaiss vai gāze, gar otru — dūmgāzes. Visbiežāk rekuperatorus lieto gaisa sildīšanai. Tos izgatavo no keramikas vai metāla.

Keramikas rekuperatori izveidoti no keramikas plāksnēm, no caurumotiem ugunsizturīgiem blokiem vai caurulēm. Šos rekuperatorus lieto gaisa sildīšanai līdz 1200 °C, kā arī tad, ja dūmgāzu temperatūra ir tik augsta, ka nevar lietot metāla rekuperatorus.

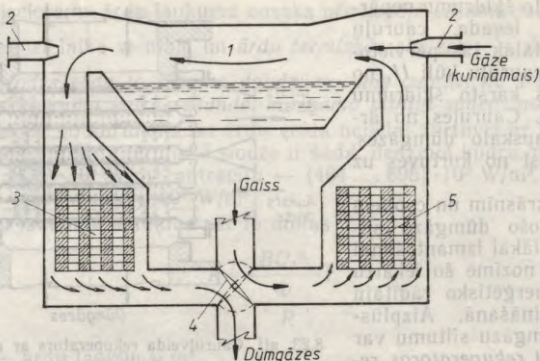
Metāla rekuperatorus izgatavo no čuguna, parastā tērauda vai termiski izturīga tērauda. Gludajiem čuguna rekuperatoriem dūmgāzu temperatūra pieļaujama līdz 850 °C, bet cauruļveida rekuperatoriem ar adatveida izciļņiem vai ribām — līdz 800 °C. Gaisu šādos rekuperatoros sasilda līdz 450 °C. Lietojot parastā tērauda rekuperatorus, gāzei pieļaujama temperatūra līdz 750 °C. Gaisu šajos rekuperatoros sasilda līdz 350 °C.

Lai sasniegtu temperatūru 1000...1100 °C, rekuperatorus izgatavo no čuguna ar hroma un alumīnija piedevām vai no speciāla termiski izturīga tērauda. Šādos rekuperatoros gaisu var sasildīt līdz 900 °C.

Cauruļveida rekuperators ar adatveida izciļņiem parādīts 8.23. attēlā. Tas ir kompakts, ar lielu iekšējo un ārējo sildvirsmu.

Rekuperatoru trūkumi: sildvirsmā grūti tīrāma, savienojumu vietas ir neblīvas.

Reģeneratoros rūpniecībā lieto krāsnīm, kurās jāuztur temperatūra, kas augstāka par 1000 °C, un jāsilda gaiss vai arī gaiss un gāze ar zemu sadegšanas siltumu. Gaisu vai gāzi reģeneratoros silda ar ugunsizturīgā pildījumā akumulēto siltumu, caur pildījumu pārmaiņus laižot karstas atgāzes un sildāmo vidi. Tādēļ jābūt



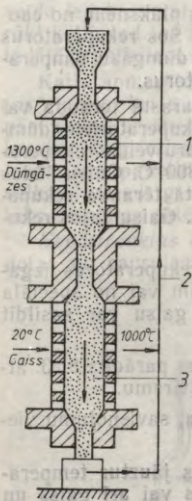
8.24. att. Krāsns un gaisa reģeneratora shēma.

diviem reģeneratoriem: kamēr vienu silda ar karstajām dūmgāzēm, tikmēr otru dzesē. Ja ir jāsilda gaiss un gāze, reģeneratoru skaitu dubulto.

8.24. attēlā parādīta krāsns 1 ar diviem viens otram pretī novietotiem degļu komplektiem 2, kas darbojas pārmaiņus, reģeneratori 3 un 5 un vārsts (vai aizbīdnis) 4, kas pārslēdz dūmgāzu un gaisa plūšanas virzienus. Atkarībā no reģeneratora augšējās pildījuma kārtas temperatūras dūmgāzu plūsmas virzieni parasti pārslēdzas automātiski.

Pēc gāzes virziena reģeneratorus iedala vertikālajos un horizontālajos reģeneratoros. Pildījumam lieto ugunsizturīgos ķieģeļus, bet temperatūrām virs 1350 °C — dinasas un magnezīta ķieģeļus. Plūsmu virzieni reģeneratoros mainās ik pēc 15...30 minūtēm. Gaisa un dūmgāzu ātrums $w=0,5...1,0$ m/s (attiecinot uz gāzes tilpumu 0 °C temperatūrā).

Reģenerators ar slidošu blīvu pildījuma slāni parādīts 8.25. attēlā. Graudains ugunsizturīga materiāla slānis pārvietojas pa vertikālu šahtu virzienā no augšas uz leju. Augšējā kamerā 1 pildījuma slānim plūst cauri karstas dūmgāzes un sakarsē šo slāni. Apakšējā kamerā 3 sakarsētajam graudainajam slānim vada cauri aukstu gaisu (gāzi) un to sasilda. No šahtas apakšas birstošo graudaino materiālu ar transportieri 2 pārvieto uz augšu un ievada atpakaļ kamerā 1.



8.25. att. Reģenerators ar slidošu blīvu pildījuma slāni shēma.

8.1.5. Sildīšana ar speciāliem siltumnesējiem

Bez ūdens tvaika un dūmgazēm ķīmiskajos procesos vienmērgai sildīšanai lieto dažādus speciālus siltumnesējus gan šķidruma, gan tvaika veidā. Plašāk lietotie speciālie siltumnesēji ir minerāleļļa, pārkarsēts ūdens, difenils un difeniloksīds vai to abu maisījums — dinils jeb dauterma, izkausēti sāļi un metāli.

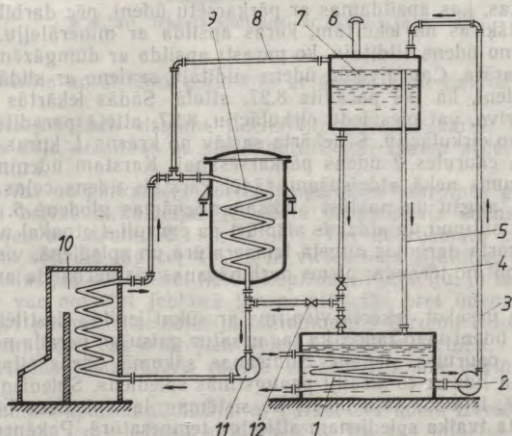
Atkarībā no siltumnesēja īpašībām mainās iekārtas konstrukcija un aparātu savienošanas shēma.

Lietojot šķidrus siltumnesējus, iespējami divi darbības varianti: *ar brīvo cirkulāciju*, ko rada temperatūru starpība dažādās iekārtas vietās, un *ar piespiedu cirkulāciju*. Piespiedu cirkulācijā siltumnesēja plūsmu rada sūknis. Iekārtas ar piespiedu cirkulāciju darbojas daudz intensīvāk par brīvās cirkulācijas sildītājiem. Sūknis nodrošina siltumnesējam ātrumu aptuveni 2 m/s. Tas sekmē siltumpārejas koeficienta k palielināšanos.

Sildīšana ar minerāleļļu. Minerāleļļu par siltumnesēju lieto eļļu, sveķu, vasku, plastmasu un citu vielu ražošanā, kā arī organiskajā sintēzē.

Sildīšanai izmantojamas minerāleļļas ar augstu uzliesmošanas temperatūru (līdz 310°C) un mazu viskozitāti. Rūpniecībā reti kad ar eļļu silda temperatūrās, kas augstākas par 250°C . Minerāleļļa nedrīkst saturēt nepiesātinātos ogļūdeņražus, viegli gaistošus komponentus un mehāniskus piemaisījumus. Sildīšanā ar minerāleļļu galvenokārt izmanto piespiedu cirkulāciju.

Ar minerāleļļu apsildāmas iekārtas shēma parādīta 8.26. attēlā. Lai samazinātu eļļas viskozitāti, minerāleļļas krātuvē 1 eļļu uzsilda



8.26. att. Ar minerāleļļu apsildāmas iekārtas shēma.

līdz 50...60°C un ar sūkni 2 pa cauruli 3 ievada izplešanās tvertnē 7. Ja atver ventilus 4 un 12, eļļa ieplūst sistēmā un to piepilda. Pēc tam ar cirkulācijas sūkni 11 rada eļļas plūsmu caurulēs. Minerāleļļu sasilda nepārtrauktas darbības sildītājā 10, no kurienes karstā eļļa aizplūst uz siltumapmainītāju 9. Tur tā atdod savu siltumu sildāmajai videi un pēc tam ieplūst atpakaļ sūkni.

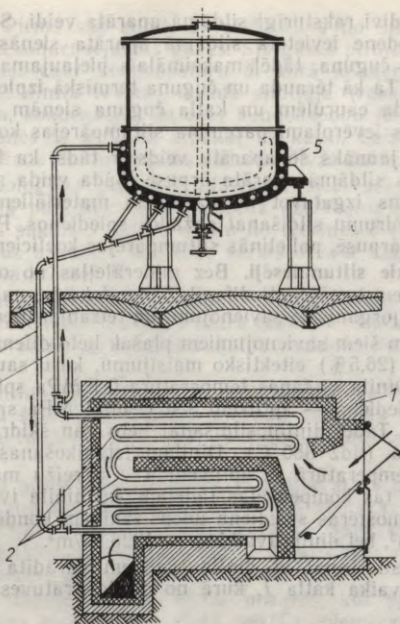
Eļļu sildot, tās tilpums palielinās un liekā eļļa pa cauruli 8 aizplūst uz izplešanās tvertni. Pa šo cauruli izplešanās tvertnē ieplūst arī gāzes, kas izšķīdušas eļļā, kā arī vieglāk gaistošo komponentu tvaiki. No izplešanās tvertnes pa cauruli 6 tos izvada no sistēmas. Ja eļļa satur kaut nelielu mitruma daudzumu, tad temperatūrā, kas augstāka par 100°C, tā sāk putot un iespējama tās pārsviešana izplešanās tvertnē. Pa cauruli 5 eļļu aizvada uz krātuvi. Eļļas spiediens spiedcaurulē ir līdz 0,3 MPa. Jānodrošina cirkulācijas sūkņa 11 nepārtraukta darbība, citādi eļļa var pārkarst un sadalīties. Parasti lieto rotācijas sūkņus. Atkarībā no darba režīma minerāleļļa kalpo līdz diviem gadiem. Lai samazinātu siltuma zudumus, caurules, pa kurām plūst eļļa, ir jāizolē.

Minerāleļļas galvenais trūkums ir tās lielā viskozitāte un zems siltumpārejas koeficients, kas nepārsniedz 580 W/(m²·K), kā arī tas, ka minerāleļļa jutīga pat pret īslaicīgu pārkarsēšanu.

Sildīšana ar pārkarsētu ūdeni. Ūdeni par siltumnesēju lieto kritiskajā (spiediens 22,4 MPa, temperatūra 374°C) vai tam tuvā stāvoklī. Pārkarsētām ūdenim kā siltumnesējam ir zināmas priekšrocības: tas ir viegli pieejams, lēts, ugunsdrošs, nav indīgs, tam ir liela siltumietilpība un augsts siltumatdeves koeficients. Pārkarsētā ūdens trūkums ir augstais spiediens, jo līdz ar to sildīšanai nepieciešama īpaši izturīga un dārga iekārta.

Iekārtas, kas apsildāmas ar pārkarsētu ūdeni, pēc darbības principa neatšķiras no iekārtām, kuras apsilda ar minerāleļļu. Tās izveidotas no ūdens sildītāja, ko parasti apsilda ar dūmgāzēm, un sildāmā aparāta. Cauruļveida ūdens sildītāju savieno ar sildāmā aparāta glodeni, kā tas parādīts 8.27. attēlā. Šādās iekārtās izmanto vai nu brīvo, vai piespiedu cirkulāciju. 8.27. attēlā parādītā iekārta ir ar brīvo cirkulāciju. Šī iekārta sastāv no krāsni 1, kuras dūmeļās ievietotas caurules 2 ūdens pārkarsēšanai. Karstam ūdenim ir mazāks blīvums nekā atdzisušam, tādēļ karstais ūdens ceļas pa cauruli 3 uz augšu un nokļūst sildīšanas iekārtas glodenē 5. Glodenē tas atdod siltumu un atdzisis aizplūst pa cauruli 4 atpakaļ uz krāsni. Tā kā iekārta darbojas augstā temperatūrā un spiedienā, visām caurulēm jābūt no tērauda; pirms darbināšanas tās pārbauda ar 45 MPa spiedienu.

Darbu uzsākot, iekārtā vispirms ar sūkni iepilda destilētu ūdeni. Destilētu ūdeni lieto tāpēc, ka tas nesatur gaisu un nerada nogulumu kārtu uz caurules sienām. Sildīšanas sākumā ūdens tilpums palielinās un līdz ar to strauji paaugstinās spiediens. Spiedienu caurulēs regulē, izlaižot daļu ūdens no sistēmas, lai spiediens būtu tuvu piesātināta tvaika spiedienam attiecīgā temperatūrā. Pakāpeniski paaugstinot spiedienu, ūdens sasniedz kritisko stāvokli. Tad tiek aiz-



8.27. att. Iekārta sildīšanai ar pārkarsētu ūdeni.

vērts ventilis un sistēma piepildīta ar ūdeni, kurā nav ne gaisa, ne tvaika.

Atdzesējot šādu sistēmu, ūdens tilpums samazinās, bet pārējā sistēmas daļa aizpildās ar piesātinātu ūdens tvaiku attiecīgā ūdens temperatūrā.

Atkarībā no pārkarsētā ūdens temperatūru starpības glodenē un sildītājā brīvās cirkulācijas rezultātā pārkarsētais ūdens caurulēs pārvietojas ar ātrumu 0,1...0,2 m/s. Lai nodrošinātu cirkulāciju, sildāmais aparāts jāpacel 4...5 m virs ūdens sildītāja. Tādēļ brīvās cirkulācijas vietā bieži lieto piespiedu cirkulāciju, jo tad sildāmo aparātu var novietot jebkurā līmenī attiecībā pret ūdens sildītāju. Izveidojot piespiedu cirkulāciju, siltumnesēja ātrumu izdodas palielināt desmitkārt. Tas ievērojami veicina sildītāja darbību.

Sildīšanas temperatūru regulē ar sadedzināmā kurināmā daudzumu.

Sildāmais aparāts sildīšanai ar pārkarsētu ūdeni izveidots citādi, nekā lietojot zemspiediena siltumnesēju. Kā jau minēts, šim nolūkam lieto tērauda augstspiediena caurules. Sildītāja veids —

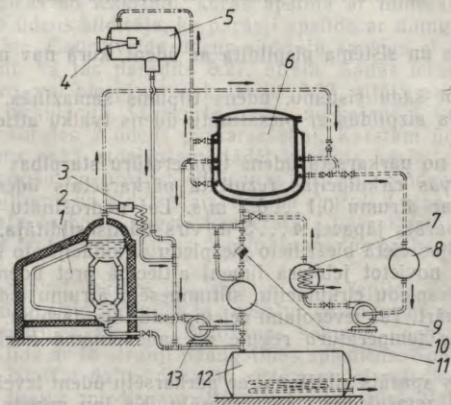
glodene. Ir divi raksturīgi sildāmā aparāta veidi. Senākais veids — tērauda glodene ievietota sildāmā aparāta sienās. Sildāmo katlu izgatavo no čuguna, tādēļ maksimālais pieļaujamais spiediens tam ir 0,6 MPa. Tā kā tērauda un čuguna termiskā izplešanās ir dažāda, starp tērauda caurulēm un katla čuguna sienām izveidojas plāna sprauga, kas ievērojami pazemina siltumpārejas koeficientu.

Otrs — jaunāks šo aparātu veids ir tāds, ka tērauda caurules piemetinātas sildāmā aparāta ārpusē. Šāda veida sildīšanas aparātus iespējams izgatavot no dažādiem materiāliem, kas piemēroti agresīvu šķidrumu sildīšanai dažādos spiedienos. Piemetot caurules aparāta ārpusē, palielinās siltumpārejas koeficients.

Organiskie siltumnesēji. Bez minerālējļas no organiskas dabas siltumnesējiem izmēģināti difenils, difeniloksīds, naftalīns, glicerīns, dažādi silīcijorganiskie savienojumi un tetrahloridifeniils.

No visiem šiem savienojumiem plašāk lieto difeniloksīda (73,5%) un difenila (26,5%) eitektisko maisījumu, kuru sauc par *dinilu* jeb *dautermu*. Dinila viršanas temperatūra 0,1 MPa spiedienā ir 258 °C, 0,6 MPa spiedienā — aptuveni 350 °C un 1 MPa spiedienā — aptuveni 400 °C. Tādēļ dinilu sildīšanai lieto gan šķidrā veidā, gan arī tvaiku veidā (līdz 380 °C). Dinilam iztvaikošanas siltums 300...350 °C temperatūrā ir aptuveni 4...5 reizi mazāks nekā ūdenim. Tomēr tas kompensējas tādējādi, ka dinila tvaikiem ir lielāks blīvums. Atmosfēras spiedienā ūdens tvaikam kondensācijas siltums ir 1310 kJ/m³, bet dinila tvaikiem — 1226 kJ/m³.

Iekārta sildīšanai ar dinila tvaikiem parādīta 8.28. attēlā. Tā sastāv no tvaika katla 1, kurā no dinila krātuves 12 ar sūkni 13



8.28. att. Iekārta sildīšanai ar dinila tvaikiem.

pievada dinilu. Pirms sāk sildīt, ar ežektoru 4 no sistēmas izsūc gaisu un citas nekondensējamās gāzes. Šīs gāzes pirms izvadīšanas no sistēmas plūst caur kondensatoru 5, kurā kondensējas dinila tvaiki. Sildīšanai dinila tvaikus ievada sildītājā (reaktorā) 6, kur tie atdod siltumu, kondensējas un caur kondenspodu 10 ieplūst tvertnē 11. No turienes to aizvada atpakaļ uz katlu. Labākai siltuma apmaiņas regulēšanai katla apvalks sadalīts divās daļās.

Ķīmijas tehnoloģijas procesos sildīšanai bieži seko dzesēšana. Tādēļ 8.28. attēlā parādītā iekārta paredz dzesēšanu ar šķidru dinilu. Dzesēšanas sūknis 9 šķidro dinilu no tvertnes 8 caur dzesinātāju 7 pārvieto uz apvalku. Drošības vārsts 3 caur kondensatoru 2 savienots ar dinila krātuvi 12.

Pēc šādas pašas shēmas var apsildīt vairākus reaktorus. Temperatūru regulē, droselējot tvaiku pie katra reaktora. Tādā veidā iespējams ar vienu tvaika katlu uzturēt katrā reaktorā citu sildīšanas režīmu.

Ar šķidru dinilu silda līdz 330 °C. Sildot temperatūrā, kas augstāka par 260 °C, šķidrajam dinilam pievada saspīestu slāpekli. Sildīšanu ar dinila tvaikiem lieto tad, ja sildītājā jāuztur nemainīga temperatūra.

Strauja dinila polimerizācija sākas, ja temperatūra augstāka par 400 °C. Ja sildīšana notiek temperatūrās, kas zemākas par 350 °C, dinils kalpo pat līdz 5 gadiem, turpretī, ja sildīšana notiek temperatūrās, kas augstākas par 400 °C, tad — tikai dažus mēnešus. Dinilu no polimerizētās daļas atdala destilējot.

Sildīšanu ar dinilu izmanto tādās nozarēs, kur procesa laikā jāuztur vienmērīga temperatūra (līdz 380 °C), piemēram, krāsvielu un citās organiskās sintēzēs, laku un krāsu, plastmasu, pārtikas, naftas rūpniecībā.

Sildīšana ar izkausētiem sāļiem un metāliem. Lai sasniegtu vienmērīgu temperatūru, kas augstāka par 380 °C, par siltumnesēju lieto izkausētus sāļus. Parasti šim nolūkam izmanto sāļu maisījumus, kas satur 40% NaNO_2 , 7% NaNO_3 un 53% KNO_3 vai 45% NaNO_2 un 55% KNO_3 . Atmosfēras spiedienā šādi kausējumi izmantojami līdz 540 °C temperatūrā. Kausējumu viršanas temperatūra 680 °C. Šādu sāļu maisījumu kušanas temperatūra ir aptuveni 140 °C, tādēļ aparāta daļas, kur temperatūras pazemināšanās varētu izraisīt kausējuma kristalizēšanos, jāapgādā ar tvaika apvalkiem, kuros ūdens tvaiku pievada līdz 1 MPa spiedienā.

Sāļu kausējumus par siltumnesējiem lieto katalītiskos procesos. Bez sāļu kausējumiem par siltumnesējiem lieto šķidrus metālus, retāk metālu tvaikus.

Šķidrie metāli un to tvaiki ir agresīvi pret metāla konstrukcijām. Tie viegli oksidējas darba temperatūrā. Tvaika stāvokļi tie ir indīgi. Minēto iemeslu dēļ videi, kurā atrodas šie metāli, jābūt inertai un iekārtām hermētiskām. No metāliem lieto litiju, nātriju, kāliju, kadmiju, cēziju, dzīvsudrabu, svinu, alvu un sudrabu.

8.1.6. Sildīšana ar elektrisko strāvu

Elektriskā enerģija ir viens no ērtākajiem siltuma avotiem, jo iespējama temperatūras regulēšana plašā intervālā, sildīšanas iekārtas nav lielas un ir ērti apkalpojamas. Tomēr pagaidām elektroenerģija vēl izmaksā pārāk dārgi, lai to plaši ieviestu ķīmiskajā rūpniecībā.

Atkarībā no tā, kā elektroenerģiju pārvērs siltuma enerģijā, sildīšanas iekārtas iedalās *pretestības, indukcijas, augstfrekvences strāvas un elektriskā loka iekārtās*.

Pretestības iekārtu darbība pamatojas uz Džoula likumu. Šīs iekārtas parasti izveidotas atsevišķu šķidrumā iegremdējamu elementu veidā. Lielākās iekārtas ir cauruļveida iekārtas ar pretestības tinumu caurulēs. Bez tam lieto dažādas pretestības krāsnis, kur pretestība izvietota ap sildāmo katlu.

Pretestības materiālam jābūt termiski izturīgam, ar lielu īpatnējo pretestību, kas atkarībā no temperatūras maz mainās, augstā temperatūrā tas nedrīkst oksidēties, un tam ir jābūt viegli apstrādājamam.

Plašāk lietotā pretestībstieple izgatavota no *nihroma sakausējuma*, kas sastāv no niķeļa, hroma un dzelzs. Sakausējumus, kas satur maz dzelzs (0,5...3,0%), lieto sildīšanai līdz 1100...1150 °C, sakausējumus ar lielāku dzelzs saturu — sildīšanai līdz 800 °C. Pretestībstieples izgatavo arī no lētākiem metālu sakausējumiem, piemēram, *no dzelzs, hroma un alumīnija sakausējuma*. Šādi sakausējumi (*sihromāls, kantāls* u. c.) lietojami sildīšanai līdz 1300...1350 °C, bet augstās temperatūrās tie kļūst trausli un ir jutīgi pret dzelzs un silīcija oksīdiem.

Sildīšanai temperatūrās līdz 1400 °C pretestībstieples izgatavo no *platīna* (parasti gan tikai laboratorijās, jo platīns ir deficīts un dārgs metāls). Tās lietojamas tikai oksidējošā vidē.

Molibdēna pretestībstieples lieto krāsnīm, kurās sildīšana notiek 1200...1600 °C temperatūrā. Molibdēns augstās temperatūrās oksidējas, tādēļ ap to jārada reducējoša atmosfēra vai vakuums. Jāatceras, ka temperatūrās, kas augstākas par 1650 °C, molibdēns vakuumā sairst, tādēļ molibdēna vakuumkrāsnīs temperatūra nedrīkst pārsniegt 1600 °C.

Sildīšanai līdz 3000 °C lieto *volframa pretestībstieples*. Arī volfrāms jutīgs pret oksidēšanos.

Nemetālisko materiālu pretestības izgatavo no *silīta* un *globara*. Tie ir karborunda stieņi, kas lietojami 1300...1400 °C temperatūrā. Šīs pretestības jutīgas pret strauju temperatūras kāpināšanu.

Par pretestību izmanto arī *ogļi, grafitu* un to izstrādājumus. Ogļu pretestību, kas izveidota nelielu 2...3 mm graudiņu veidā, sauc par *kriptolu*. Ar kriptolu var sasniegt 1400...1800 °C augstu sildīšanas temperatūru. Kriptols un grafits oksidējas, tādēļ ap tiem jārada reducējoša atmosfēra vai arī tie bieži jāatjauno.

Pretestības sildītājiem, kas paredzēti 400...1000 °C temperatūrām, izgatavo apmūrējumu no divām kārtām — no ugunsizturīgas

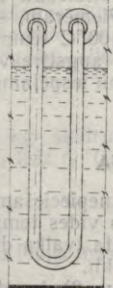
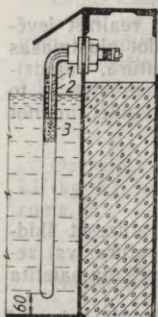
kārtas un siltumizolācijas kārtas. Sildītājiem, kas paredzēti temperatūrām līdz 400°C, ir tikai siltumizolācijas kārtā, kura iepildīta starp iekšējo un ārējo apvalku.

Metāla pretestības parasti ir apaļas stieples vai lentes veidā. Pretestību diametri ir 3...7 mm. Sildīšanai temperatūrās, kas augstākas par 1000°C, lieto stieples, kuru diametrs ir vismaz 5 mm. Stieples satin spirālē. Spirāles, kas novietotas plauktos, ik pa 30...50 cm nostiprina, lai sildīšanas laikā tās neizlocītos. Pretestības spirāli bieži vien uztin uz keramikas caurules vai stieņa. Lentveida pretestības izloka zigzagveidā. Lieto arī stieņveida un plākšņveida pretestības.

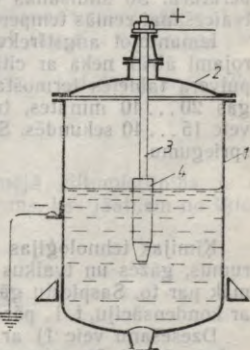
Bez tam sildīšanai plaši izmanto cilpveida sildelementus (8.29. att.). Šādi sildelementi sastāv no tērauda caurules 1, kurā ievietota nihroma stieples spirāle 3. Telpu starp spirāli un caurules sienām 2 aizpilda ar periklazu (kristālisku magnija oksīdu) vai kvarca smiltīm. Cilpveida sildelementus ražo ar jaudu no dažiem simtiem vatu līdz dažiem kilovatiem.

Sildīšana ar elektrodiem. Šim nolūkam elektrisko strāvu vada caur sildāmo šķidumu, izmantojot to par pretestību. Elektriskā strāva, plūstot cauri šķiduma slānim, rada siltumu (ja šķidums ir labs elektrības vadītājs). Lai izvairītos no elektrolīzes, sildīšanai lieto tikai maiņstrāvu. Šādus sildītājus izmanto šķidumu ietvaicēšanai. Tos izgatavo spriegumiem līdz 10 000 V un lielām jaudām.

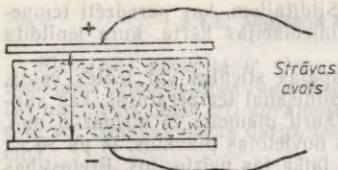
Iekārta sildīšanai ar elektrodiem parādīta 8.30. attēlā. Tā sastāv no cilindriska katla 1, kas noslēgts ar vāku 2, kuram cauri izlaists stienis 3. Stieņa galā ir metāla vai ogles elektrods 4 (var būt arī vairāki elektrodi). Strāva no elektroda plūst cauri šķidumam uz katla iezemētajām sienām. Iekārtas sildīšanas intensitāti regulē, iegremdējot vai izceļot elektrodu vai arī mainot šķiduma līmeni sildītājā.



8.29. att. Cilpveida sildelementa shēma.



8.30. att. Iekārta sildīšanai ar elektrodiem.



8.31. att. Sildīšana augstfrekvences strāvas laukā.

Sildīšana ar indukcijas strāvu. Sildīšanai ar indukcijas strāvu ap metāla katlu, kurā atrodas sildāmā vide, aptin vara vai alumīnija stiepli solenoīdu. Laižot cauri solenoīdam maiņstrāvu, rodas mainīgs magnētiskais lauks. Tas katla sienās inducē sekundāro strāvu, kura pārvēršas siltumā. Indukcijas krāsnis plaši lieto metalurģijā metālu kausēšanai.

Sildīšana ar augstfrekvences strāvu. Sliktus elektriskās strāvas vadītājus (dielektriskus) var sasildīt augstfrekvences maiņstrāvas laukā. Sildāmo materiālu ievieto starp divām plāksnēm, kas savienotas ar augstfrekvences maiņstrāvas generatoru (8.31. att.). Sildāmā materiāla molekulas, kam nav dipolmomenta, elektriskajā laukā polarizējas. Mainīgais elektriskais lauks rada polāro molekulu stāvokļa maiņu, starp tām rodas berze, un daļa elektriskās enerģijas pāriet siltumā.

Sildīšana ar augstfrekvences strāvu arvien plašāk ieviešas ķīmiskajā, pārtikas, keramikajā, kokapstrādāšanas rūpniecībā, mašīnbūvniecībā un citās rūpniecības nozarēs. Šā sildīšanas veida priekšrocība ir iespēja vienmērīgi un ātri sasildīt priekšmetu visā masā. Augstfrekvences sildīšanas gaitā temperatūru starpību dažādās materiāla vietās var samazināt līdz minimumam. Siltumu slikti vadoša materiāla centrālās kārtas var sasildīt, nepārkarsējot ārējo virsmu.

Sildot ar augstfrekvences strāvu un pareizi izvēloties frekvenci, nevienmērīgā materiālā var sildīt vienu atsevišķu komponentu, piemēram, iztvaicēt šķīdinātāju no materiāla, nepaaugstinot tā temperatūru. Šo sildīšanas veidu lieto žāvēšanas tehnikā mitruma iztvaicēšanai zemās temperatūrās.

Izmantojot augstfrekvences strāvas, sildīšanu var realizēt ievērojami ātrāk nekā ar citām metodēm. Piemēram, sildot plastmasas pulvera tabletes termostatā līdz 80...100 °C temperatūrā, vajadzīgas 20...40 minūtes, turpretī, lietojot augstfrekvences strāvu, to veic 15...40 sekundēs. Sildīšanas ātrumu iespējams regulēt, mainot spriegumu.

8.2. DZESĒŠANA

Ķīmijas tehnoloģijas procesos bieži nepieciešams atdzesēt šķīdumus, gāzes un tvaikus līdz apkārtējās vides temperatūrai vai zemāk par to. Saspiestu gāzu un piesātināta tvaika dzesēšana saistīta ar kondensāciju, t. i., pāreju šķidrā stāvoklī.

Dzesēšanu veic 1) ar pašiztvaikošanu; 2) ievadot vidē ledu vai aukstu ūdeni; 3) virsmas dzesinātājos. Dzesēt var arī, atstājot dzesējamo vidi dzesēšanas iekārtā, līdz tā atdziest. Šādā gadījumā dzesēšanas ilgums atkarīgs no siltumpārejas intensitātes.

8.2.1. Dzesēšanas veidi

Dzesēšana ar pašiztvaikošanu. Šādi dzesē šķidrumus, ielejot tos lēzenos traukos pēc iespējas plānā slāni.

Siltuma plūsmu, kas, šķidrumam iztvaikojot, aizplūst ar tvaiku, nosaka pēc formulas

$$\Phi = D(h - ct_{vid}),$$

kur Φ — ar tvaiku aizplūstošais siltums, W; D — iztvaikojušā tvaika patēriņš, kg/s; h — tvaika entalpija, J/kg; c — šķidruma īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K); t_{vid} — dzesējamā šķidruma vidējā temperatūra, °C.

No atklātas virsmas iztvaikojušais šķidruma daudzums pēc Daltona likuma nosakāms šādi:

$$D = K_p S (p_s - \varphi p'_s),$$

kur K_p — iztvaikošanas koeficients, kg/(m²·s·Pa); S — iztvaikošanas virsma, m²; p_s — šķidruma tvaika parciālais spiediens šķidruma vidējā temperatūrā, Pa; p'_s — šķidruma tvaika parciālais spiediens apkārtējā gaisa temperatūrā, Pa; φ — gaisa relatīvā piesātinātība ar attiecīgiem tvaikiem.

Iztvaikošanas koeficientu K_p ūdeņim vai ūdens šķīdumiem, ja gaiss virzās paralēli virsmai, nosaka šādi:

$$K_p = 1,552 \cdot 10^{-7} (\rho \omega)^{0,8},$$

kur ω — gaisa ātrums, m/s; ρ — gaisa blīvums, kg/m³.

Dzesēšana ar ledu vai aukstu ūdeni. Ja pieļaujama dzesējamās vides sajaukšanās ar ūdeni un nepieciešama strauja atdzesēšana, tad vidē ievada ledu vai aukstu ūdeni.

Ledus kušanas siltums ir 332,4 kJ/kg, kušanas temperatūra — 1... — 2 °C un īpatnējā siltumietilpība 2,1 kJ/(kg·K). Aprēķinos pieņem, ka ledus kušanas siltums ir 335 kJ/kg.

Ja dzesējamās vides beigu temperatūra ir t_2 , tad dzesēšanas laikā 1 kg ledus uzņem šādu siltuma daudzumu:

$$q_l = 335 + 4,2t_2.$$

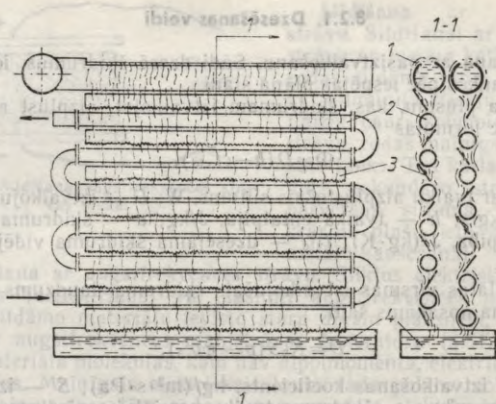
Dzesējot G kg šķidruma, kurā īpatnējā siltumietilpība ir c kJ/(kg·K), no t_1 līdz t_2 °C, siltuma daudzums, kas jāatņem no šķidruma, ir

$$Q = Gc(t_1 - t_2).$$

Nepieciešamo ledus masu G_l aprēķina šādi:

$$G_l = \frac{Q}{335 + 4,2t_2},$$

kur G_l — ledus masa, kg.



8.32. att. Aprasināmā dzesinātāja shēma.

Dzesējot ar aukstu ūdeni, tā masu aprēķina pēc formulas

$$U = \frac{Q}{c_{H_2O}(t_2 - t_1)}$$

kur t_1 — dzesēšanas ūdens sākuma temperatūra, °C.

Dzesēšana virsmas dzesinātājos. Dzesēšanai lieto tādus pašus virsmas siltumapmainītājus, kādi minēti iepriekš, apskatot sildīšanu ar ūdens tvaiku. Par siltumņēmējiem (aukstumnesējiem) izmanto ūdeni vai gaisu. Dzesēšanai temperatūrās, kas zemākas par 15°C, izmanto dzesējošos šķidrumus, ko pirms lietošanas atdzesē īpašās aukstuma iekārtās.

Atšķirībā no sildītājiem dzesinātājos aukstumnesējus ievada iekārtā no apakšas, lai, tiem sasilstot (blīvums pie tam samazinās), netraucētu brīvo konvekciju. Virsmas dzesinātājos ūdens beigu temperatūrai jābūt par 5...35°C zemākai nekā dzesējamās vides temperatūra ūdens izplūdes vietā. Lai nerastos sāļu nogulumu, ūdens temperatūra nedrīkst pārsniegt 40...50°C.

Dzesinātājiem dzesēšanai nepieciešamo virsmu aprēķina tāpat kā sildītāju virsmu.

Bez glodenēm, dzesēšanas apvalkiem, cauruļveida dzesinātājiem un citiem siltumapmaiņas aparātiem lieto arī aprasināmus dzesinātājus. Šāds dzesinātājs parādīts 8.32. attēlā. Tas sastāv no caurulēm 2, pa kurām plūst aukstumnesējs (ūdens). No ārpusē caurules apskalo dzesējamais šķidrums. Dzesējot šķidrumus, kas izdala vērtīgus vai indīgus tvaikus, pa caurulēm vada dzesējamo šķidrumu, bet no ārpusē tās aprasina ar aukstu ūdeni. Dzesēšanai paredzēto šķidrumu pievada pa kolektoru 1, no kurienes tas pa slīpi novietotiem vairodziņiem 3 plūst no vienas caurules uz otru, līdz satek tvertnē 4.

Sādiem dzesinātājiem ir vienkārša konstrukcija, tos ērti remontēt un tīrīt. Aprasināmus dzesinātājus lieto, ja nav vajadzīgs liels ražīgums vai arī ja dzesēšanas virsma jāgatavo no īpašiem materiāliem (dzesējot agresīvas vides).

8.3. KONDENSĒŠANA

8.3.1. Tvaika kondensatori

Ietvaices, žāvēšanas, pārtvaices un citos procesos jākondensē procesa gaitā radušies tvaiki, lai iekārtā radītu retinājumu vai arī lai tvaikus pārvērstu šķidrumā. Tvaikus kondensē īpašās iekārtās, ko sauc par *kondensatoriem*. Pēc darbības principa tie iedalās *virsmas kondensatoros* un *saplūdes kondensatoros*.

Virsmas kondensatori. Virsmas kondensatorus lieto, ja nav pieļaujama kondensāta sajaukšanās ar dzesējamo ūdeni vai arī tad, ja ir jārada augsts retinājums. Par virsmas kondensatoriem var izmantot dažādus siltumapmaiņas aparātus. Visbiežāk lieto glodenes un cauruļveida iekārtas. Parasti dzesē ar ūdeni vai gaisu. Ūdeni tieši ievada kondensatorā vai ar to aprasina caurules, pa kurām plūst tvaiks.

Virsmas kondensatora tehnoloģisko aprēķinu izdara, lai noteiktu virsmas lielumu, dzesēšanai nepieciešamo ūdens patēriņu un, ja iekārtā jārada retinājums, tad nosūcamā gaisa tilpumu.

Nepieciešamo virsmu nosaka pēc formulas:

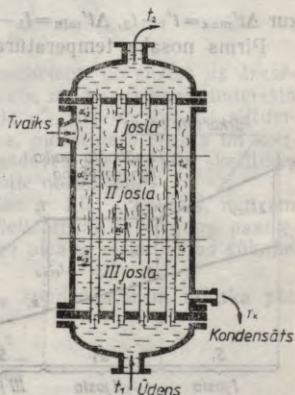
$$S = \frac{\Phi}{k\Delta t_{vid}}$$

Aprēķinu atvieglināšanai kondensatora virsmu sadala trīs joslās. Pieņem, ka pirmajā joslā *pārkarsēto tvaiku atdzesē līdz piesātinātam stāvoklim*. Otrajā joslā *piesātināto tvaiku kondensē*. Trešajā joslā *kondensātu atdzesē līdz izplūdes temperatūrai*.

Virsmas kondensatora (cauruļveida) shēma un atsevišķās joslas parādītas 8.33. attēlā. Ja kondensēšanai pievada piesātinātu tvaiku, tad pirmā josla atkrit. Otrā josla atbilst sildīšanai ar piesātinātu tvaiku.

Tā kā joslās siltumpārejas koeficients mainās, atsevišķi nosaka virsmu pirmajai (S_1), otrajai (S_2) un trešajai (S_3) joslai. Kondensatora kopējo virsmu aprēķina kā šo virsmu summu:

$$S = S_1 + S_2 + S_3.$$



8.33. att. Virsmas kondensatora shēma.

Katras joslas dzesēšanas virsmu nosaka pēc šādām formulām:

$$S_1 = \frac{\Phi_1}{k_1 \Delta t'_{\text{vid}}}; \quad S_2 = \frac{\Phi_2}{k_2 \Delta t''_{\text{vid}}}; \quad S_3 = \frac{\Phi_3}{k_3 \Delta t'''_{\text{vid}}},$$

kur Φ_1, Φ_2 un Φ_3 — siltuma plūsma, kas pāriet caur pirmo, otro un trešo joslu, W; k_1, k_2 un k_3 — pirmās, otrās un trešās joslas siltumpārejas koeficienti, W/(m²·K); $\Delta t'_{\text{vid}}, \Delta t''_{\text{vid}}$ un $\Delta t'''_{\text{vid}}$ — vidējās temperatūru starpības pirmajai, otrajai un trešajai joslai, °C.

Siltuma plūsma, kas kondensatorā pāriet caur atsevišķām virsmām:

$$\Phi_1 = Dc_t(t'_t - t_k), \quad \Phi_2 = Dr \quad \text{un} \quad \Phi_3 = Dc_s(t_k - t'_k),$$

kur D — sekundē kondensētā tvaika masa, kg/s; t'_t — pārkarsētā tvaika temperatūra, °C; t_k — piesātinātā tvaika kondensēšanas temperatūra, °C; t'_k — izplūstošā kondensāta temperatūra, °C; r — iztvaikošanas siltums, J/kg; c_t, c_s — tvaika un kondensāta īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K).

Lai noteiktu vidējo temperatūru starpību, jāzina dzesējamā ūdens temperatūras x_1 un x_2 joslu saskares vietās (8.34. att.), jo

$$\Delta t'_{\text{vid}} = \frac{\Delta t'_{\text{max}} - \Delta t'_{\text{min}}}{2,3 \lg \frac{\Delta t'_{\text{max}}}{\Delta t'_{\text{min}}}}; \quad \Delta t''_{\text{vid}} = \frac{\Delta t''_{\text{max}} - \Delta t''_{\text{min}}}{2,3 \lg \frac{\Delta t''_{\text{max}}}{\Delta t''_{\text{min}}}}; \\ \Delta t'''_{\text{vid}} = \frac{\Delta t'''_{\text{max}} - \Delta t'''_{\text{min}}}{2,3 \lg \frac{\Delta t'''_{\text{max}}}{\Delta t'''_{\text{min}}}},$$

kur $\Delta t'_{\text{max}} = t'_t - t_2$, $\Delta t'_{\text{min}} = t_k - x_2$, $\Delta t''_{\text{max}} = t_k - x_1$, $\Delta t''_{\text{min}} = t'_k - t_1$.

Pirms nosaka temperatūras x_1 un x_2 , aprēķina kondensatoram

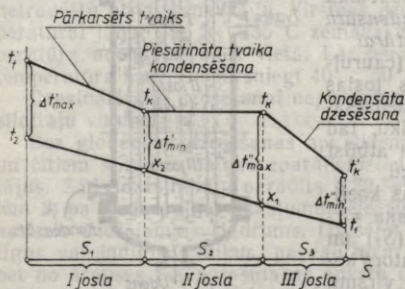
pievadāmā ūdens patēriņu U atkarībā no ieplūstošā ūdens temperatūras t_1 un izplūstošā ūdens temperatūras t_2 .

Siltuma plūsmu, ko uzņem dzesēšanai pievadītais ūdens, nosaka šādi:

$$\sum_1^3 \Phi = Uc_{\text{H}_2\text{O}}(t_2 - t_1).$$

Ūdens uzņemtā siltuma plūsma summējas no tvaika atdotā siltuma, t. i.,

$$\sum_1^3 \Phi = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3, \quad \text{tad}$$



8.34. att. Temperatūras maiņa virsmas kondensatorā.

$Uc_{H_2O}(t_2 - t_1) = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3$, no kurienes kondensatoru dzesējošā ūdens patēriņš

$$\sum_1^3 \Phi$$

$$U = \frac{\Phi}{c_{H_2O}(t_2 - t_1)},$$

kur U — ūdens patēriņš kondensatorā, kg/s.

Siltums, ko pirmajā joslā izdala pārkarsētais tvaiks, vienāds ar to siltumu, ko uzņem dzesējošais ūdens, tādēļ var rakstīt, ka

$$\Phi_1 = Uc_{H_2O}(t_2 - x_2) \quad \text{un} \quad x_2 = \frac{Uc_{H_2O}t_2 - \Phi_1}{Uc_{H_2O}}.$$

Temperatūru x_1 iegūst līdzīgi, jo

$$\Phi_3 = Uc_{H_2O}(x_1 - t_1) \quad \text{un} \quad x_1 = \frac{\Phi_3 + Uc_{H_2O}t_1}{Uc_{H_2O}}.$$

Ja temperatūras x_1 un x_2 ir zināmas, var noteikt vidējās temperatūru starpības atsevišķām joslām.

Siltumpārejas koeficientus attiecīgajām joslām aprēķina pēc formulām

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha'_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha'_2}}; \quad k_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha''_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha''_2}};$$

$$k_3 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha'''_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha'''_2}},$$

kur α'_1 , α''_1 un α'''_1 — siltumatdeves koeficienti no sienas uz dzesējošo ūdeni, $W/m^2 \cdot K$; δ — sienas biezums, m; λ — sienas materiāla siltumvadītspējas koeficients, $W/(m \cdot K)$; α'_2 , α''_2 un α'''_2 — siltumatdeves koeficienti no pārkarsēta tvaika, piesātināta tvaika un kondensāta uz sienu, $W/(m^2 \cdot K)$. Siltumatdeves koeficientu skaitlisko vērtību noteikšanā jāievēro 7. nodaļā dotie norādījumi.

Ūdens ātrums kondensatora caurulēs ir 1,5...2,5 m/s, netīram ūdenim ne mazāks par 2 m/s. Pārāk lieli ātrumi ievērojami paaugstina kondensatora pretestību, līdz ar to pieaug cirkulācijas sūkņim nepieciešamais enerģijas patēriņš.

Kopējo ūdens cauruļu garumu l_{kop} kondensatoram nosaka pēc šādas izteiksmes:

$$l_{kop} = z l = \frac{S d_1^2}{4 S_c d_2},$$

kur z — pakāpju (gājienu) skaits kondensatorā, l — caurules garums, m; S — kondensatora dzesēšanas virsma, m^2 ; S_c — kopējais

cauruļu šķērsriezuma laukums, caur kuru virzīta ūdens plūsma, m^2 ; d_1 un d_2 — cauruļu iekšējais un ārējais diametrs, m. Kondensatorus vēlamas konstruēt tā, lai $\frac{l}{d_c} = 1,5 \dots 2,5$, kur d_c — diametrs riņķim, kas novilkts gar cauruļu ārējo rindu.

Tvaika ātrums, to ievadot kondensatorā, nedrīkst pārsniegt 40... 50 m/s. Pieņem, ka kondensatorā ievadāmā ūdens temperatūra ir 10... 25°C atkarībā no vēlamā retinājuma. Jo augstāks vakuums, jo zemākai jābūt ūdens temperatūrai. Minimālā temperatūru starpība starp tvaika un aizplūstošā ūdens temperatūru ir 5°C.

Retinājumu nosaka arī *ipatnējais ūdens patēriņš* $m = \frac{U}{D}$, t. i., dzesējošā ūdens masa kilogramos, kura ievadīta kondensatorā uz 1 kg kondensējamā tvaika. Ipatnējais ūdens patēriņš atkarībā no nepieciešamā vakuuma sasniedz 100... 120 (pat 250) kg/kg. Parasti tas ir 50... 80 kg/kg.

Jo mazāks ipatnējais ūdens patēriņš, jo vairāk pakāpju z nepieciešams kondensatoram:

m	40	40... 80	80... 120
z	3... 4	2	1

Virsmas kondensatoru darbību raksturo arī *ipatnējā tvaika slodze* $n = \frac{D}{S}$, t. i., kondensējamā tvaika masa uz 1 m^2 virsmas 1 sekundē.

Ipatnējā tvaika slodze sasniedz $(3 \dots 22) \cdot 10^{-3}$ kg/($m^2 \cdot s$) (10... 80 kg/($m^2 \cdot h$)).

Gaiss virsmas kondensatorā iekļūst līdz ar kondensējamo tvaiku, kā arī caur neblivumiem. Pieņem, ka 1 kg ūdens normālos apstākļos ir izšķīduši 2% gaisa (pēc tilpuma) jeb $2,5 \cdot 10^{-5}$ kg gaisa (pēc masas).

Ūdenim iztvaikojot, gaiss pāriet tvaikā, tādēļ var pieņemt, ka ar katru kilogramu tvaika kondensatorā ievada $2,5 \cdot 10^{-5}$ kg gaisa. Gaisu, kas kondensatorā iekļūst caur neblivumiem, aprēķināt nav iespējams. Tādēļ pieņem, ka vidēji uz katru kilogramu kondensējamā tvaika ir 10^{-2} kg gaisa.

Tādējādi kopējā gaisa masa, kas sekundē jānosūc no virsmas kondensatora vakuuma uzturēšanai, ir

$$G_g = 2,5 \cdot 10^{-5} D + 10^{-2} D \approx 10^{-2} D.$$

Faktiski nosūcamais gaisa tilpums nosakāms pēc Klapeirona vienādojuma

$$p_g V_g = G_g R T,$$

kur p_g — gaisa parciālais spiediens, Pa ($p_g = p - p_t$); p — spiediens kondensatorā, Pa; p_t — ūdens tvaika parciālais spiediens kondensatorā, Pa; R — gāzu konstante, gaisam $R \approx 288$ J/(kg·K); T — gaisa temperatūra, K; $T = 273 + t_g$ (t_g — nosūcamā gaisa temperatūra; pieņem, ka tā vienāda ar dzesējamā ūdens sākuma temperatūru t_1 ,

t. i., $t_g = t_1$); G_g — sekundē nosūcamā gaisa masa normālos apstākļos, kg/s. Tad vienā sekundē nosūcamā gaisa tilpums

$$V_g = \frac{288 G_g (273 + t_g)}{p - p_t}, \quad (8.8)$$

kur V_g — izteikts kubikmetros.

Saplūdes kondensatori. Saplūdes kondensatori pieder pie vecākajām un lētākajām tvaika kondensēšanas iekārtām. Šo kondensatoru darbības pamatā ir dzesējamā ūdens tieša saskare ar kondensējamo tvaiku.

Lai starp ūdeni un tvaiku iegūtu labāku saskari, tvaiku ievada telpā, kurā ūdens atrodas sīku pilienu vai atsevišķu strūklu veidā. Tvaikam saskaroties ar auksto ūdeni, tvaiks kondensējas un, sajaucoties ar dzesējamo ūdeni, no iekārtas aizplūst.

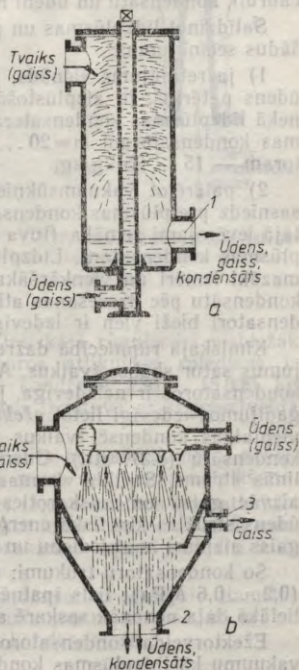
Atkarībā no tvaika un ūdens plūsmas virziena izšķir *līdzplūsmas* un *pretplūsmas kondensatorus*. Pēc kondensāta, dzesējamā ūdens un nekondensējamo gāzu aizvadišanas veida saplūdes kondensatorus iedala *sausajos* un *slapjajos saplūdes kondensatoros*.

Sausajos saplūdes kondensatoros atsevišķi aizvada nekondensējamās gāzes, bet kondensātu aizvada kopā ar dzesējamo ūdeni. *Slapjajos saplūdes kondensatoros* nekondensējamās gāzes un kondensātu kopā ar dzesējamo ūdeni aizvada ar slapjajiem vakuumsūkņiem.

8.35. attēlā parādīti līdzplūsmas saplūdes kondensatori, jo tvaika un ūdens kustības virzieni sakrīt. Gaisu kondensatorā *a* aizvada kopā ar kondensātu un ūdeni pa vadu 1, tādēļ tas pieder pie slapjajiem kondensatoriem. Kondensatorā *b* kondensātu un ūdeni aizvada no apakšas pa izvadu 2, bet gaisu — pa izvadu 3, tātad tas ir sausais kondensators.

Kondensatorus, kuros tvaiku ievada virs ūdens padeves vietas, sauc par *zema līmeņa kondensatoriem*. *Augsta līmeņa kondensatoros* ūdeni ievada virs tvaika ievadišanas vietas.

Ķīmiskajā rūpniecībā plašāk



8.35. att. Līdzplūsmas saplūdes kondensatoru shēmas.

lieto *pretplūsmas saplūdes kondensatorus*. Viens no visvairāk izplatītajiem šā veida kondensatoriem ir *barometriskais kondensators*, kas parādīts 8.36. attēlā. Tas sastāv no kondensatora 1, barometriskās caurules 7, ūdens atgaisošanas tvirtnes 4 un ūdens pilienu nodalītāja 5. Kondensatora apakšā pa tvaika pievadu 2 ievada kondensējamo tvaiku. Dzesēšanai vajadzīgo ūdeni pievada uz augšējā plaukta 3. Plaukti ir caurumoti, tādēļ ūdens sadalās pilienos vai strūkliņās un plūst uz leju no plaukta uz plauktu. Ūdeni šādi sadalot, palielinās ūdens un tvaika saskares virsma. Kondensāts kopā ar dzesējamo ūdeni satek caurulē 7 un aizplūst no iekārtas. Caurulei 7 jābūt vajadzīgā garumā, jo šķidrums stabam caurulē jālīdzsvaro spiedienu starpība starp barometrisko spiedienu p_a un kondensatorā esošo spiedienu p . Tādēļ šo cauruli sauc par *barometrisko cauruli* un kondensatorus ar šādu cauruli — par *barometriskajiem kondensatoriem*. Nekondensējamās gāzes (gaisu) pēc ūdens pilienu nodalīšanas pa cauruli 6 nosūc ar vakuumsūkni. Ja nav iespējams izveidot barometrisko cauruli, kondensātu un ūdeni nosūc ar sūkni.

Salīdzinot līdzplūsmas un pretplūsmas kondensatorus, var izdarīt šādus secinājumus:

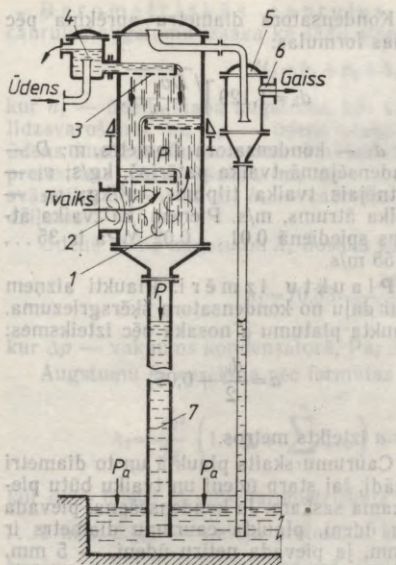
1) ja retinājums vienāds, pretplūsmas kondensatoram ir mazāks ūdens patēriņš, jo aizplūstošā ūdens temperatūra tajā ir augstāka nekā līdzplūsmas kondensatoram. Ipatnējais ūdens patēriņš līdzplūsmas kondensatoram $m=20 \dots 35$ kg/kg, bet pretplūsmas kondensatoram — $15 \dots 25$ kg/kg;

2) patērējot vakuumsūkņiem vienādu jaudu, lielāku retinājumu sasniedz pretplūsmas kondensatorā, jo aizvadāmā gaisa temperatūra tajā ievērojami zemāka (tuva aukstā ūdens temperatūrai) nekā līdzplūsmas kondensatorā. Līdzplūsmas kondensatora priekšrocība ir tā mazāki izmēri un vienkāršāka konstrukcija. Ja izmantoto ūdeni un kondensātu pēc dzesēšanas atkal izlieto, tad līdzplūsmas sausie kondensatori bieži vien ir izdevīgāki par pretplūsmas kondensatoriem.

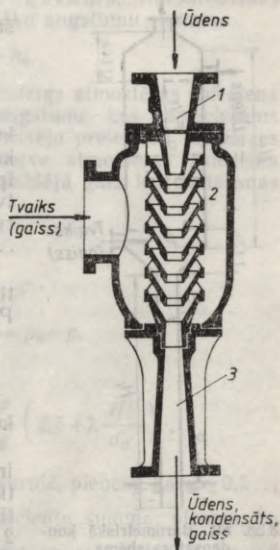
Ķīmiskajā rūpniecībā dažreiz jākondensē tvaiki, kas kā piemaisījumus satur skābes tvaikus. Agresīvu tvaiku kondensēšana saplūdes kondensatoros ir neizdevīga, jo ātri nolietojas vakuumsūkņi. Šādos gadījumos izdevīgi lietot *ežektorveida (strūklas) kondensatorus*, kas vienlaikus kondensē tvaikus un nosūc nekondensējamās gāzes un kondensātu (8.37. att.). Ūdens strūklai koniskajā sprauslā 1 palielinās ātrums. Strūkla virsmas berzes dēļ no kondensatora telpas 2 aizvāc gaisu un, saskaroties ar tvaiku, to kondensē. Difuzorā 3 ūdens strūklas kinētiskā enerģija pāriet potenciālajā, tādēļ ūdens un gaiss aizplūst ar spiedienu un nav vajadzīgs sūknis.

So kondensatoru trūkumi: ūdens tajos jāpievada ar virsspiedienu (0,2...0,6 MPa); liels īpatnējais ūdens patēriņš, jo ūdens strūklas lielākā daļa nenonāk saskarē ar tvaiku.

Ežektorveida kondensatoros iespējams iegūt aptuveni tādu pašu vakuumu kā līdzplūsmas kondensatoros (92...93%). Lai gan ežektorveida kondensatoriem ir mazi izmēri, tomēr ekonomiski izdevīgi tos lietot tikai tad, ja ir jākondensē agresīvi tvaiki.



8.36. att. Pretplūsmas sausā kondensatora (barometriskā kondensatora) shēma.



8.37. att. Ežektorveida (strūklas) kondensatora shēma.

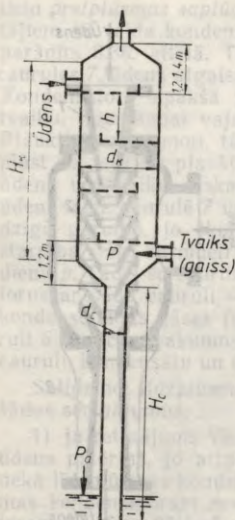
Saplūdes kondensatora aprēķins. Ķīmiskajā rūpniecībā visbiežāk lieto barometriskos kondensatorus, kuros atlikušais spiediens ir 0,01...0,02 MPa. Šādi kondensatori kondensē 250...15 000 kg tvaika stundā. Parasti šos kondensatorus izgatavo ar segmentveida plauktiem.

Saplūdes kondensatora aprēķins saistīts ar pamatzmēru, nepieciešamā dzesējamā ūdens un nosūcamā gaisa daudzuma noteikšanu.

Saplūdes kondensatora pamatzmēri. Kondensatora pamatzmēri ir tā diametrs d_k un augstums H_k , plauktu izmēri, barometriskās caurules diametrs d_c un augstums H_c . Nosakāmie lielumi parādīti 8.38. attēla.

Kondensatora diametrs¹. Kondensatora iekšējais diametrs d_k atkarīgs no kondensējamā tvaika daudzuma un ātruma, kā arī no ūdens daudzuma un veida, kā to ievada kondensatorā.

¹ Pēc pastāvošām normām barometriskajiem kondensatoriem ir šādi ārējie diametri: 500, 600, 800, 1000, 1200, 1600 un 2000 mm.



8.38. att. Barometriskā kondensatora shēma.

Kondensatora diametru aprēķina pēc šādas formulas:

$$d_k = 1,129 \sqrt{\frac{Dv_t}{\omega_t}},$$

kur d_k — kondensatora diametrs, m; D — kondensējamā tvaika patēriņš, kg/s; v_t — īpatnējais tvaika tilpums, m³/kg; ω_t — tvaika ātrums, m/s. Pieņem, ka tvaika ātrums spiedienā 0,01 ... 0,02 MPa ir 35 ... 55 m/s.

Plauktu izmēri. Plaukti aizņem tikai daļu no kondensatora šķērsriezuma. Plaukta platumu a nosaka pēc izteiksmes:

$$a = \frac{d_k}{2} + 0,05,$$

kur a izteikts metros.

Caurumu skaits plauktā un to diametri ir tādi, lai starp ūdeni un tvaiku būtu pietiekama saskare. Ja kondensēšanai pievada tīru ūdeni, plaukta caurumu diametrs ir 2 mm, ja pievada netīru ūdeni, — 5 mm. Ūdens slāņa augstums plauktā ir līdz 40 mm.

Kondensatoram pievadāmā ūdens patēriņu aprēķina no kondensatora siltuma bilances datiem:

$$D(h - c_{H_2O}t_2) = U c_{H_2O}(t_2 - t_1) \text{ vai } U = \frac{D(h - c_{H_2O}t_2)}{(t_2 - t_1)c_{H_2O}},$$

kur U — ūdens patēriņš, kg/s; D — kondensējamā tvaika patēriņš, kg/s; h — kondensējamā tvaika entalpija, J/kg; t_2 — no kondensatora aizplūstošā ūdens temperatūra, °C; t_1 — aukstā ūdens temperatūra, °C; c_{H_2O} — ūdens īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K). Parasti saplūdes kondensatoriem $U = (15 \dots 60)D$.

Kondensatora augstums. Kondensatoram jābūt pietiekami augstam, lai ūdens, atrazdamies kondensatorā, sasiltu no temperatūras t_1 līdz t_2 .

Saplūdes kondensatoros ūdens sasilst par 10 ... 40 °C. Ja attiecība $U/D = 60$, ūdens sasilst par 10 °C, ja $U/D = 30$, ūdens sasilst par 20 °C, un, ja $U/D = 15$, ūdens sasilst par 40 °C.

Kondensatorā ir līdz 5 ... 7 plaukti. Vidējais attālums starp plauktiem h ir aptuveni $0,4d_k$, parasti 400 mm. Tvaika daudzums kondensatorā no ievadišanas vietas uz augšu samazinās, tādēļ attālumus starp plauktiem izveido dažādus — apakšējiem plauktiem ne lielākus par $0,6d_k$, bet augšējiem — ne mazākus par $0,3d_k$.

Barometriskās caurules augstums. Barometriskās caurules augstumu izsaka kā šādu atsevišķu augstumu summu:

$$H_c = h_1 + h_2 + h_3 + h_4,$$

kur h_1 — ūdens staba augstums, kas vajadzīgs atmosfēras spiediena līdzsvarošanai, m; h_2 — ūdens staba augstums, kas nepieciešams ūdens kustības ātruma nodrošināšanai, vietējo pretestību un berzes pretestības pārvarēšanai, m; h_3 — rezerve atmosfēras spiediena svārstību dēļ — 0,5 m; h_4 — caurules apakšējā gala iegremdēšanas dziļums — 0,5 m.

Ūdens staba augstumu h_1 nosaka šādi:

$$h_1 = 10,33 \frac{\Delta p}{10,13 \cdot 10^4},$$

kur Δp — vakuums kondensatorā, Pa; $\Delta p = p_a - p$.

Augstumu h_2 aprēķina pēc formulas

$$h_2 = \frac{\omega^2}{2g} \left(1 + \zeta_b + \sum_1^n \zeta_{vp} \right) = \frac{\omega^2}{2g} \left(2,5 + \lambda \frac{H_c}{d_c} \right),$$

kur ω — ūdens ātrums barometriskajā caurulē, pieņem, ka $\omega = 0,5 \dots 1$ m/s; $\sum_1^n \zeta_{vp}$ — vietējo pretestību koeficientu summa; pieņem, ka barometriskajai caurulei zudumi, iekļūstot caurulē, vienādi ar 0,5 un, izplūstot no tās, vienādi ar 1, tādēļ $\sum_1^n \zeta_{vp} = 1,5$; λ — hidrauliskais pretestības koeficients; H_c — barometriskās caurules augstums, m; d_c — barometriskās caurules diametrs, ko nosaka šādi:

$$d_c = 3,57 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{D+U}{\omega}}.$$

Formula barometriskās caurules augstuma noteikšanai galīgā veidā ir šāda:

$$H_c = (10,33 \Delta p / (10,13 \cdot 10^4 + 2,5 \omega^2 / 2g + 1) : (1 - \lambda \omega^2 / (2g d_c))),$$

kur H_c izteikts metros.

Kondensatora pievadcaurules un aizvadcaurules aprēķina šādiem ātrumiem: tvaikam 40 ... 50 m/s, nekondensējamām gāzēm 15 m/s un ūdenim 1 m/s. Barometriskā caurule kondensāta krātuvē jāievieto tā, lai caurules gala attālums no krātuves dibena nebūtu mazāks par barometriskās caurules diametru.

No saplūdes kondensatora nosūcamā gaisa patēriņu nosaka pēc formulas

$$G_g = 2,5 \cdot 10^{-5} D + 2,5 \cdot 10^{-5} U + 10^{-2} D.$$

Faktiski nosūcamā gaisa patēriņu nosaka pēc formulas (8.8).

Sausajiem saplūdes kondensatoriem nosūcamo gāzu temperatūru aprēķina šādi:

$$t_g = t_1 + 4 + 0,1(t_2 - t_1).$$

Slapjajiem kondensatoriem $t_g = t_2$.

Vakuumsūknim nepieciešamo jaudu var noteikt pēc formulas (pieņemot, ka vakuumsūknim ir ūdens apvalks)

$$N = \frac{1}{\eta_m 1000} \frac{n}{n-1} p_1 V_g \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n+1}{n}} - 1 \right),$$

kur N — nepieciešamā jauda, kW; n — politropas pakāpe, $n=1,25$; p_1 — gaisa parciālais spiediens, Pa; p_2 — gaisa spiediens, tam izplūstot no vakuumsūkņa, parasti $(10,3 \dots 10,8) \cdot 10^4$ Pa.

Gaisa parciālo spiedienu nosaka šādi: $p_1 = p - p_{tv}$, kur p_{tv} — ūdens tvaika parciālais spiediens temperatūrā t_g , Pa; p — spiediens kondensatorā, Pa.

9. IETVAICE

Ietvaice ir cietu vielu šķīdumu koncentrēšana, daļu šķīdinātāja pārvēršot tvaikā un to novadot no šķīduma virsmas. Ietvaicēi izmanto siltuma enerģiju. Iekārtas, kurās veic šķīduma koncentrēšanu, sauc par *ietvaicētājiem*.

Ar ietvaicēšanu var iegūt koncentrētāku šķīdumu, neizdalot vai arī izdalot cieto fāzi. Ja izdala cieto fāzi, tad pēc ietvaices notiek kristalizācija.

Ietvaicētāju sildīšanai izmanto dažādus siltumnesējus atkarībā no nepieciešamās sildīšanas temperatūras. Rūpniecībā par siltumnesēju plaši lieto ūdens tvaiku ar 0,4...0,8 MPa spiedienu. Sildīšanai lietojamo tvaiku sauc par *primāro tvaiku*. Tvaiku, kas ietvaices procesā rodas virs ietvaicējamā šķīduma virsmas, sauc par *sekundāro tvaiku*.

Atkarībā no ietvaicējamā šķīduma termiskās izturības to ietvaicē vakuumā, atmosfēras spiedienā vai paaugstinātā spiedienā.

Vakuumietvaicēti lieto, 1) ja ietvaicējamais šķīdums augstā temperatūrā maina savas īpašības; 2) ja primārā tvaika spiediens ir zems; 3) ja šķīdumam augsta viršanas temperatūra; 4) ja ir jāpalielina temperatūru starpība vairākpakāpju ietvaices iekārtās.

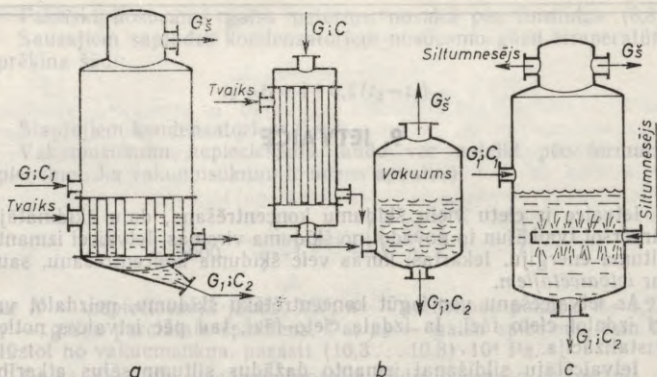
Ietvaicēti veic paaugstinātā spiedienā, ja ietvaicējamā šķīduma īpašības to pieļauj un sekundāro tvaiku iespējams izlietot sildīšanai. Ietvaicējot paaugstinātā spiedienā, sekundāro tvaiku iegūst ar virspiedienu, tādēļ to var izmantot citu iekārtu sildīšanai. Šādos gadījumos sekundāro tvaiku sauc par *ekstra tvaiku*. Ietvaicētāji ir ne tikai šķīdumu koncentrētāji, bet arī tvaika ražotāji.

Šķīduma koncentrēšanu vienā ietvaicētājā līdz beigu koncentrācijai sauc par *vienpakāpes ietvaicēti*. Ietvaicēti vairākos ietvaicētajos ar dažādu spiediena režīmu, kur katra nākamā ietvaicētāja apsildīšanai lieto iepriekšējā ietvaicētāja sekundāro tvaiku, sauc par *vairākpakāpju ietvaicēti*.

Vienpakāpes ietvaicētājā iegūto sekundāro tvaiku var izmantot tajā pašā ietvaicētājā par sildošo tvaiku, ja to kompresorā iepriekš saspiež. Šāda veida ietvaicēti sauc par *ietvaicēti ar siltumsūkni* jeb par *mehānisko ietvaicēti*.

Pēc darbības principa ietvaices iekārtas iedalāmas *periodiskas darbības un nepārtrauktas darbības iekārtās*.

Periodiskas darbības ietvaicētajos šķīdumu ietvaicē līdz beigu koncentrācijai, pēc tam to izvada no aparāta un ietvaicētājā no jauna iepilda atšķaidīto šķīdumu. Periodiskas darbības ietvaicētajos lieto



9.1. att. Ietvaices shēmas.

maza ražīguma iekārtās vai arī gadījumos, kad jāiegūst ļoti koncentrēti šķidumi.

Nepārtrauktas darbības iekārtās nepārtraukti pievada atšķaidīto šķidumu un nepārtraukti aizvada koncentrēto šķidumu. No siltumtehnikā viedokļa nepārtrauktas darbības iekārtas ir ekonomiskākas nekā periodiskas darbības iekārtas.

Rūpniecībā sastopamas divas ietvaicētāju grupas: 1) kur ietvaicējamais šķidums *kontaktējas ar sildvirsmu* un 2) kur tas *nekontaktējas ar sildvirsmu*. Pirmajā grupā ietilpst ietvaicētāji, kuros ietvaicējamais šķidums vārās uz sildvirsmas (*virsmas ietvaicētāji*), kā arī ietvaicētāji, kuros pēc šķiduma uzsildīšanas ietvaice notiek kamerās, retinājumā (*adiabātiskā ietvaice*) (9.1. att. a, b). Otrajā grupā ietilpst ietvaicētāji, kuros ietvaicējamais šķidums tieši kontaktējas ar siltumnesēju — karstu gāzi, šķidrumu vai cietu vielu (9.1. att. c).

9.1. VIRSMAS IETVAICĒTĀJI

9.1.1. Vienpakāpes ietvaice

Vienpakāpes ietvaicētāji iedalāmi *valējos* un *slēgtos ietvaicētājos*. *Vaļējie ietvaicētāji* ir cilindriskas tvertnes vai lēzeni trauki ar glodeni vai apvalkveidā siltumapmainītāju. Tos lieto nelielu šķiduma daudzumu ietvaicei.

Ietvaicētāja darbību raksturo ar *ipatnējo tvaika patēriņu*, t. i., *primārā tvaika masu, kas nepieciešama 1 kg sekundārā tvaika iegūšanai*. Vienpakāpes ietvaicētājos 1 kg sekundārā tvaika iegūšanai vajadzīgi aptuveni 1,1... 1,2 kg primārā tvaika.

Slēgtie vienpakāpes ietvaicētāji var darboties retinājumā. Šāda vakuumietvaices iekārta parādīta 9.2. attēlā. Tā sastāv no ietvaicē-

tāja 1, putu uztvērēja 2, kondensatora 3 un vakuumsūkņa 4. Kondensatorā kondensē sekundāro tvaiku. Tas ekonomiskā ziņā ir izdevīgāk, nekā tvaiku nosūkt ar vakuumsūkni. Ja sekundārā tvaika kondensātu nedrīkst sajaukt ar dzesējamo ūdeni, tad lieto virsmas kondensatoru.

Ietvaicējamo šķīdinātāja masu, šķīduma koncentrācijai palielinoties no C_1 līdz C_2 , nosaka, sastādot ietvaices procesa *materiālo bilanci*.

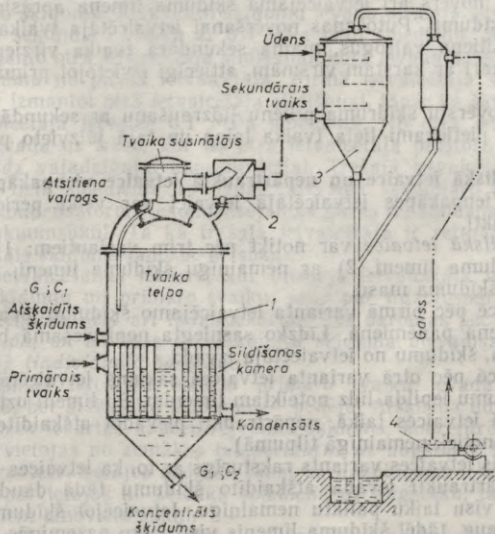
Ja atšķaidītā šķīduma sākuma masu sekundē apzīmē ar G , bet ietvaicējamā šķīdinātāja masu sekundē ar G_s , tad negaistošā komponenta masu sekundē atšķaidītā un koncentrētā šķīdumā var izteikt ar šādu vienādojumu:

$$GC_1 = (G - G_s)C_2,$$

$$G_s = G \left(1 - \frac{C_1}{C_2} \right). \quad (9.1)$$

Ietvaices beigās šķīduma masa sekundē G_m ir

$$G_m = G \frac{C_1}{C_2} = G - G_s.$$



9.2. att. Vakuumietvaices iekārtas shēma.

Vienpakāpes ietvaicei nepieciešamo tvaika masu nosaka, sastādot ietvaicēšanas procesa *siltuma bilanci*.

Ja ietvaicētājs darbojas periodiski un sākumā tajā ievada atšķaidīto šķīdumu ar temperatūru, kas ievērojami zemāka par šķīduma viršanas temperatūru, tad ietvaicētāja darbību raksturo divi posmi: 1) šķīduma uzsildīšana līdz viršanas temperatūrai un 2) šķīduma ietvaicēšana.

Ja paredzama kristālu izveidošanās (cukurrūpniecībā, koncentrējot sārmus u. c.), tad vakuumietvaici izdara līdz pārsātināta šķīduma stāvoklim. Šāda ietvaice ietekmē procesa gaitu — rodas iespēja kristāliem nogulsneties uz aparāta sildvirsmas, bez tam nav izslēgta arī putu veidošanās un daļēja šķīduma pilienu līdzraušana ar sekundāro tvaiku.

Siltuma apmaiņu negatīvi ietekmē nogulumu kārtas veidošanās uz sildvirsmas. Šāda parādība samazina siltumpārejas koeficientu, caurulēm aizsērējot, palielina iekārtas pretestību, un tādēļ pieaug enerģijas patēriņš šķīduma pārvietošanai. Nogulumu kārtas izveidošanās kavē pastiprināta šķīduma cirkulācija, jo tā traucē cieta daļiņu nogusnēšanos uz sildvirsmas. Šķīdumiem, kas veido nogulumu kārtu, jāparedz sildvirsmas periodiska tīrīšana.

Ievērojamus traucējumus ietvaices gaitā var radīt šķīduma putošana. Putošanu novērš, ja ietvaicējamo šķīdumu filtrē vai tam pievieno vielas, kas palielina virsmas spraigumu (eļļas, taukskābes). Putošanu novērš arī ietvaicējamā šķīduma līmeņa aprasināšana ar aukstu šķīdumu. Putošanas novēršanai ietvaicētāja tvaika telpā izveido atsiltiena vairogus, maina sekundārā tvaika virzienu, panāk putu saskari ar karstām virsmām, attiecīgi izvietojot primārā tvaika pievadus.

Lai novērstu šķīduma pilienu līdzraušanu ar sekundāro tvaiku, jāizveido pietiekami liela tvaika telpa un tajā jāizvieto pilienu uztvērēji.

Periodiskā ietvaice un nepārtrauktā ietvaice vienpakāpes ietvaicētājā. Vienpakāpes ietvaicētājā ietvaici var veikt periodiski vai nepārtraukti.

Periodiskā ietvaice var notikt pēc trim variantiem: 1) ar mainīgu šķīduma līmeni, 2) ar nemainīgu šķīduma līmeni, 3) ar nemainīgu šķīduma masu.

Ietvaicē pēc pirmā varianta ietvaicējamo šķīdumu ievada ietvaicētājā vienā paņēmiēnā. Līdzko sasniegta nepieciešamā beigu koncentrācija, šķīdumu no ietvaicētāja izvada.

Ietvaicē pēc otrā varianta ietvaices sākumā ietvaicētājā atšķaidīto šķīdumu iepilda līdz noteiktam līmenim. So līmeni uztur nemainīgu visā ietvaices laikā, nepārtraukti pievadot atšķaidīto šķīdumu (ietvaice notiek nemainīgā tilpumā).

Trešais ietvaices variants raksturīgs ar to, ka ietvaices laikā aparātā nepārtraukti ievada atšķaidīto šķīdumu tādā daudzumā, lai tā masa visu laiku paliktu nemainīga. Ietvaicējot šķīdumu, tā blīvums pieaug, tādēļ šķīduma līmenis visu laiku pazeminās.

Minētie ietvaices varianti pieder pie nestacionāriem procesiem.

Nepārtraukto ietvaici lieto tad, ja vienpakāpes ietvaicētājā šķīduma koncentrāciju uztur vienādu ar nepieciešamo beigu koncentrāciju. To panāk, ja ietvaicētājā esošā šķīduma tilpums ir ievērojami lielāks par ievadāmā atšķaidītā šķīduma tilpumu. Ietvaici šādā gadījumā var uzskatīt par stacionāru procesu.

9.1.2. Vairākpakāpju ietvaice

Sekundārais tvaiks, kas rodas ietvaices rezultātā, no siltumtehnikā viedokļa ir gandrīz tikpat vērtīgs kā primārais tvaiks. Ja saslēdz virknē vairākus ietvaicētājus, kuros uztur dažādus spiediena režīmus, tad iepriekšējā ietvaicētāja sekundāro tvaiku iespējams izmantot nākamajā ietvaicētājā par sildošo tvaiku. Tādā gadījumā katrā nākamā ietvaicētāja sildvirsmu izmanto iepriekšējam ietvaicētājam par virsmas kondensatoru. Šādi izmantojot sekundāro tvaiku, var ievērojami ietaupīt primāro tvaiku. Praktiski ar vienu kilogramu primārā tvaika ietvaicē divpakāpju ietvaicētājā 1,7 kg ūdens; trīspakāpju ietvaicētājā — 2,0 kg ūdens; četrpakāpju ietvaicētājā — 2,2 kg ūdens.

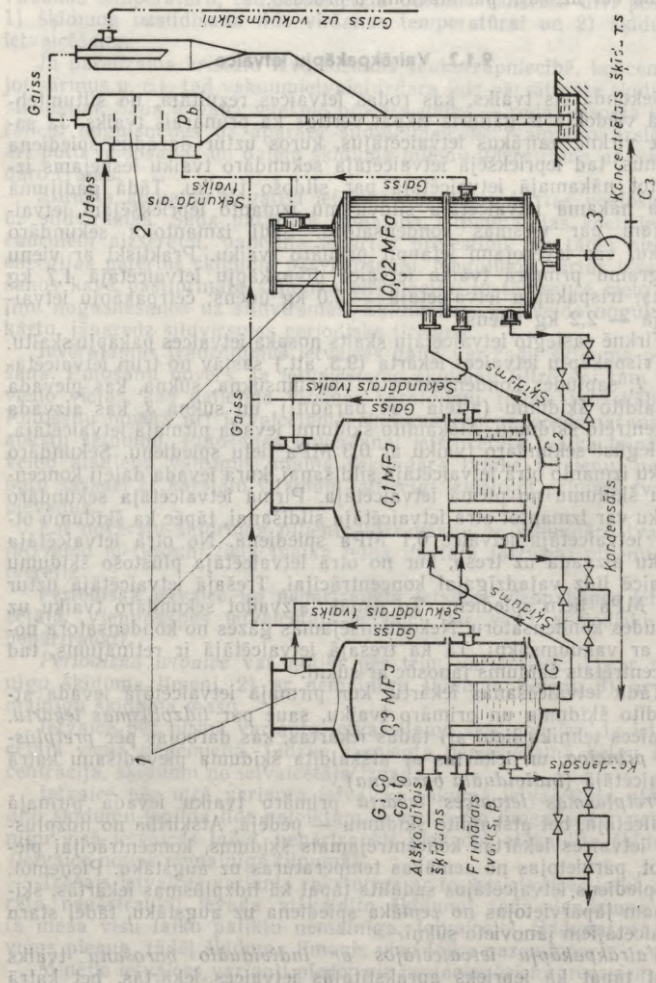
Virknē saslēgto ietvaicētāju skaits nosaka ietvaices pakāpju skaitu.

Trīspakāpju ietvaices iekārta (9.3. att.) sastāv no trim ietvaicētājiem 1, saplūdes kondensatora 2, vakuumsūkņa, sūkņa, kas pievada atšķaidīto šķīdumu (attēlā nav parādīti), un sūkņa 3, kas aizvada koncentrēto šķīdumu. Atšķaidīto šķīdumu ievada pirmajā ietvaicētājā, kur iegūst sekundāro tvaiku ar 0,3 MPa lielu spiedienu. Sekundāro tvaiku izmanto otrā ietvaicētāja sildīšanai, kurā ievada daļēji koncentrētu šķīdumu no pirmā ietvaicētāja. Pirmā ietvaicētāja sekundāro tvaiku var izmantot otrā ietvaicētāja sildīšanai, tāpēc ka šķīdumu otrajā ietvaicētājā ietvaicē 0,1 MPa spiedienā. No otrā ietvaicētāja tvaiku aizvada uz trešo, kur no otrā ietvaicētāja plūstošo šķīdumu ietvaicē līdz vajadzīgajai koncentrācijai. Trešajā ietvaicētājā uztur 0,02 MPa lielu spiedienu. To panāk, aizvadot sekundāro tvaiku uz saplūdes kondensatoru. Nekondensējamās gāzes no kondensatora nosūc ar vakuumsūkni. Tā kā trešajā ietvaicētājā ir reināžjums, tad koncentrētais šķīdums jānosūc ar sūkni.

Tādu ietvaicēšanas iekārtu, kur pirmajā ietvaicētājā ievada atšķaidīto šķīdumu un primāro tvaiku, sauc par *līdzplūsmas iekārtu*. Ietvaices tehnikā lieto arī tādas iekārtas, kas darbojas pēc *pretplūsmas principa*, un iekārtas ar atšķaidīta šķīduma pievadišanu katrā ietvaicētājā (*individuālā barošana*).

Pretplūsmas ietvaices iekārtā primāro tvaiku ievada pirmajā ietvaicētājā, bet atšķaidīto šķīdumu — pēdējā. Atšķirībā no līdzplūsmas ietvaices iekārtas koncentrējamais šķīdums, koncentrācijai pieaugot, pārvietojas no zemākas temperatūras uz augstāku. Pieņemot, ka spiediens ietvaicētājos sadalīts tāpat kā līdzplūsmas iekārtās, šķīdumam jāpārvietojas no zemāka spiediena uz augstāku, tādēļ starp ietvaicētājiem jānovieto sūkņi.

Vairākpakāpju ietvaicētājos ar individuālo barošanu tvaiks plūst tāpat kā iepriekš aprakstītajās ietvaices iekārtās, bet katrā



9.3. att. Trīspakāpju ielvaices iekārtas shēma.

ietvaicētājā ievadīto atšķaidīto šķīdumu koncentrē līdz vajadzīgajai koncentrācijai.

Rūpniecībā šķīdumu ietvaicei parasti lieto līdzplūsmu. Pretplūsmas ietvaici izmanto tad, ja, šķīduma koncentrācijai palielinoties, ievērojami pieaug tā viskozitāte. Šādos gadījumos koncentrētie šķīdumi nokļūst ietvaicētajos, kuros ir augstāka temperatūra, līdz ar to viskozitāte samazinās un neietekmē siltumpārejas koeficientu. Pretplūsmas ietvaices iekārtu trūkums ir liels elektroenerģijas patēriņš, jo šķīduma pārvietošanai starp ietvaicētajiem jālieto sūkņi, bez tam pretplūsmas variantam ir līdz 5% lielāks primārā tvaika patēriņš.

Ietvaicējot šķīdumus, kas kristalizējas un rada cauruļvadu un armatūras aizsērēšanu pat tad, ja paredz īpašas kameras kristālu atdalīšanai, lieto *vairākpakāpju ietvaices iekārtas ar individuālo barošanu*. Vairākpakāpju ietvaices iekārtās ietvaicētāju numerāciju sāk no tā ietvaicētāja, kurā ir augstāka temperatūra.

Kondensātu no sildkamerām novada caur kondensāta novadītājiem. Nekondensējamās gāzes vai gaisu, kas sakrājas sildkameras augšējā daļā un pasliktina siltuma pāreju, novada pa īpašu cauruļvadu, kas savienots ar kondensatoru. Dažreiz gaisu pa caurulēm ievada sekundārajā tvaikvadā. Pirmais gaisa novadīšanas veids rada zināmus tvaika zudumus, otrais pasliktina siltuma pāreju nākamajos ietvaicētajos.

Rūpniecībā lieto arī ietvaices iekārtas *ar jauktu šķīduma pievadīšanu, ar nulles ietvaicētajiem, dubultietvaicētajiem* u. c.

Lietojo t jauktu šķīduma pievadīšanu, koncentrētais šķīdums nokļūst ietvaicētājā ar augstāku temperatūru (līdzīgi pretplūsmas shēmai). Ekstra tvaiku var noņemt starp jebkuriem ietvaicētajiem, bet ekonomiskāk, ja to izdara no pēdējiem aparātiem (kur ir virsspiediēns).

Ietvaicētāju apsildīšanai var izmantot spēkmašīnu attvaiku. Ja attvaika nepietiek, tad ietvaices iekārtā pirms pirmās pakāpes ievieto nulles ietvaicētāju, kuru silda ar tvaiku no katla. Nulles ietvaicētājs aizstāj redukcijas ventili. Nulles ietvaicētājā iegūto sekundāro tvaiku (parasti ar attvaika spiedienu) kopā ar attvaiku izlieto ietvaicētāju sildīšanai. Lielāka ekstra tvaika daudzuma iegūšanai lieto divus paralēli saslēgtus ietvaicētajus.

Ja, pieaugot koncentrācijai, ievērojami paaugstinās šķīduma viršanas temperatūra un sildošais tvaiks nespēj nodrošināt ietvaicei nepieciešamo temperatūru starpību, tad pirmajos ietvaicētajos par siltumnesēju lieto tvaiku, bet pārējos — minerāleļļu, dinilu u. c.

Ietvaices iekārtas tehnoloģiskais aprēķins jāveic, lai noteiktu nepieciešamo sildvirsmu un primārā tvaika daudzumu. Šos lielumus var noteikt, ja ir zināma šķīduma viršanas temperatūra dažādām koncentrācijām un spiediēniem, īpatnējā siltumietilpība, temperatūras depresijas izmaiņa atkarībā no koncentrācijas un citi fizikālie lielumi.

Šķīduma viršanas temperatūra. Šķīduma viršanas temperatūrai ir ļoti liela nozīme ietvaices režīma un siltumnesēja izvēlē. Dati par šķīdumu viršanas temperatūrām atkarībā no koncentrācijas un spiediena publicēti rokasgrāmatās. Ja šķīdumam dotajos apstākļos

viršanas temperatūra grāmatās nav atrodama, tad tā jānosaka eksperimentāli vai jāaprēķina.

Sāļu šķīdumiem, ja zināma to viršanas temperatūra vienā spiedienā, viršanas temperatūru jebkurā citā spiedienā var noteikt pēc Babo likuma

$$\left(\frac{p}{p_0}\right)_t = \text{const}, \quad (9.2)$$

t. i., *virš šķīduma esošā tvaika parciālā spiediena p attiecība pret tīra šķīdinātāja tvaika parciālo spiedienu p_0 vienādās temperatūrās ir konstants lielums.*

Nosakot viršanas temperatūru pēc Babo likuma, jāievēro kļūdu robežas, kas parādītas 9.1. tabulā.

9.1. tabula

Pieļaujamās maksimālās temperatūras kļūdas Δt
viršanas temperatūras noteikšanai pēc Babo likuma

$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\frac{p}{p_0}$						
	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
	Spiediens virš verdošā šķīduma, kPa						
0,9	13,3	26,7	53,3	60,0	66,7	73,3	86,7
1,8	0	6,7	26,7	46,7	60,0	66,7	73,3
2,6	0	0	13,3	26,7	40,0	46,7	53,3
3,6	0	0	0	20,0	26,7	33,3	40,0

Piemērs. Noteikt 60,4% kālija karbonāta ūdens šķīduma viršanas temperatūru 0,03 MPa spiedienā, ja atmosfēras spiedienā šķīduma viršanas temperatūra ir 125°C.

Risinājums. Vispirms pēc tabulām nosaka ūdens tvaika parciālo spiedienu: 125°C temperatūrā tas ir 0,229 MPa.

Pēc Babo likuma, $\left(\frac{p}{p_0}\right)_{125} = \frac{0,1}{0,229} \approx 0,437$.

0,03 MPa spiedienam atbilstošais šķīdinātāja viršanas spiediens p_0 ir

$$\left(\frac{0,03}{p_0}\right)_t = 0,437 \text{ jeb } \frac{0,03}{0,437} \approx 0,0687 \text{ MPa} = 68,7 \text{ kPa.}$$

Spiedienam 68,7 kPa atbilst ūdens tvaika temperatūra 89,8°C. Tā tad arī ir 60,4% K_2CO_3 ūdens šķīduma viršanas temperatūra 0,03 MPa spiedienā.

Pēc 9.1. tabulas spiedienu attiecībai $\frac{p}{p_0} = 0,437$ un spiedienam virš verdošā šķīduma 68,7 kPa atbilst maksimālā temperatūras kļūda $\Delta t = 0,9^\circ\text{C}$.

Ja izšķīdinātai vielai šķīšanas siltums ir pozitīvs, tad temperatūras kļūdu Δt pieskaita pēc Babo likuma iegūtai šķīduma viršanas temperatūrai (89,8+0,9=90,7°C). Ja izšķīdinātai vielai šķīšanas siltums ir negatīvs, tad temperatūras kļūdu atņem.

Tehniskos aprēķinos pieļaujama šķīduma viršanas temperatūras kļūda 1...2°C.

Temperatūras depresija. Par šķiduma temperatūras depresiju sauc temperatūru starpību starp šķiduma un tīra šķīdinātāja viršanas temperatūrām. Ietvaicējamā šķiduma temperatūras depresija ļoti negatīvi ietekmē ietvaici, jo samazina temperatūru starpību starp sildošo tvaiku un verdošo šķidumu.

Piemērs. Ja iztvaicē ūdeni atmosfēras apstākļos, temperatūru starpība starp sildošo tvaiku un verdošo ūdeni $\Delta t = 151 - 100 = 51$ °C, kur 151 °C ir sildošā tvaika kondensācijas temperatūra, bet 100 °C — ūdens viršanas temperatūra.

Ietvaicējot 38% nātrija hidroksīda ūdens šķīdumu, temperatūru starpība $\Delta t' = 151 - 125 = 26$ °C, kur 125 °C ir 38% nātrija hidroksīda ūdens šķiduma viršanas temperatūra.

38% nātrija hidroksīda temperatūras depresija $\Delta t_d = 125 - 100 = 25$ °C.

Temperatūras depresijas dēļ temperatūru starpība starp vienu un otru vidi samazinās par 25 °C; tas savukārt samazina siltuma apmaiņas intensitāti.

Rokasgrāmatās uzrādīta temperatūras depresija atmosfēras spiedienā. Temperatūras depresijas izmaiņu atkarībā no spiediena var noteikt pēc Tiščenko formulas

$$\Delta' = 1,62 \cdot 10^{-2} \Delta'_{at} T^2 / r, \quad (9.3)$$

kur Δ' — temperatūras depresija ietvaices spiedienā, °C; Δ'_{at} — temperatūras depresija atmosfēras spiedienā, °C; T — sekundārā tvaika temperatūra viršanas caurulē ietvaicējamā šķiduma slāņa vidū (sk. 9.4. att., punkts A), K; r — ūdens iztvaikošanas siltums dotajā spiedienā, kJ/kg.

Pieņem, ka sekundārā tvaika temperatūra ir tāda pati, kā piesātinātam tvaikam ietvaicēšanas spiedienā. (Ja temperatūras depresija ir liela, šāds pieņēmums neatspoguļo īstenību, jo tvaiks tādā gadījumā ir pārkarsētā stāvoklī.)

Īpatnējā siltumietilpība. Pareizai ietvaicējamā šķiduma īpatnējās siltumietilpības noteikšanai ir liela nozīme ietvaices iekārtu aprēķinos.

Ja šķiduma īpatnējā siltumietilpība nav zināma, to aprēķina pēc šādām formulām:

1) ūdens šķīdumiem ar izšķīdinātās vielas koncentrāciju $C < 20\%$ (pēc masas)

$$c = 4187 \left(1 - \frac{C}{100} \right);$$

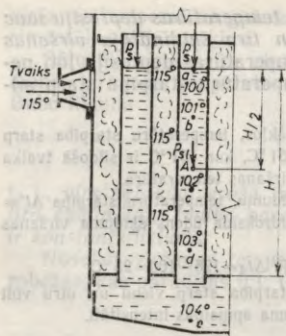
2) koncentrētiem ūdens šķīdumiem, ja $C > 20\%$:

$$c = 4187 - \frac{C}{100} (4187 - c_v),$$

kur c_v — izšķīdinātās vielas īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K).

Šķīdumiem, kas sastāv no vairākiem komponentiem, īpatnējo siltumietilpību aptuveni nosaka pēc formulas

$$c \approx 0,01 (c_1 C_1 + c_2 C_2 + \dots + c_n C_n),$$



9.4. att. Hidrostatiskā efekta shēma.

temperatūru starpību starp sildošo tvaiku un verdošo šķidumu. To sauc par *hidrostatisko efektu*. Tas samazina ietvaices iekārtas intensitāti un ir saistīts ar ietvaices iekārtas sildvirsmas palielināšanu. Piemēram, ja ietvaicētāja sildošā tvaika kondensācijas temperatūra ir 115 °C (9.4. att.), tad šī temperatūra ir tāda visā tvaika telpā. Turpretī šķiduma viršanas temperatūra dažādos dziļumos ir dažāda. Punktā *b* darbojas spiediens p un šķiduma hidrostatiskais spiediens. Hidrostatiskais spiediens palielinās, pārvietojoties no punkta *a* uz *e*, tādēļ arī viršanas temperatūra šajos punktos pieaug (šajā piemērā no 100 līdz 104 °C). Temperatūru starpība starp tvaiku un verdošo šķidumu hidrostatiskā efekta dēļ samazinās: punktā *a* tā ir 115–100 = 15 °C, punktā *b* — 115–101 = 14 °C, punktā *c* — 115–102 = 13 °C utt.

Ietvaices iekārtu aprēķinos pieņem, ka šķidums verd vidējā slāņa viršanas temperatūrā. Lai šo temperatūru noteiktu, vispirms aprēķina spiedienu šķiduma slāņa vidū, t. i., punktā *A*. Ietvaices laikā viršanas caurulēs ir sekundārā tvaika un šķiduma maisījums. Tādēļ, aprēķinot hidrostatisko spiedienu šķiduma slāņa vidū, jāievēro tvaika koncentrācija šķidumā.

Šķiduma piesātinātību ar tvaiku (tvaiks kubikmetros šķiduma) raksturo lielums ϵ . Kodolveida viršanā $\epsilon = 0,4 \dots 0,6$.

Punktā *A* (sk. 9.4. att.) hidrostatiskais spiediens

$$\Delta p = \frac{\rho g H}{2} (1 - \epsilon),$$

kur Δp — hidrostatiskais spiediens, Pa; ρ — ietvaicējamā šķiduma blīvums 15 °C temperatūrā, kg/m³; H — ietvaicētāja viršanas caurules augstums, m; g — brīvās krišanas paātrinājums, m/s².

Kopējo spiedienu šķiduma slāņa vidū (punktā *A*) aprēķina pēc formulas:

$$p_{s1} = p_s + \frac{\rho g H}{2} (1 - \epsilon), \quad (9.4)$$

kur p_{s1} — spiediens slāņa vidū, Pa; p_s — sekundārā tvaika spiediens virs šķiduma limeņa, Pa.

Temperatūras zudumus Δ'' , kas rodas hidrostatiskā efekta dēļ, nosaka šādi:

$$\Delta'' = t_{s1} - t_s,$$

kur t_{s1} — šķīdinātāja (ūdens) viršanas temperatūra spiedienā p_{s1} , °C; t_s — šķīdinātāja viršanas temperatūra spiedienā p_s , °C.

Hidrodinamiskais efekts. Vairāpkapāpju ietvaices iekārtās sekundārais tvaiks, pārvietojoties no ietvaicējamā šķiduma virsmas (9.5. att.) līdz nākamā ietvaicētāja sildkamerai (no punkta 0 līdz punktam 1), pārvar berzes pretestības un vietējās pretestības. Tas pazemina tvaika spiedienu no p_0 (punktā 0) līdz p_1 (punktā 1).

Sekundārā tvaika spiediena pazeminājumu Δp , tvaikam pārvietojoties no punkta 0 uz punktu 1, aprēķina pēc parastās hidraulikā lietojamās formulas

$$\Delta p = \frac{\rho_t \omega^2}{2} \left(1 + \Sigma \frac{\lambda l}{d} + \Sigma \zeta_{vp} \right),$$

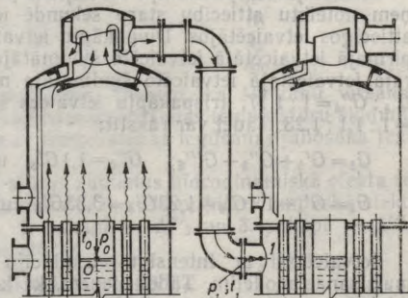
kur Δp — spiediena zudums, Pa; ω — tvaika ātrums, m/s; ρ_t — tvaika blīvums, kg/m³; λ — hidrauliskās pretestības koeficients; l — posma garums, m; d — attiecīgā posma diametrs, m; ζ_{vp} — vietējās pretestības koeficients.

Tā kā tvaika ātrums mainās (jo ir dažādi šķērsriezumi), spiediena zudumus nosaka pa posmiem un summē.

Līdz ar tvaika spiediena pazemināšanos no p_0 līdz p_1 pazeminās arī tā temperatūra, tādēļ *hidrodinamiskā efekta* dēļ ietvaices iekārtā rodas temperatūras zudums, ko aprēķina šādi:

$$\Delta''' = t_0 - t_1,$$

kur t_0 — tvaika temperatūra spiedienā p_0 , °C; t_1 — tvaika temperatūra spiedienā p_1 , °C.



9.5. att. Sekundārā tvaika plūsma vairāpkapju ietvaices iekārtā.

39 Tehniskos aprēķinos temperatūras zudumu, kas rodas hidrodinamiskā efekta dēļ, neaprēķina, bet pieņem, ka starp katru ietvaicētāju vai kondensatoru temperatūras zudums $\Delta''' = 1 \dots 1,5^\circ\text{C}$.

9.1.3. Vairāpkāpju ietvaices iekārtas tehnisko rādītāju aprēķins

Ietvaices iekārtu aprēķināšanai lieto vairākas analītiskas un grafiski analītiskas metodes. Ķīmiskajā rūpniecībā ietvaicē ļoti dažādus šķīdumus, kas atšķiras pēc blīvuma, viskozitātes, kristalizēšanās, puotošanas, termiskās izturības utt. Tādēļ ietvaices shēmas un pakāpju skaita izvēle saistīta ar tehniski ekonomiskajiem aprēķiniem un optimālu variantu iegūst, aprēķiniem lietojot elektroniskās skaitļošanas mašīnas.

Pēc ietvaices iekārtas shēmas izvēles ķīmiķim tehnologam jānosaka sekundē ietvaicējamā šķīdinātāja masa G_s , ietvaicētāja sildvirsmas laukums S un primārā tvaika patēriņš D ietvaices procesa realizēšanai. Iegūtie rezultāti ļauj izvēlēties pēc kataloga piemērotāko ietvaicētāju un paredzēt nepieciešamo tvaika patēriņu, kāds būs jānodrošina rūpnīcas tvaika katlam.

Lai varētu aprēķināt lielumus G_s , S un D , jāzina ietvaicējamā šķīdinātāja sadalījums pa ietvaicētājiem, šķīduma koncentrācija un tā viršanas temperatūras ietvaicētājos. Šo lielumu noteikšanai lieto pakāpeniskās tuvināšanas metodi.

Pēc šīs metodes aprēķināsim trīspakāpju ietvaices iekārtu. Aprēķinam nepieciešamie dati doti 9.3. attēlā.

Pirmais tuvinājums. Vadoties no ietvaices materiālās bilances (formula (9.1)), aprēķina sekundē ietvaicējamā šķīdinātāja masu:

$$G_s = G(1 - C_0/C_3). \quad (9.5)$$

Ietvaicējamā šķīdinātāja sadalījums pa ietvaicētājiem. Praksē pieņem noteiktu attiecību starp sekundē ietvaicēto šķīdinātāja masu attiecīgos ietvaicētājos. Divpakāpju ietvaices iekārtai attiecība starp pirmajā ietvaicētājā ietvaicēto šķīdinātāja masu sekundē G'_s un otrajā ietvaicētājā ietvaicēto šķīdinātāja masu sekundē G''_s ir šāda: $G'_s : G''_s = 1 : 1,17$; trīspakāpju ietvaices iekārtai — $G'_s : G''_s : G'''_s = 1 : 1,1 : 1,23$. Tādēļ var rakstīt:

$$G_s = G'_s + G''_s + G'''_s; \quad G''_s = 1,1G'_s \quad \text{un} \quad G'''_s = 1,23G'_s, \quad \text{tad}$$

$$G_s = G'_s + 1,1G'_s + 1,23G'_s = 3,33G'_s \quad \text{un} \quad G'_s = \frac{G_s}{3,33}. \quad (9.6)$$

Ietvaicētāji ar intensīvu cirkulāciju praktiski atbilst ideālam maisīšanas modelim. Tādēļ pieņem, ka koncentrācija momentāni izlīdzinās pa ietvaicējamā šķīdumu un ir vienāda ar šķīduma beigu koncentrāciju attiecīgajā ietvaicētājā. Tādējādi aprēķinos fizikālos lielumus ņem atkarībā no šķīduma beigu koncentrācijas ietvaicētājā.

Šķidumu beigu koncentrācijas ietvaicētājos. Šķidumu beigu koncentrācijas aprēķina pamatā ir ietvaices materiālā bilance. Pieņemot, ka izšķīdinātās vielas masa ietvaices laikā nemainās, var rakstīt, ka

$$GC_0 = (G - G'_s)C_1, \text{ tad } C_1 = GC_0 / (G - G'_s), \quad (9.7)$$

kur C_1 — no pirmā ietvaicētāja izplūstošā šķiduma beigu koncentrācija, %.

No otrā ietvaicētāja izplūstošā šķiduma beigu koncentrāciju aprēķina analogiski, t. i.,

$$C_2 = GC_0 / (G - G'_s - G''_s). \quad (9.8)$$

No trešā ietvaicētāja šķidums izplūst ar koncentrāciju C_3 , kura arī ir ietvaicētāja 3. pakāpes šķiduma koncentrācija.

Spiediena sadalījums pa ietvaicētājiem un sildošā tvaika parametri. Pirmajā tuvinājumā spiedienu pa ietvaicētājiem sadala vienmērīgi. Spiedienu starpība

$$\Delta p = \frac{p - p_b}{3}, \quad (9.9)$$

kur p — primārā tvaika spiediens (sk. 9.3. att.), Pa; p_b — sekundārā tvaika spiediens barometriskajā kondensatorā, Pa. Barometriskajā kondensatorā atlikušais spiediens ir 0,01 ... 0,02 MPa.

Tvaika spiediens barometriskajā kondensatorā p_b
 3. pakāpes sildošā tvaika spiediens $p_2 = p_b + \Delta p$
 2. „ „ „ „ „ „ $p_1 = p_2 + \Delta p$ (9.10)
 Primārā tvaika spiediens $p = p_1 + \Delta p$

No piesātinātā ūdens tvaika tabulām (pieņem, ka ietvaicē ūdens šķidumu) iegūst ietvaicētājus sildošā tvaika temperatūras un entalpijas.

Spiediens, MPa	Temperatūra, °C	Entalpija, kJ/kg
p	t	h
p_1	t_1	h_1
p_2	t_2	h_2
p_b	t_b	h_b

Šķidumu viršanas temperatūras. Pieņem, ka šķidumu viršanas temperatūras ietvaicētājos vienādas ar viršanas temperatūru šķidumu slāņu vidū. Šķidumu viršanas temperatūras iegūšanai jānosaka temperatūras zudumi.

Vispirms nosaka temperatūras zudumus hidrodinamiskā efekta rezultātā (sk. 365. lpp.). Ja temperatūras zudumi hidrodinamiskā efekta rezultātā 1. pakāpē ir Δ'''_1 , 2. pakāpē — Δ'''_2 un 3. pakāpē — Δ'''_3 , tad sekundārā tvaika temperatūras

1. pakāpē $t'_s = t_1 + \Delta'''_1$,
2. pakāpē $t''_s = t_2 + \Delta'''_2$,
3. pakāpē $t'''_s = t_b + \Delta'''_3$.

Temperatūras zudumi hidrodinamiskā efekta rezultātā visā ietvaices iekārtā

$$\Sigma \Delta''' = \Delta'''_1 + \Delta'''_2 + \Delta'''_3. \quad (9.11)$$

Vadoties no sekundārā tvaika temperatūrām (no piesātinātā ūdens tvaika tabulām), nosaka sekundārā tvaika spiedienus:

Temperatūra, °C Spiediens, MPa

1. pakāpē	t'_s	p'_s
2. pakāpē	t''_s	p''_s
3. pakāpē	t'''_s	p'''_s

Spiedienu ietvaicējamā šķīduma slāņa vidū aprēķina pēc formulas (9.3). Spiediena aprēķināšanai jāzina viršanas cauruļu augstums H , tādēļ vispirms jāaprēķina ietvaicētāja orientējošā sildvirsmā, lai pēc tās no ražoto ietvaicētāju normām izvēlētos piemērotāko ietvaicētāju un aprēķinātu H .

1. pakāpes ietvaicētājiem orientējošo sildvirsmu S_{or} aprēķina šādi:

$$S_{or} = \frac{\Phi_1}{q_1} = \frac{G'_s r_1}{q_1}, \quad (9.12)$$

kur Φ_1 — siltuma plūsma 1. pakāpē, W; G'_s — 1. pakāpē ietvaicējamā šķīdinātāja masa sekundē, kg/s; r_1 — šķīdinātāja iztvaikošanas (kondensācijas) siltums 1. pakāpes sekundārā tvaika spiedienā, J/kg; q_1 — siltuma plūsmas blīvums 1. pakāpē, W/m².

Ietvaicējot ūdens šķīdumus, ietvaicētājiem ar brīvu cirkulāciju pieņem, ka siltuma plūsmas blīvums $q = 20\,000 \dots 50\,000$ W/m²; ietvaicētājiem ar piespiedu cirkulāciju $q = 40\,000 \dots 80\,000$ W/m².

Spiediens verdošo šķīdumu slāņu vidū (sk. 365. lpp.):

$$\begin{aligned} 1. \text{ pakāpē } p_{1s} &= p'_s + \frac{\rho_1 g H}{2} (1 - \varepsilon), \\ 2. \text{ pakāpē } p_{2s} &= p''_s + \frac{\rho_2 g H}{2} (1 - \varepsilon), \\ 3. \text{ pakāpē } p_{3s} &= p'''_s + \frac{\rho_3 g H}{2} (1 - \varepsilon), \end{aligned} \quad (9.13)$$

kur ε — šķīduma piesātinātība ar tvaiku, $\varepsilon = 0,4 \dots 0,6$.

Aprēķinātajiem spiedieniem nosaka atbilstošās ūdens (šķīdinātāja) viršanas temperatūras un iztvaikošanas siltumus:

Spiediens, MPa Temperatūra, °C Iztvaikošanas siltums, kJ/kg

1. pakāpē	p_{1s}	t_{1s}	r_1
2. pakāpē	p_{2s}	t_{2s}	r_2
3. pakāpē	p_{3s}	t_{3s}	r_3

Temperatūras zudumi hidrostatiskā efekta rezultātā

$$\begin{aligned} 1. \text{ pakāpē } \Delta''_1 &= t_{1s} - t'_s, \\ 2. \text{ pakāpē } \Delta''_2 &= t_{2s} - t''_s, \\ 3. \text{ pakāpē } \Delta''_3 &= t_{3s} - t'''_s. \end{aligned} \quad (9.14)$$

Kopējie temperatūras zudumi ietvaices iekārtā hidrostatiskā efekta rezultātā:

$$\Sigma\Delta'' = \Delta''_1 + \Delta''_2 + \Delta''_3. \quad (9.15)$$

Temperatūras zudumus depresijas rezultātā aprēķinot pēc formulas (9.3), iegūst:

1. pakāpē Δ'_1 , 2. pakāpē Δ'_2 , 3. pakāpē Δ'_3 .

Kopējie zudumi ietvaices iekārtā temperatūras depresijas rezultātā

$$\Sigma\Delta' = \Delta'_1 + \Delta'_2 + \Delta'_3. \quad (9.16)$$

Šķidumu viršanas temperatūras ietvaicētājos

1. pakāpē $t_{1v} = t_1 + \Delta'_1 + \Delta''_1 + \Delta'''_1$,
2. pakāpē $t_{2v} = t_2 + \Delta'_2 + \Delta''_2 + \Delta'''_2$,
3. pakāpē $t_{3v} = t_b + \Delta'_3 + \Delta''_3 + \Delta'''_3$.

Ja ietvaicēšanai lieto ietvaicētāju ar pagarinātu viršanas joslu, tad jāņem vērā arī temperatūras zudumi, kas rodas šķiduma pārkaršanas dēļ.

Plānslāņa ietvaicētājos neievēro temperatūras zudumus hidrostatiskā efekta rezultātā Δ'' .

Lietderīgās temperatūru starpības noteikšana. Lietderīgā temperatūru starpība ietvaicētājos ir temperatūru starpība starp sildošā tvaika un šķiduma viršanas temperatūrām.

Lietderīgā temperatūru starpība pa pakāpēm:

1. pakāpē $\Delta t_{1l} = t - t_{1v}$,
2. pakāpē $\Delta t_{2l} = t_1 - t_{2v}$,
3. pakāpē $\Delta t_{3l} = t_2 - t_{3v}$.

Kopējā lietderīgā temperatūru starpība pa visu ietvaices iekārtu

$$\Sigma\Delta t_l = \Delta t_{1l} + \Delta t_{2l} + \Delta t_{3l}. \quad (9.19)$$

Var pārbaudīt, vai pareizi izdarīti aprēķini, nosakot kopējo lietderīgo temperatūru starpību šādi:

$$\Sigma\Delta t_l = t - t_b - (\Sigma\Delta' + \Sigma\Delta'' + \Sigma\Delta'''). \quad (9.20)$$

Aprēķinātajām $\Sigma\Delta t_l$ vērtībām jāsakrīt.

Siltuma plūsmas noteikšana. Sastādot katram ietvaicētājam siltuma bilanci un ievērojot ietvaicētā šķīdinātāja materiālo bilanci, var aprēķināt nepieciešamo siltuma plūsmu katram ietvaicētājam, primārā tvaika patēriņu un pārbaudīt ietvaicējamā šķīdinātāja masu sekundē pa ietvaicētājiem.

1. pakāpei nepieciešamā siltuma plūsma ir Φ_1 , ko iegūst, kondensējot primāro tvaiku:

$$\Phi_1 = D(h - 4,19t). \quad (9.21)$$

Siltuma plūsmu Φ_1 izlieto

1) sākuma šķiduma uzsildīšanai no sākuma temperatūras t_0 līdz viršanas temperatūrai t_{1v} , t. i., $Gc_0(t_{1v} - t_0)$;

2) šķīdinātāja G_{s1} ietvaicēšanai $G_{s1}(h_1 - 4,19t_{1v})$;
 3) šķīduma koncentrēšanai. Cietās fāzes koncentrācijas paaugstināšanai patērē noteiktu siltuma plūsmu $\Phi_{1\text{konc}}$, kas atkarīga no izšķīdinātās vielas;

4) daļu no pievadītā siltuma iekārta zaudē apkārtējā vidē konvekcijas un starošanas rezultātā. Pareizi izolētiem ietvaicētajiem siltuma zudumi ir 1...3%; pirmajos ietvaicētajos temperatūras ir augstākas, tādēļ zudumi lielāki. Aprēķinā pieņem, ka siltuma zudumi ir 3%.

Tātad 1. pakāpes siltuma bilances vienādojums ir šāds:

$$\Phi_1 = D(h - 4,19t) = 1,03[Gc_0(t_{1v} - t_0) + G_{s1}(h_1 - 4,19t_{1v}) + \Phi_{1\text{konc}}]. \quad (9.22)$$

Analogi siltuma bilances vienādojumi ir 2. un 3. pakāpei:

$$\Phi_2 = G_{s1}(h_1 - 4,19t_1) = 1,03[(G - G_{s1})c_1(t_{2v} - t_{1v}) + G_{s2}(h_2 - 4,19t_{2v}) + \Phi_{2\text{konc}}], \quad (9.23)$$

$$\Phi_3 = G_{s2}(h_2 - 4,19t_2) = 1,03[(G - G_{s1} - G_{s2})c_2(t_{3v} - t_{2v}) + G_{s3}(h_3 - 4,19t_{3v}) + \Phi_{3\text{konc}}], \quad (9.24)$$

kur c_0, c_1, c_2 — īpatnējā siltumietilpība sākuma šķīdumam un šķīdumiem 2. un 3. pakāpē, kJ/(kg·K).

Ietvaicētā šķīdinātāja materiālo bilanci izsaka vienādojums

$$G_s = G_{s1} + G_{s2} + G_{s3}. \quad (9.25)$$

Vislielākā siltuma plūsma Φ_{konc} ir pēdējā ietvaicētajā. Tādēļ koncentrēšanas siltuma plūsmu vispirms aprēķina pēdējam (trešajam) ietvaicētajam:

$$\Phi_{3\text{konc}} = G_c \Delta q = GC_1 \Delta q, \quad (9.26)$$

kur G_c — ietvaicētāja ražīgums attiecībā uz cietās vielas masu šķīdumā, kg/s; Δq — šķīšanas siltumu starpība koncentrācijām C_2 un C_3 , kJ/kg. Ja $\Phi_{3\text{konc}}$ ir mazāka par 5% no siltuma plūsmas 3. pakāpē, tad to var neievērot.

Atrisinot iepriekš minēto četru vienādojumu sistēmu, iegūst lielumus Φ_1, Φ_2, Φ_3 un $D, G_{s1}, G_{s2}, G_{s3}$. Šķīdumu un tvaiku parametrus sakopo 9.2. tabulā.

9.2. tabula

Šķīdumu un tvaiku parametri pa ietvaicētajiem

Parametri	Vienības	Ietvaicētajī		
		1.	2.	3.
Ietvaicētā šķīdinātāja masa sekundē	kg/s	G_{s1}	G_{s2}	G_{s3}
Šķīdumu koncentrācija	%	C_1	C_2	C_3
Sildošā tvaika spiediens	MPa	p	p_1	p_2
Sildošā tvaika temperatūra	°C	t	t_1	t_2
Temperatūru zudumi	°C	$\Sigma \Delta_1$	$\Sigma \Delta_2$	$\Sigma \Delta_3$
Šķīdumu viršanas temperatūra	°C	t_{1v}	t_{2v}	t_{3v}
Lietderīgā temperatūru starpība	°C	Δt_{11}	Δt_{21}	Δt_{31}

Ja aprēķinātās ietvaicētā šķīdinātāja masas G_{s1} , G_{s2} un G_{s3} neatšķiras vairāk par 5% no sākumā pieņemtā šķīdinātāja sadalījuma pa ietvaicētajiem — G'_{s} , G''_{s} , G'''_{s} , tad var uzskatīt, ka aprēķins ir apmierinošs. Ja atšķirība lielāka, tad izdara atkārtotu tuvinājuma aprēķinu, vadoties no iegūtajām ietvaicējamā šķīdinātāja masām G_{s1} , G_{s2} un G_{s3} . Tad mainīsies koncentrācijas un temperatūras. Sādu tuvinājuma aprēķinus turpina, līdz iegūst praktiski sakrītošus rezultātus (atšķirība < 5%).

Siltumpārejas koeficienta noteikšana. Siltumpārejas koeficientu k pirmajam ietvaicētajam aprēķina pēc formulas:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \Sigma \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (9.27)$$

Izteiksme $\Sigma \frac{\delta}{\lambda} = \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_1}{\lambda_1}$, kur δ , δ_1 — caurules sienas un nogulumu kārtas biezums, m; λ , λ_1 — siltumvadītspējas koeficienti sienai un nogulumu kārtai, W/(m·K). Termisko pretestību tvaika pusē neievēro. Grūtības var radīt nogulumu kārtas biezums δ_1 , kā arī siltumvadītspējas koeficienta λ_1 izvēle. Ja minēto lielumu vērtības nav zināmas, tad pieņem, ka $\delta_1 = 0,5 \dots 1,0$ mm, bet $\lambda_1 = 1,2 \dots 2,3$ W/(m × K) (sk. 290. lpp.).

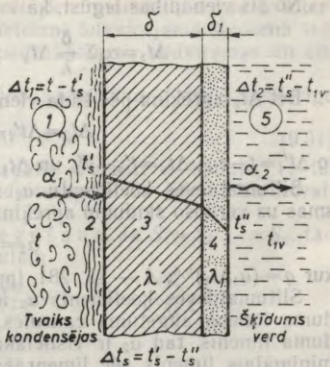
Siltumatdeves koeficients α_1 no kondensējošā tvaika puses uz cauruļu sienām aprēķināms pēc formulas (7.69):

$$\alpha_1 = 2,04 \sqrt[4]{\frac{r\rho^{2\lambda^3}}{\mu H \Delta t_1}} \quad (9.28)$$

Lieluma α_1 aprēķina pamatā ir pakāpeniskās tuvināšanas metode. Pirmajā tuvinājumā pieņem, ka Δt_1 vienāds ar a grādiem (1°, 2°, 3° utt.) un tad $\alpha_1 = 2,04 \sqrt[4]{\frac{r\rho^{2\lambda^3}}{\mu Ha}} = b$.

No 9.6. attēla redzams, ka temperatūras t un t_{1v} nemainās. Tvaikam kondensējoties, visā starpcauruļu telpā ir nemainīga temperatūra t . Otrā sienas pusē viršanas caurulēs plūst verdošs šķīdums. Arī tur var pieņemt, ka temperatūra t_{1v} praktiski ir nemainīga. Šādai stacionārai siltuma plūsmai var rakstīt:

$$q = \alpha_1 \Delta t_1 = \Delta t_s / \Sigma \frac{\delta}{\lambda} = \alpha_2 \Delta t_2 \quad (9.29)$$



9.6. att. Siltuma pāreja viršanas caurulē:

1 — tvaiks, 2 — kondensāts, 3 — viršanas caurules siena, 4 — nogulumu kārta uz caurules iekšējās virsmas, 5 — verdošs šķīdums.

No šīs vienādības iegūst, ka

$$\Delta t_s = \alpha_1 \Sigma \frac{\delta}{\lambda} \Delta t_1 \quad \text{jeb} \quad \Delta t_s = \alpha_1 \Sigma \frac{\delta}{\lambda} a.$$

Bet Δt_2 aprēķina pēc šāda vienādojuma:

$$\Delta t_2 = \Delta t'_1 - \Delta t_s - \Delta t_1, \quad (9.30)$$

jo $\Delta t'_1 = t - t_{1v}$; $\Delta t_s = t'_s - t''_s$ un $\Delta t_1 = a = t - t'_s$.

Siltumatdeves koeficientu α_2 no viršanas caurules iekšējās virsmas uz verdošo šķidumu aprēķina pēc formulas (7.68):

$$\alpha_2 = Aq^{0,6},$$

kur $q = (\alpha_1 \Delta t_1)^{0,6}$; A — sk. 281. lpp.

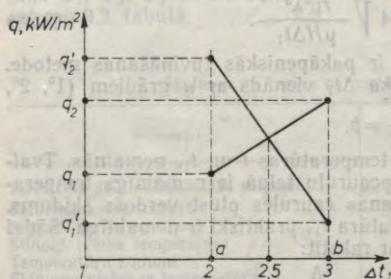
Siltumatdeves koeficients α_2 ievērojami mainās atkarībā no šķīduma līmeņa augstuma caurulēs. Ja ietvaicētājā ir optimālais šķīduma līmenis, tad α_2 ir vislielākais. Optimālais šķīduma līmenis ir minimālais līmenis pēc līmeņrāža, kurā verdošais šķīdums vēl apskalo augšējo cauruļu plati. Verdošam ūdenim un atšķaidītiem šķīdumiem optimālais šķīduma līmenis ir 20...30% no cauruļu garuma. Palielinot šķīduma koncentrāciju, optimālais līmenis pieaug līdz 60...70%. Optimālo līmeni procentos no cauruļu garuma var noteikt pēc šādas empīriskas formulas:

$$l_{opt} = 26 + 0,14(\rho_s - \rho_{ud}),$$

kur ρ_s un ρ_{ud} — ietvaicējamā šķīduma un ūdens blīvumi, kg/m^3 .

Tad salīdzina izteiksmi $q_1 = \alpha_1 \Delta t_1$ ar izteiksmi $q_2 = \alpha_2 \Delta t_2$. Ja $q_1 \neq q_2$, tad izdara atkārtotu tuvinājuma aprēķinu, mainot Δt_1 vērtību. Pieņem, ka Δt_1 vienāds ar a' , $a' > a$. Temperatūru starpība starp a un a' ir neliela, tādēļ fizikālie lielumi mainās niecīgi un α_1 otrā tuvinājumā var aprēķināt šādi: $\alpha_1 = b\sqrt{a/a'}$.

Ja arī pēc otrā tuvinājuma iegūst, ka $q'_1 \neq q'_2$, tad pirms trešā tuvinājuma aprēķina Δt_1 nosaka grafiski (9.7. att.), attēlojot $q = f(\Delta t_1)$.



9.7. att. Sakarība $q = f(\Delta t_1)$.

Trešo tuvinājumu aprēķina, pieņemot pēc 9.7. attēla, ka $\Delta t_1 = 2,5^\circ\text{C}$. Ja atšķirība starp q''_1 un q''_2 nepārsniedz 3%, tad var uzskatīt, ka koeficienti α_1 un α_2 iegūti ar pietiekamu precizitāti. Pēc α_1 un α_2 noteikšanas aprēķina k_1 .

Pēc aprakstītās metodes aprēķina siltumatdeves koeficientus 2. un 3. pakāpei un pēc tam siltumpārejas koeficientus k_2 un k_3 .

Siltumpārejas koeficients ietvaicētajiem mainās ļoti plašā intervālā (230...7000 W/(m²·K)). To ietekmē ietvaicējamā šķiduma viskozitāte, blīvums, nogulumu un oksīdu kārtā uz sildvirsmas un citi faktori.

Lietderīgās temperatūru starpības sadalīšana. Kopējo lietderīgo temperatūru starpību

$$\Sigma \Delta t_l = \Delta t'_l + \Delta t''_l + \Delta t'''_l \quad (9.31)$$

starp ietvaicētajiem var dažādi sadalīt. Parasti to sadala, 1) lai iegūtu ietvaicētājus ar vienādu sildvirsmu un 2) lai iegūtu ietvaicētājus, kuru kopējā virsma būtu minimāla.

Vienādas sildvirsmas iegūšanai. Ja $S_1 = S_2 = \dots = S_n$, tad no sildvirsmas aprēķināšanas formulām

$$S_1 = \frac{\Phi_1}{k_1 \Delta t'_l}; \quad S_2 = \frac{\Phi_2}{k_2 \Delta t''_l} \dots S_n = \frac{\Phi_n}{k_n \Delta t_l^n}$$

var rakstīt

$$\frac{\Phi_1}{k_1 \Delta t'_l} = \frac{\Phi_2}{k_2 \Delta t''_l} = \dots = \frac{\Phi_n}{k_n \Delta t_l^n}$$

No šejienes

$$\Delta t''_l = \Delta t'_l \frac{\Phi_2}{\Phi_1} \frac{k_1}{k_2},$$

$$+ \Delta t'''_l = \Delta t'_l \frac{\Phi_3}{\Phi_1} \frac{k_1}{k_3}$$

$$\dots \dots \dots \Delta t_l^n = \Delta t'_l \frac{\Phi_n}{\Phi_1} \frac{k_1}{k_n}$$

$$\frac{\Delta t''_l + \Delta t'''_l + \dots + \Delta t_l^n = \Delta t'_l \frac{\Phi_2}{\Phi_1} \frac{k_1}{k_2} + \dots + \Delta t'_l \frac{\Phi_3}{\Phi_1} \frac{k_1}{k_3} + \dots + \Delta t'_l \frac{\Phi_n}{\Phi_1} \frac{k_1}{k_n}}{\quad} \quad (9.32)$$

Vienādojuma (9.32) kreiso pusi var izteikt šādi:

$$\Delta t''_l + \Delta t'''_l + \dots + \Delta t_l^n = \sum_1^n \Delta t_l - \Delta t'_l$$

Tādēļ var rakstīt, ka

$$\sum_1^n \Delta t_l = \Delta t'_l \left(1 + \frac{\Phi_2 k_1}{\Phi_1 k_2} + \dots + \frac{\Phi_n k_1}{\Phi_1 k_n} \right) \text{ jeb}$$

$$\Delta t'_l = \frac{\sum_1^n \Delta t_l}{1 + \frac{\Phi_2}{\Phi_1} \frac{k_1}{k_2} + \dots + \frac{\Phi_n}{\Phi_1} \frac{k_1}{k_n}} \quad (9.33)$$

Pareizinot un izdalot vienādojuma (9.33) labo pusi ar $\frac{\Phi_1}{k_1}$, iegūst

$$\Delta t'_l = \frac{\sum_1^n \Delta t_l \frac{\Phi_1}{k_l}}{\frac{\Phi_1}{k_1} + \frac{\Phi_2}{k_2} + \dots + \frac{\Phi_n}{k_n}} \quad (9.34)$$

Zinot $\Delta t'_l$ vērtību, pēc formulas

$$\Delta t_l^n = \Delta t'_l \frac{\Phi_n k_1}{\Phi_1 k_n} \quad (9.35)$$

nosaka lietderīgo temperatūru starpību pārējos ietvaicētajos.

Minimālās sildvirsmas iegūšana. Minimālo kopējo sildvirsmu nosaka kā funkcijas $S_n = f(\Delta t_l^n)$ minimumu, t. i.,

$$\frac{dS_n}{d(\Delta t_l^n)} = 0.$$

Ietvaicētajiem kopējo sildvirsmu var izteikt šādi:

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_n \quad \text{jeb}$$

$$S = \frac{\Phi_1}{k_1 \Delta t'_l} + \frac{\Phi_2}{k_2 \Delta t''_l} + \dots + \frac{\Phi_n}{k_n \Delta t_l^n}$$

Diferencējot sildvirsmas vienādojumu un atvasinājumu pielīdzinot nullei, iegūst

$$\frac{dS}{d(\Delta t_l^n)^2} = \frac{\Phi_1}{k_1 (\Delta t'_l)^2} = \frac{\Phi_2}{k_2 (\Delta t''_l)^2} = \dots = \frac{\Phi_n}{k_n (\Delta t_l^n)^2} = 0.$$

Var rakstīt, ka

$$\frac{\Phi_1}{k_1 (\Delta t'_l)^2} = \frac{\Phi_2}{k_2 (\Delta t''_l)^2} \quad \text{un} \quad \frac{\Phi_1}{k_1 (\Delta t'_l)^2} = \frac{\Phi_n}{k_n (\Delta t_l^n)^2}.$$

Rīkojoties tāpat kā iepriekš, kad aplūkojam ietvaicētajus ar viēnādu sildvirsmu, iegūst

$$\Delta t'_l = \frac{\sum \Delta t_l \sqrt{\frac{\Phi_1}{k_l}}}{\sqrt{\frac{\Phi_1}{k_1}} + \sqrt{\frac{\Phi_2}{k_2}} + \dots + \sqrt{\frac{\Phi_n}{k_n}}}, \quad (9.36)$$

$$\Delta t_l^n = \Delta t'_l \sqrt{\frac{\Phi_n}{\Phi_1} \frac{k_1}{k_n}} \quad (9.37)$$

Pirmajam lietderīgās temperatūru starpības sadalīšanas variantam ir tā priekšrocība, ka, izvēloties vienādus ietvaicētājus, tie vieglāk apkalpojami, izgatavojami un remontējami, bez tam atsevišķas rezerves daļas lietojamas jebkuram ietvaicētājam. Izmantojot otro variantu, var izvēlēties ietvaicētājus ar minimālo sildvirsmu, tā ietaupot metālu ietvaicētāju izgatavošanai.

Tālāk aprēķinos pieņemot variantu $S_1 = S_2 = S_3$, lietderīgās temperatūru starpības sadalījumu pa ietvaicētājiem iegūst pēc formulām (9.34) un (9.35). Lielumi $\Delta t'_l$, $\Delta t''_l$ un $\Delta t'''_l$ parasti nesakrīt ar iepriekš aprēķinātajām vērtībām Δt_{1l} , Δt_{2l} , Δt_{3l} (sk. 9.2. tab.).

Pārbauda kopējo lietderīgo temperatūru starpību

$$\Sigma \Delta t_l = \Delta t'_l + \Delta t''_l + \Delta t'''_l.$$

Iegūtajai $\Sigma \Delta t_l$ vērtībai jāsakrīt ar formulās (9.34) un (9.35) lietoto $\Sigma \Delta t_l$ vērtību un iepriekš aprēķināto vienādojumu (9.19)).

Nepieciešamās ietvaicētāju sildvirsmas

$$S_1 = \frac{\Phi_1}{k_1 \Delta t'_l}; \quad S_2 = \frac{\Phi_2}{k_2 \Delta t''_l}; \quad S_3 = \frac{\Phi_3}{k_3 \Delta t'''_l}. \quad (9.38)$$

Ja iegūtās ietvaicētāju sildvirsmas maz atšķiras no aprēķina sākumā iegūtās orientējošās sildvirsmas S_{or} vērtības, tad ietvaicētāja konstruktīvo izmēru (viršanas cauruļu augstumu, diametru, sienu biezumu) korekcijas nav jāizdara.

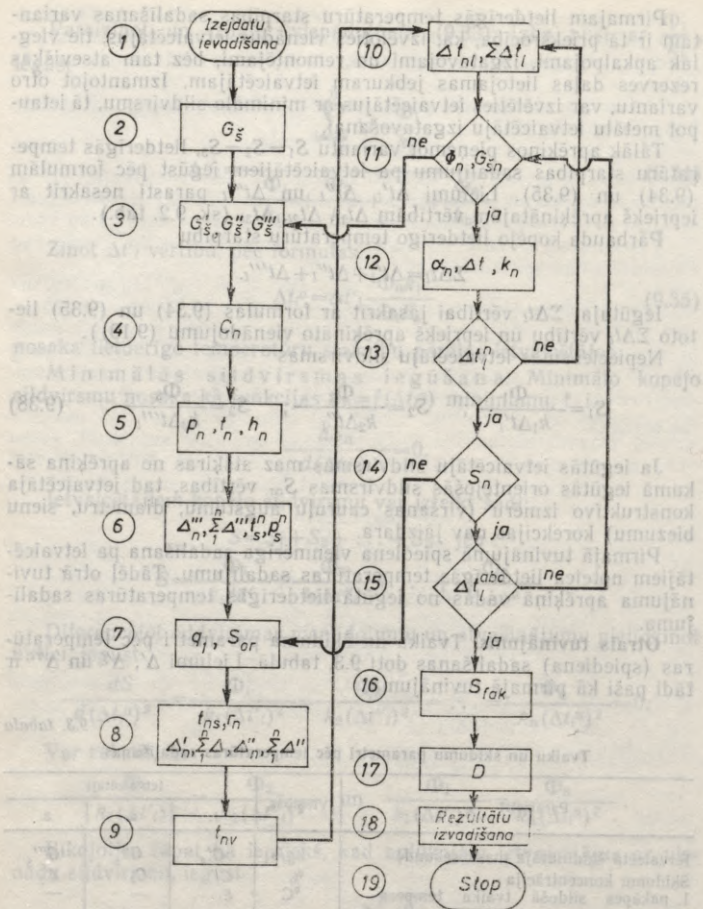
Pirmajā tuvinājumā spiediena vienmērīga sadalīšana pa ietvaicētājiem noteica lietderīgās temperatūras sadalījumu. Tādēļ otrā tuvinājuma aprēķinā vadās no iegūtā lietderīgās temperatūras sadalījuma.

Otrais tuvinājums. Tvaika un šķiduma parametri pēc temperatūras (spiediena) sadalīšanas doti 9.3. tabulā. Lielumi Δ' , Δ'' un Δ''' ir tādi paši kā pirmajā tuvinājumā.

9.3. tabula

Tvaiku un šķidumu parametri pēc temperatūras sadalīšanas

Parametri	Vienības	Ietvaicētāji		
		1.	2.	3.
Ietvaicētā šķīdinātāja masa sekundē	kg/s	G'_s	G''_s	G'''_s
Šķidumu koncentrācija	%	C_1	C_2	C_3
I. pakāpes sildošā tvaika temperatūra t_t	°C	t	—	—
Lietderīgā temperatūru starpība Δt_l	°C	$\Delta t'_l$	$\Delta t''_l$	$\Delta t'''_l$
Šķidumu viršanas temperatūra $t_v = t_t - \Delta t$	°C	t'_{1v}	t'_{2v}	t'_{3v}
Sekundārā tvaika temperatūra $t_s = t_v - (\Delta' + \Delta'')$	°C	t^a_s	t^b_s	t^c_s
Sekundārā tvaika spiediens p_s	MPa	p^a_s	p^b_s	p^c_s
Sildošā tvaika temperatūra $t_{s1} = t_s - \Delta'''$	°C	—	t^a_1	t^a_2



9.8. att. Blokhēma vairāpkāpju ietvaicējamu aprēķiniem ar ESM.

Pēc pirmajā tuvinājumā aplūkotās metodikas aprēķina siltuma plūsmas Φ , siltumpārejas koeficientus k , lietderīgās temperatūru starpības pa ietvaicētajiem (Δt^a , Δt^b un Δt^c). Iegūtās lietderīgās temperatūru starpības pa ietvaicētajiem salīdzina ar 9.3. tabulas datiem — Δt^i , $\Delta t''$ un $\Delta t'''$. Ja starpība mazāka par 5%, tad var uz-

skatīt, ka iegūti apmierinoši rezultāti, un aprēķināt faktiski nepieciešamās ietvaicētāju sildvirsmas pēc formulas $S_{\text{fak}} = \Phi / (k\Delta t)$. Ja starpība lielāka par 5%, tad, vadoties no Δt^a , Δt^b un Δt^c , sastāda tabulu, kas analogiska 9.3. tabulai, un atkārtu trešā tuvinājuma aprēķinu. Tā turpina, līdz iegūst vajadzīgo precizitāti (5%).

Izmantojot vienādojumu $\Phi_1 = D(h - 4,19t)$, pēc pēdējā tuvinājuma aprēķina precizē primārā tvaika patēriņu.

Vairākpakāpju ietvaices iekārtu aprēķinu izdevīgi veikt ar elektroniskajām skaitļošanas mašīnām (datoriem) (ESM).

9.8. attēlā dota vairākpakāpju ietvaices iekārtas blokshēma, kura ļauj sastādīt programmu aprēķiniem ar ESM un kura sastādīta iepriekš aprakstītajam analītiskajam vairākpakāpju ietvaices iekārtas aprēķinam, lietojot pakāpeniskās tuvināšanas metodi.

1. bloks. Ievada izejas datus (G , C_0 , C_3 , p , p_b u. c.), šķīduma un primārā tvaika parametrus (λ , c_0 , r , h u. c.).

2. bloks. Aprēķina kopējo ietvaicējamo šķīdinātāja masu sekundē G_s pēc vienādojuma (9.4).

3. bloks. Aprēķina ietvaicējamā šķīdinātāja masu sekundē pa pakāpēm pēc vienādojumiem (9.5) un (9.6). Attiecība $G'_s : G''_s : G'''_s = 1 : 1,1 : 1,23$ tālākā aprēķinu gaitā vēl tiks precizēta, tādēļ jāsastāda arī risinājuma apakšprogramma.

4. bloks. Aprēķina šķīdumu beigu koncentrācijas ietvaicētajos pēc vienādojumiem (9.7) un (9.8).

5. bloks. Pieņem, ka starp ietvaicētajiem ir vienāda spiedienu starpība Δp , ko aprēķina pēc vienādojuma (9.9.). Zinot sildošā tvaika spiedienus ietvaicētajos, iegūst temperatūras $t = f(p)$ un entalpijas $h = f(p)$, kuras var ierakstīt skaitļošanas mašīnas atmiņā vai arī ievadīt 5. blokā kā funkcionālas sakarības.

6. bloks. Nosaka temperatūras zudumus hidrodinamiskā efekta rezultātā pa ietvaicētajiem Δ''_n un kopējos zudumus $\sum_1^n \Delta'''$ pēc vienādojuma (9.11). No sakarības $t = f(p)$ pēc sekundārā tvaika temperatūrām iegūst p_s^n .

7. bloks. Lai noteiktu temperatūras zudumus hidrostatiskā efekta rezultātā, aprēķina ietvaicētāja orientējošo sildvirsmu S_{or} (sk. vienādojumu (9.12)), iepriekš pieņemot siltuma plūsmas blīvumu 1. pakāpē un pēc $t = f(p)$ (ESM atmiņā) iegūst šķīdinātāja iztvaikošanas siltumu r_n spiedienā p'_s . No ESM atmiņā ierakstītajam ražoto ietvaicētāju normām pēc S_{or} izvēlas piemērotāko ietvaicētāju un tā parametrus (H , d_{leks} , d_{ar} u. c.) ieraksta ESM atmiņā.

8. bloks. Aprēķina spiedienu verdošā šķīduma slāņa vidū (sk. formulu (9.13)) un no ESM atmiņā ierakstītās $t = f(p)$ iegūst temperatūras t_{ns} un iztvaikošanas siltumus r_n attiecīgajos ietvaicētajos. Pēc formulas (9.14) aprēķina temperatūras depresijas Δ'_n un $\sum_1^n \Delta'$.

formulas 9.3 aprēķina temperatūras depresijas Δ''_n un $\sum_1^n \Delta''_n$.

9. bloks. Šķīdumu viršanas temperatūras ietvaicētajos iegūst pēc vienādojuma (9.17).

10. bloks. Aprēķina lietderīgās temperatūru starpības pa ietvaicētajiem (vienādojums (9.18)) un pēc vienādojuma (9.19) iegūst kopējo lietderīgo temperatūru starpību $\Sigma \Delta t_l$.

11. bloks. Aprēķina siltuma plūsmu Φ_n pa ietvaicētajiem. No vienādojumu sistēmas (9.22), (9.23), (9.24) un (9.25) vienlaikus iegūst arī G_{s1} , G_{s2} un G_{s3} vērtības. Salīdzina iegūtās ietvaicētā šķīdinātāja masas sekundē pa ietvaicētajiem G_{s1} , G_{s2} un G_{s3} ar 3. blokā iegūtajām G'_{s1} , G'_{s2} , G'_{s3} vērtībām. Ja rezultātu atšķirība mazāka par 5%, tad aprēķinu var uzskatīt par apmierinošu, ja atšķirība lielāka, tad jāatkārto aprēķini, līdz iegūst rezultātu, kur atšķirība mazāka par 5%.

12. bloks. Aprēķina siltumpārejas koeficientus pēc vienādojuma (9.27). Vispirms aprēķina siltumatdeves koeficientus tvaika pusē pēc vienādojuma (9.28), bet šķīduma pusē — pēc vienādojuma (9.31). Lai aprēķinātu temperatūru starpību starp vīdi un virsmu Δt , jāsaista atsevišķa apakšprogramma.

13. bloks. Lietderīgās temperatūru starpības sadalīšana pa ietvaicētajiem. Visbiežāk lietderīgo temperatūru sadala,

1) lai iegūtu vienādu sildvirsmu $S_1 = S_2 = S_3$, tad

$$\Delta t_l = \Sigma \Delta t_l \frac{\Phi_1/k_1}{\sum_1^n \frac{\Phi}{k}} \quad \text{un} \quad \Delta t_l^{n-1} = \Sigma \Delta t_l \frac{\Phi_{n-1}}{\Phi_1} \frac{k_1}{k_{n-1}};$$

2) lai iegūtu summāro minimālo virsmu $\sum_1^n S_{\min}$, tad lietojamas formulas (9.36) un (9.37).

Pa ietvaicētajiem iegūto lietderīgo temperatūru starpību summai jābūt vienādai ar 10. blokā aprēķināto kopējo lietderīgo temperatūru starpību (Δt_{nl} var atšķirties no Δt_l^n).

14. bloks. Aprēķina ietvaicētāju sildvirsmas pēc vienādojumiem (9.38). Ja iegūtās sildvirsmas maz atšķiras no 7. blokā aprēķinātās sildvirsmas S_{or} , tad konstruktīvo izmēru (H un δ) pārrēķini nav jāizdara. Pretējā gadījumā jāatkārto 7. bloka aprēķini, izmantojot 14. blokā iegūto sildvirsmas vērtību.

15. bloks. Pēc 13. bloka iegūtās lietderīgās temperatūru starpības, sākot no 11. bloka (nemaina temperatūru zudumus), aprēķina Φ_{in} , G_{sin} , k_{in} un iegūst jaunas lietderīgās temperatūru starpības (Δt_l^a , Δt_l^b , Δt_l^c). Ja tās no iepriekšējām temperatūru starpībām (13. bloks) atšķiras mazāk par 5%, tad var uzskatīt, ka iegūti apmierinoši rezultāti. Ja atšķirība lielāka par 5%, tad, lietojot jaunās lietderīgās temperatūru starpības (Δt_l^a , Δt_l^b , Δt_l^c), atkārto 11. bloka aprēķinus. Aprēķinus atkārto, līdz panāk pieļaujamo atšķirību.

16. bloks. Ietvaicētāju faktiskās sildvirsmas aprēķinu veic pēc vienādojuma (9.38).

17. bloks. Pēc vienādojuma (9.21) aprēķina primārā tvaika patēriņu.

18. bloks. Aprēķinu rezultātus pēc vajadzības mašina dod izdrukās veidā vai uz displeja. Starpaprēķinu rezultātus var saņemt no jebkura bloka.

Vairākpakāpju ietvaices iekārtas optimālā pakāpju skaita noteikšana. Ekonomiskā ziņā optimālais ietvaicētāju skaits n ietvaices iekārtā atbilst minimālajiem izdevumiem.

Ekvivalentie izdevumi aprēķināmi pēc formulas:

$$\Pi = I/T_n + E, \quad (9.39)$$

kur I — izdevumi iekārtas iegādei; T_n — normatīvais atmaksāšanās laiks, ķīmiskajā rūpniecībā 3...5 gadi; E — ekspluatācijas izdevumi.

Izdevumi iekārtas iegādei I veidojas no šādām izmaksām: par visiem ietvaicētājiem — nI_{iet} , priekšsildītāju — I_1 , šķīduma padeves sūkni — I_2 , barometrisko kondensatoru — I_3 , vakuumsūkni — I_4 , armatūru, caurulēm, kondensāta novadītāju, kontrolmēriekārtu — I_5 , iekārtas transportu, montāžu, pamatu un platformu izgatavošanu — I_6 :

$$I = nI_{\text{iet}} + \sum_1^6 I_i$$

Palielinot ietvaicētāju skaitu n , pieaug izdevumi par ietvaicētājiem, samazinās lietderīgā temperatūra starpība un līdz ar to ietvaices intensitāte. Pieaug priekšsildītāja un sūkņa izmaksas, jo pieaug spiediens pirmajā ietvaicētājā. Pazeminās barometriskā kondensatora un vakuumsūkņa izmaksas, jo samazinās sekundārā tvaika patēriņš pēdējā pakāpē. Pieaug izdevumi par armatūru, caurulēm, kontrolmēriekārtām, palīgiekārtām, transportu un montāžu. Vairākpakāpju ietvaices iekārtās $\sum_1^6 I_i$ ir 60...80% no ietvaicētāju izmaksām,

$$\text{vidēji } \sum_1^6 I_i = 0,7nI_{\text{iet}}.$$

Ekspluatācijas izdevumi E ietver amortizācijas atskaitījumus E_a un remontizdevumus E_r , ko izsaka kā daļu no izdevumiem par iekārtas iegādi, un izdevumus par tvaiku un elektroenerģiju:

$$E = (E_a + E_r)I + [(D_{\text{izt}} + D_{\text{sil}})I_D + (N_s + N_{vs})I_N]\tau,$$

kur $E_a = 0,1$; $E_r = 0,05$ (10 un 5% no izdevumiem par iekārtas iegādi); D_{izt} , D_{sil} — primārā tvaika patēriņš ietvaicētājā un sildošā tvaika patēriņš priekšsildītājā, kg/h; I_D — tvaika izmaksa, pieņem, ka $I_D = 3$ rubl./t; N_s , N_{vs} — sūkņu un vakuumsūkņa jaudas patēriņi, kW·h. Jaudas patēriņš brīvas cirkulācijas ietvaicētājos ir niecīgs, tādēļ to var neievērot; I_N — jaudas izmaksa, kW·h; $\tau = 8000$ h/gadā (nepārrauktas darbības iekārtas darba laiks gadā izteikts stundās).

Palielinot ietvaicētāju skaitu n , ekonomiju iegūst tikai uz sildošā tvaika rēķina. Ievērojot iepriekš minēto, formula (9.39) pārveidojama šādi:

$$\Pi = I \left(\frac{1}{T_n} + E_a + E_r \right) + (D_{\text{izt}} + D_{\text{sil}}) I D \tau,$$

Ja $T_n = 5$ gadi, tad $\frac{1}{T_n} + E_a + E_r = \frac{1}{5} + 0,1 + 0,05 = 0,35$. $D_{\text{izt}} + D_{\text{sil}} = D$ kilogrami sekundē vai $\frac{3600D}{1000} = 3,6D$ tonnas stundā.

$$\Pi = 0,35I + 3,6D \cdot 3 \cdot 8000 \quad \text{vai} \quad \Pi = 0,35(nI_{\text{iet}} + 0,7nI_{\text{iet}}) + 8,64 \cdot 10^4 D \quad \text{jeb} \quad \Pi = 5,95 \cdot 10^{-1} n I_{\text{iet}} + 8,64 \cdot 10^4 D, \quad (9.40)$$

kur Π izteikts rubļos gadā.

No vienādojuma (9.40) secināms, ka ekonomiskā ziņā optimālo variantu vairākpakāpju ietvaices iekārtās līdz ar n nosaka ietvaicētāja cena un tvaika patēriņš. Pēc literatūras datiem [2.—95], vairākpakāpju ietvaices iekārtu tehniski ekonomiskie aprēķini ar elektronisko skaitļošanas mašīnu KOH šķīdumam doti 9.4. tabulā.

9.4. tabula

Vairākpakāpju ietvaices tehniski ekonomiskie rādītāji

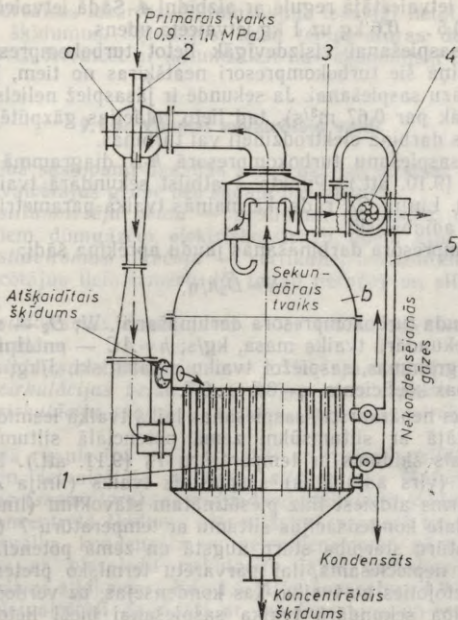
Parametri	Vienības	Ietvaicētāju skaits n					
		3	4	5	6	7	8
Nominālā sildvirsmā	m ²	125	200	200	200	200	250
Minimālā lietderīgā temperatūru starpība	°C	25,3	16,8	11,8	8,6	6,5	5,0
Ietvaicētāja cena	$\cdot 10^{-3}$ rbļ	13,8	20,44	20,44	20,44	20,44	27,4
Sildošā tvaika patēriņš D	kg/s	6,25	5,49	5,02	4,72	4,49	4,27
$\Pi \cdot 10^{-3}$	rbļ/gadā	564,7	523,6	494,6	480,0	473,0	503,0

No 9.4. tabulā dotajiem variantiem redzams, ka ekonomiskā ziņā izdevīgāka ir 7 pakāpju ietvaices iekārta. Salīdzinājumā ar 3 pakāpju iekārtu ekonomija ir $564,7 - 473 = 91,7$ tūkst. rubļu gadā.

9.1.4. Ietvaices iekārta ar siltumsūkni¹

Vairākpakāpju ietvaices iekārtas, kas tvaika patēriņa ziņā ir ekonomiskas, nav piemērotas termiski neizturīgu šķīdumu ietvaicei (augsts spiediens pirmajos ietvaicētajos). Bez tam vairākpakāpju iekārtas izmaksā dārgi. Tādēļ dažreiz izdevīgāk lietot vienpakāpes ietvaices iekārtu ar siltumsūkni, kas saspiež sekundāro tvaiku un paaugstina tā temperatūru. Sekundārā tvaika saspiešanai lieto *inžektorus un kompresorus*.

¹ Siltumsūkni dažreiz sauc arī par *siltumtransformatoru* vai *termokompresoru*.



9.9. att. Vakuumietvaicētājs ar siltumsūkni.

Inžektoros sekundāro tvaiku saspiež ar augstāka spiediena tvaiku. Tiem ir vienkārša konstrukcija (nav kustošu daļu). Kompresoros sekundāro tvaiku saspiež, izmantojot elektrisko enerģiju. Enerģijas patēriņš ir gandrīz proporcionāls tvaika temperatūru starpībai pirms un pēc saspiešanas. Siltumsūkņus ķīmiskajā rūpniecībā lieto ietvaicēšanas, pārtvaicēšanas un žāvēšanas iekārtās.

Ietvaicētājs ar siltumsūkni parādīts 9.9. attēlā. Vakuumietvaicēšanas aparāts sastāv no inžektora *a* un ietvaicētāja *b*, kurā ir vertikālas sildīšanas caurules un ekscentriski ievietota cirkulācijas caurule *1*. Kad ietvaicētājā sasniegts $(8,7 \dots 9,1) \cdot 10^{-2}$ MPa (650...680 mm Hg) liels retinājums, inžektorā pa cauruli *2* ievada tvaiku ar 0,9... 1,1 MPa spiedienu. Inžektors nosūc sekundāro tvaiku un to saspiež. Pēc tam tvaiks aizplūst uz sildīšanas kameru.

Atšķaidīto šķīdumu ietvaicētājā ievadā nepārtraukti tā, lai visu laiku uzturētu konstantu līmeni. Daļa sekundārā tvaika, ko nenesuc inžektors, aizplūst pa cauruli *3* uz kondensatoru. No sildīšanas kameras pa cauruli *5* periodiski nopūš nekondensējamās gāzes.

Retinājumu ietvaicētājā regulē ar aizbīdni 4. Šādā ietvaicētājā tvaika patēriņš ir 0,5...0,6 kg uz 1 kg ietvaicētā ūdens.

Tvaika saspiešanai visizdevīgāk lietot turbokompresorus. Konstruktijas ziņā šie turbokompresori neatšķiras no tiem, kādus lieto gaisa vai gāzu saspiešanai. Ja sekundē ir jāsaspiež neliels tvaika tilpums (mazāk par 0,67 m³/s), tad lieto rotācijas gāzpūtējus. Turbo-kompresorus darbina elektrodzinēji vai turbīnas.

Tvaika saspiešanu turbokompresorā *h-S* diagrammā attēlo politropa *AB* (9.10. att.). Punkts *A* atbilst sekundārā tvaika sākuma parametram. Līnija *CA* rāda, kā mainās tvaika parametri, ja saspiešana notiek adiabātiski.

Turbokompresora darbināšanas jaudu aprēķina šādi:

$$N = D_2 h / \eta,$$

kur *N* — jauda turbokompresora darbināšanai, *W*; *D*₂ — sekundē saspiežamā sekundārā tvaika masa, kg/s; *h* = *AC* — entalpiju starpība pēc *h-S* diagrammas, saspiežot tvaiku adiabātiski, J/kg; η — iekārtas lietderības koeficients, $\eta = 0,5 \dots 0,7$.

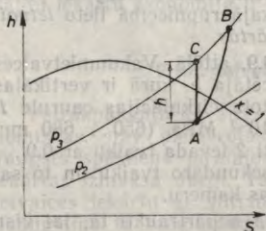
Lai tvaiks nepārkarstu, saspiešanas laikā tvaikā iesmidzina ūdeni.

Ietvaicētājā ar siltumsūkni zemā potenciālā siltuma avots ir ietvaicējamais šķidrums ar temperatūru *T*₀ (9.11. att.). Kompresorā politropiski (virs adiabātas) saspieštais tvaiks (līnija *AB*) ietvaicētājā vispirms atdziest līdz piesātinātam stāvoklim (līnija *BD*) un pēc tam izdala kondensācijas siltumu ar temperatūru *T* (līnija *DE*).

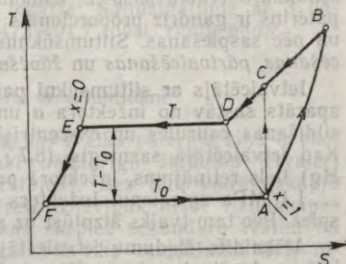
Temperatūru starpība starp augstā un zemā potenciāla siltuma avotu *T-T*₀ nepieciešama, lai pārvarētu termisko pretestību, siltumam pārvietojoties no tvaika, kas kondensējas, uz verdošo šķidrumu.

Rūpniecībā sekundārā tvaika saspiešanai bieži lieto inžektoru. Jāatzīmē, ka inžektora darbība atkarīga no pareizas sprauslas ievietošanas sūcējkamerā. Sprauslai jābūt tieši centrā un noteiktā attālumā no saplūdes kameras.

Ietvaicēšanu ar siltumsūkni lieto ķīmiskajā rūpniecībā un pārtikas rūpniecībā. Šis iekārtas siltumu izmanto ekonomiskāk nekā 7 un



9.10. att. Turbokompresora siltuma shēma *h-S* diagrammā.



9.11. att. Siltumsūkņa cikla shēma *T-S* diagrammā.

8 pakāpju ietvaices iekārtas. Siltumsūkņus izdevīgi lietot, ja ietvaicē atšķaidītus šķīdumus. Šķīdumus, kuru temperatūras depresija lielāka par 10°C , ietvaicēt ar siltumsūkni nav ekonomiski izdevīgi.

9.1.5. Virsmas ietvaicētāju veidi

Rūpniecībā sastopami dažādas konstrukcijas virsmas ietvaicētāji. Virsmas ietvaicētājus grupē pēc šādām pazīmēm:

- 1) *pēc siltumnesēja veida* — apsildāmi ar tvaiku, organiskiem siltumnesējiem, dūmgāzēm, elektrisko strāvu, ūdeni, eļļu u. c.;
- 2) *pēc sildvirsmas stāvokļa* — vertikālie, horizontālie (horizontālos ietvaicētājus lielo izmēru dēļ tagad neražo) un slīpie virsmas ietvaicētāji;
- 3) *pēc sildvirsmas izveidojuma* — ar tvaika apvalku, ar glodeņiem, ar caurulēm;
- 4) *pēc sildvirsmas izvietojuma* — ar iekšēju un ārēju sildkameru;
- 5) *pēc cirkulācijas veida* — ar brīvu un piespiedu cirkulāciju;
- 6) *pēc cirkulāciju skaita* — ar vienreizēju un vairākkārtēju cirkulāciju.

Ķīmiskajā rūpniecībā plaši izplatīti ar tvaiku apsildāmie ietvaicētāji. Ikviens ietvaicētājs sastāv no *sildkameras* (*kālorizatora*) un *tvaika telpas* (*separatora*), cauruļvadiem atšķaidītā šķīduma pievadīšanai un koncentrētā šķīduma aizvadīšanai, primārā tvaika pievada, sekundārā tvaika, kondensāta un nekondensējamo gāzu aizvadiem. Ietvaicētājos ar piespiedu cirkulāciju jābūt *cirkulācijas sūkņim*. Tvaika spiediens sildkamerā līdz $1,6\text{ MPa}$, separatorā $1,0 \dots 1,6\text{ MPa}$.

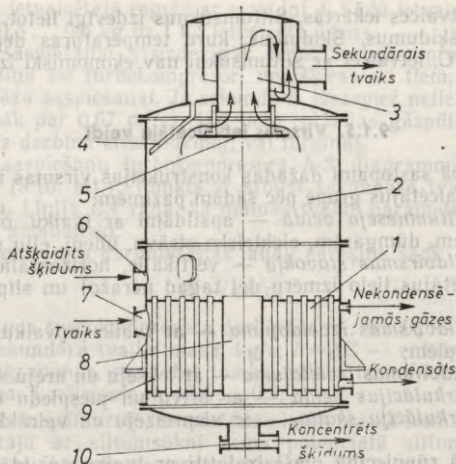
Vakuumietvaicētāji apgādāti ar kondensatoru un vakuumsūkni. Ja ietvaices laikā rodas kristāli, tad vajadzīgi kristālu atdalītāji vai filtri.

Atkarībā no ietvaicējamā šķīduma īpašībām ietvaicētājus izgatavo no dažādiem materiāliem, piemēram, ja ietvaicē sērskābi, lieto svina oderējumu, ja ietvaicē slāpekļskābi, tad lieto nerūsējošo tēraudu, ja etiķskābi, tad varu, ja sālsskābi, tad keramiku. Sildvirsmu veido arī no grafitā, kam ir augsts siltumvadītspējas koeficients ($87 \dots 116\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) un laba ķīmiskā un mehāniskā izturība.

Ietvaicētāji ar brīvu cirkulāciju darbojas efektīvi, ja temperatūru starpība (starp sildošo tvaiku un verdošo šķīdumu) lielāka par $10 \dots 12^{\circ}\text{C}$.

Kālorizatori ar profilētām caurulēm ievērojami paaugstina siltumpārejas koeficientu (ir mazāka sildvirsmas, ietaupa metālu). Sildvirsmas ietvaicējamā šķīduma pusē var būt gluda, pulēta, raupja, viļņota, ribota. Koloīdiem šķīdumiem uz sildvirsmas nerodas nogulumi, ja lieto pulētu virsmu. Ietvaicētāja darbības intensificēšanai pēdējā laikā izmanto viļņotas caurules.

Šķīdumus, kas neveido katlakmeni un ir ar nelielu viskozitāti (līdz $1\cdot 10^{-2}\text{ Pa}\cdot\text{s}$), ietvaicē vertikālos ietvaicētājos brīvā vai piespiedu cirkulācijā, var lietot arī ietvaicētājus ar kritošu šķīduma slāni.



9.12. att. Vertikālais ietvaicētājs ar īsām sildīšanas caurulēm.

Ķīmiskajai rūpniecībai ražotajām ietvaices iekārtām sildvirsmā ir 10... 3150 m², augstums 11... 26 m, masa līdz 65 t.

Ietvaicētājs (9.12. att.) sastāv no cauruļveida sildkambars 1, tvaika telpas (separatora) 2 un tvaika susinātāja 3. Pa vadu 7 ieplūst tvaiks. Atšķaidīto šķidumu ievada virs sildkambars pa ievadu 6, koncentrēto šķidumu izvada apakšā pa izvadu 10. Sekundārais tvaiks no tvaika telpas plūst gar atsitienu vairogu 5 un caur susinātāju izplūst no ietvaicētāja. Šķidumu, kas sakrājas susinātājā, ar cauruli 4 novada atpakaļ ietvaicētājā.

Ietvaicētājam ir lidlūka, skatlūkas, manometri, drošības vārsti, termometri, līmeņprādītāji un paraugu noņemšanas krāni.

Ietvaicētāju sildkambars centrā ievietota *cirkulācijas caurule* 8, kurā atrodas liels šķiduma tilpums uz nelielu sildvirsmu, turpretī *viršanas caurulēs* 9 ir mazs šķiduma tilpums uz lielu sildvirsmu. Tādēļ viršanas caurulēs notiek ļoti intensīva iztvaikošana, rodas tvaika un šķiduma maisījums, kura blīvums ir ievērojami mazāks nekā lēni verdošā šķiduma blīvums cirkulācijas caurulē. Bez tam viršanas caurulēs radušies sekundārā tvaika burbuļi, ceļoties uz augšu, rauj sev līdzī šķidumu. Pa cirkulācijas cauruli šķidums plūst uz leju, bet pa viršanas caurulēm ceļas uz augšu, līdz ar to šķidums daudzkārt (20... 30 reizes) cirkulē pa caurulēm.

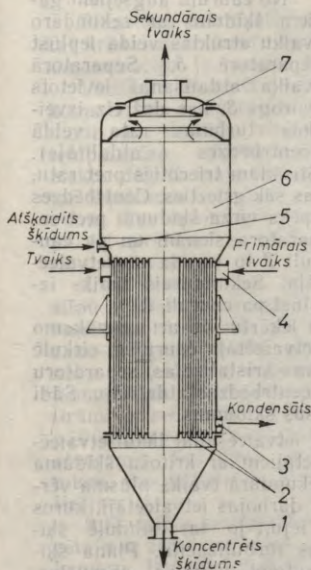
Šķidumam cirkulējot, palielinās tā ātrums. Tas veicina siltum-pāreju un novērš nogulumu kārtas rašanos uz sildvirsmas. Liela ražīguma ietvaicētājos ievieto vairākas cirkulācijas caurules.

9.13. attēlā parādīts ietvaicētājs ar pagarinātām vertikālām caurulēm 2. Primāro tvaiku ievada sildkamerā no augšas 4, bet pa noplūdes cauruli 3 aizvada kondensātu. Virs caurulēm atrodas tvaika telpa 6, kurā no sekundārā tvaika izdalās līdzrautie šķīduma pilieni. Tvaika telpas augšējā daļā ievietots atsietiena vairogs 7. Atšķaidīto šķīdumu pa cauruli 5 ievada aparātā virs sildkammeras, bet koncentrēto šķīdumu izvada pa aparāta apakšu 1. Šādus ietvaicētājus izgatavo no parastā tērauda un speciālā tērauda. Tajos ietvaicē šķīdumus ar vai bez kristālu izdalīšanas.

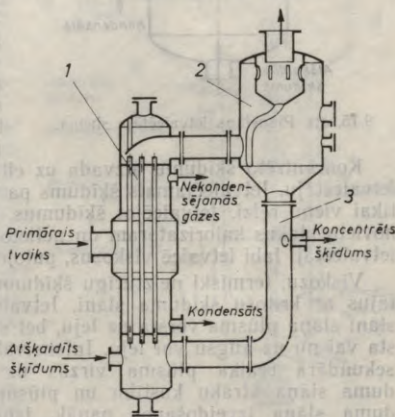
Šķīduma ātruma palielināšanai caurulēs konstruēti ietvaicētāji ar ārēju cirkulācijas cauruli un ārēju sildkameru.

Ietvaicētājs ar ārējo sildkameru (9.14. att.) sastāv no sildkammeras 1 un separatora 2. Ietvaicētāji ar šādu konstrukciju ir ļoti dažādas konstrukcijas. Tajos var ietvaicēt šķīdumus, kas putu un veido nogulumus uz sildvirsmas. To sildvirsmas ērti tīrāmas. Lai iegūtu lielāku šķīduma cirkulācijas ātrumu, sildkameru novieto pēc iespējas tuvāk separatoram. Ārējā cirkulācijas caurule 3 nodrošina intensīvu šķīduma cirkulāciju, jo ir liela temperatūru starpība starp šķīdumu sildkamerā un cirkulācijas caurulē. Tādēļ ietvaicējamais šķīdums var sasniegt ātrumu līdz 1,5 m/s. Tā novērš nogulumu kārtas veidošanos uz sildvirsmas. Šāda veida ietvaicētāji ar piespiedu cirkulāciju ieteicami šķīdumiem, kuri viegli kristalizējas un kuru viskozitāte ir līdz $50 \cdot 10^{-3}$ Pa·s.

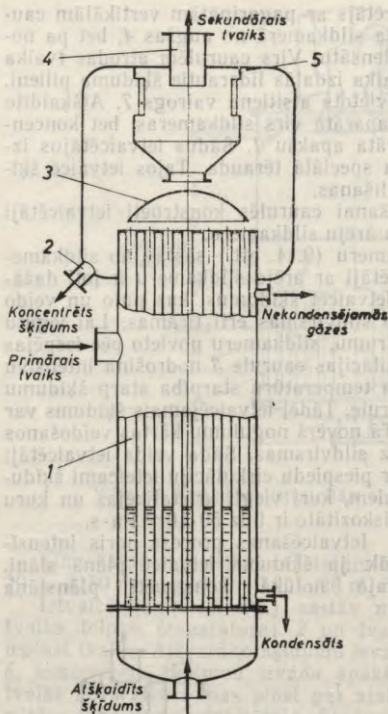
Ietvaicēšanas process noris intensīvāk, ja šķīdumu ietvaicē plānā slānī. Šajā nolūkā konstruēti plānslāņa



9.13. att. Vertikālais ietvaicētājs ar centrālo cirkulācijas cauruli.



9.14. att. Ietvaicētājs ar ārējo sildkameru.



9.15. att. Plānslāņa ietvaicētāja shēma.

Koncentrēto šķīdumu aizvada uz citu iekārtu vai arī uz nākamo ietvaicētāju. Ietvaicējamais šķīdums pa ietvaicētāja caurulēm cirkulē tikai vienu reizi. Ietvaicējot šķīdumus, kas kristalizējas, separatoru novieto blakus kalorizatoram un nelieto centrālās atdalītāju. Šādi ietvaicētāji labi ietvaicē viskozus, putojošus šķīdumus.

Viskozu, termiski neizturīgu šķīdumu ietvaicēšanai lieto ietvaicētājus ar kritošu šķīduma slāni. Ietvaicētājiem ar kritošu šķīduma slāni slāņa plūsmas vērsta uz leju, bet sekundārā tvaika plūsmas vērsta vai nu uz augšu vai leju. Intensīvāk darbojas ietvaicētāji, kuros sekundārā tvaika plūsmas virzās uz leju, jo tas stimulē šķīduma slāņa ātrāku kustību un plūsmas turbulizāciju. Plāna šķīduma slāņa izveidošanos panāk, izmantojot uzgaļus, sprauslas, režģus u. c.

Ietvaicētāji, kuros ietvaice notiek plānā šķīduma slānī, pieder pie

ietvaicētāji ar garām caurulēm (9.15. att.). Sākus ietvaicētājus plaši lieto dažādās rūpniecības nozarēs. Ietvaicējamo šķīdumu iepilda caurulēs 1 aptuveni 2 m augstumā. Šķīduma ietvaice caurulēs noris ļoti intensīvi. Sekundārā tvaika burbuļi saplūst vienā strūklā, kas ar ātrumu 3050 m/s ceļas pa caurules centru uz augšu. Tvaika strūkla rauj ietvaicējamo šķīdumu sev līdzī gar caurules sienām plānā slānī uz augšu. Šķīduma slāņa ātrums sasniedz pat 20 m/s. Tādēļ ietvaicētājos ar kāpjošu šķīduma slānī ir liels siltum-pārejas koeficients.

No cauruļu augšējiem galiem šķīdums ar sekundāro tvaiku strūklas veidā ieplūst separatorā 5. Separatorā tvaika atdalīšanai ievietots vairogs 3, kas dažreiz izveidots turbīnas rata veidā (centrbēdzes atdalītājs). Strūklām triecoties pret ratu, tas sāk griezties. Centrbēdzes spēks virza šķīdumu pret separatora sienām un pa cauruli 2 to izvada no ietvaicētāja. Sekundārais tvaiks izplūst pa cauruli 4.

augstas intensitātes aparātiem, pat arī tad, ja ir neliela temperatūru starpība.

Nelielu šķīdumu daudzumu ietvaicēšanai samērā plaši lieto vertikālus, horizontālus un centrālās plānslāņa rotācijas ietvaicētājus. Vertikāla rotācijas ietvaicētāja shēma dota 9.16. attēlā. Atšķaidīto šķīdumu ievada pa īscauruli 3 sildvirsmas augšā, ar īpašu sadalītāju ietvaicējamo šķīdumu plūsmu novirza plānā slānī (atkarībā no viskozitātes 0,1...0,6 mm biezumā) pa sildvirsmu uz leju. Tad šķīduma slānis daļēji iztvaiko. Sekundārais tvaiks plūst cauri separatoram 4 un pa cauruli 5 izplūst no ietvaicētāja (parasti uz kondensatoru, jo ietvaicē veic vakuumā). Vertikāli gar sildvirsmu novietoti sekcijveida apvalki 1, kas, ja nepieciešams, sildvirsmai spēj nodrošināt dažādas temperatūru joslas. Ietvaices intensificēšanai ietvaicētājā ievietota vertikāla vārpsta 6 ar lāpstiņām 2, kas rotējot (ar 0,8...3,3 s⁻¹) nepārtraukti atjauno sildvirsmu un uzlabo siltuma pāreju.

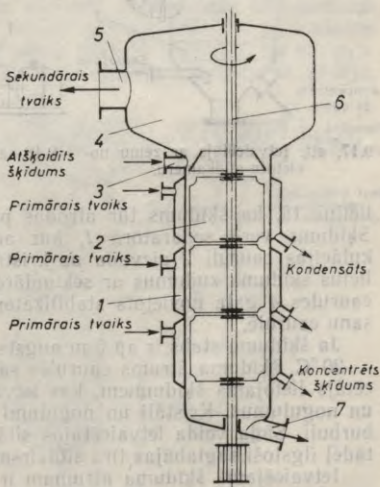
Šādos ietvaicētājos apakšējo sildvirsmas daļu var izmantot ietvaicētā šķīduma kristalizēšanai un iegūto kristālu žāvēšanai. Produktu izvada pa īscauruli 7. Šāda veida ietvaicētāji labi ietvaicē dažādus šķīdumus (ar dažādu viskozitāti, blīvumu, termisko izturību, putojošus u. c.). Rūpniecībā šādos ietvaicētājus ražo ar sildvirsmu 0,8...20 m².

Plānslāņa ietvaicētājiem ir šādi trūkumi: ietvaicējot šķīdumus, kas kristalizējas, caurules ātri nolietojas; grūti regulēt šķīdumu beigu koncentrāciju, ja mainās tvaika spiediens un sākuma koncentrācija.

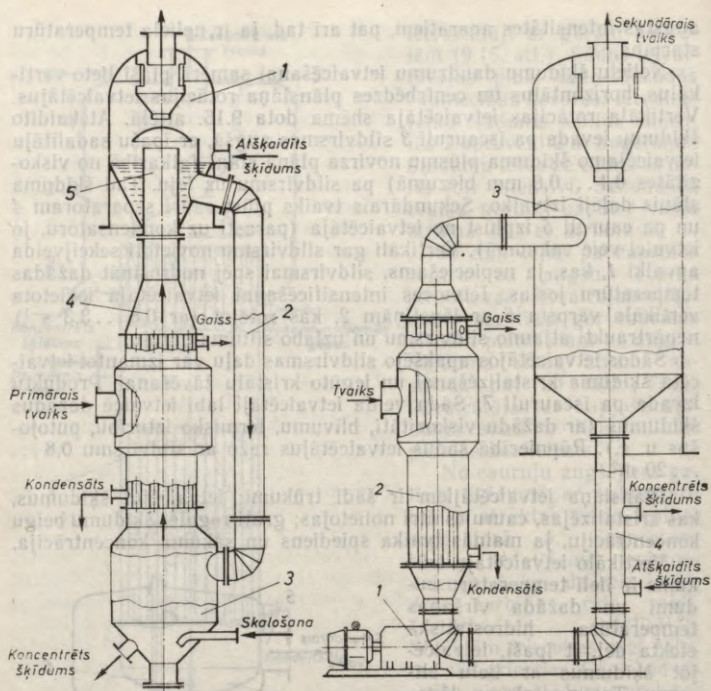
Vertikālo ietvaicētāju trūkums ir lieli temperatūru zudumi un dažāda viršanas temperatūra hidrostatiskā efekta dēļ, it īpaši, ietvaicējot šķīdumus ar lielu blīvumu. Tas novēršams, lietojot ietvaicētājus ar horizontālu sildkameru.

Lieto ietvaicētājus arī ar slīpu sildkameru. Tiem ir intensīvāka cirkulācija un mazāks hidrostatiskais efekts nekā vertikālajiem ietvaicētājiem. Slīpie ietvaicētāji ērti tīrāmi un remontējami, jo slīpās sildkameras vāks viegli atverams. Tos lieto šķīdumiem, kas ietvaicējot kristalizējas.

9.17. attēlā parādīts ietvaicētājs ar zemu novietotu sildkameru. Izmantojot šķīduma hidrostatisko spiedienu, kopējo spiedienu sildkamerā pa-



9.16. att. Plānslāņa rotācijas ietvaicētāja shēma.



9.17. att. Ietvaicētājs ar zemu novietotu sildkameru.

9.18. att. Ietvaicētājs ar piespiedu cirkulāciju un āreju sildkameru.

lielina tā, ka šķīdums tur atrodas pārkarsētā stāvoklī, bet neverd. Šķīdums verd separatorā 1, kur arī rodas kristāli. Tos pa cir- kulācijas cauruli 2 aizvada uz kristālu atdalītāju 3. Lai aizkavētu lielus šķīduma zudumus ar sekundāro tvaiku, virs šķīduma izplūdes caurules 4 gala novietots stabilizators 5, kas aizkavē šķīduma vir- šanu caurulē.

Ja šķīduma stabs ir ap 6 m augsts un temperatūru starpība 10... ..20°C, šķīduma ātrums caurulēs sasniedz 2...3 m/s. Sāds ietvai- cētājs lietojams šķīdumiem, kas ietvaicēšanas laikā veido kristālus un nogulumus. Kristāli un nogulumi rodas tur, kur veidojas tvaika burbuļi. Šāda veida ietvaicētajos sildkamerā šķīdums ir pārkarsēts, tādēļ ilgstoši saglabājas tīra sildvirsmā.

Ietvaicējamā šķīduma ātrumam ir liela nozīme ietvaicētāja raži- guma paaugstināšanā (palielinās siltumpārejas koeficients). Bez tam ietvaicētajos ar lieliem šķīduma ātrumiem pasliktinās kristālu izgul-

snēšanās uz sildvirsmas. Ietvaicētajos ar brīvo cirkulāciju šķiduma ātrumi parasti ir mazi un atkarīgi no temperatūru starpības, aparāta izmēriem un šķiduma viskozitātes.

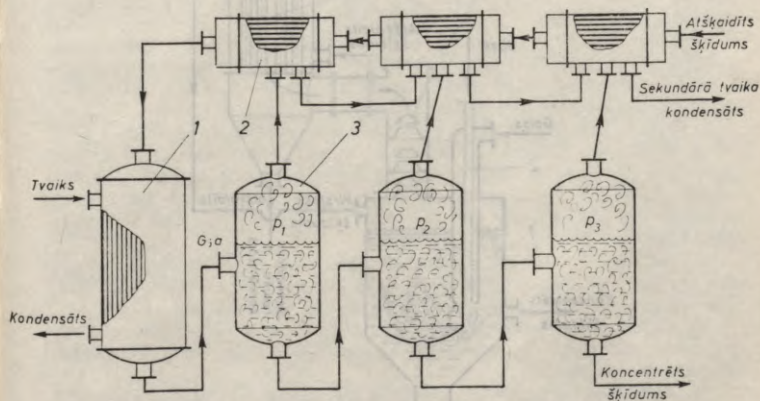
Viskozu šķidumu ietvaicēšanai bieži lieto ietvaicētājus ar piespiedu cirkulāciju, ko panāk ar centrbēdzes sūkni vai aksiālo sūkni 1 (9.18. att.). Primāro tvaiku ievada sildkamerā 2. Koncentrētais šķidums aizplūst no cirkulācijas caurules 4, kas pievienota separatoram 3. Šādos ietvaicētajos šķiduma ātrums viršanas caurulēs ir 1,5... 3,5 m/s. Ja ietvaicēšanas laikā rodas kristāli, cirkulācijas ātrumam jābūt vismaz 2,5 m/s.

Ietvaicētajos ar piespiedu cirkulāciju (pat ietvaicējot viskozus šķidumus) ir augsts siltumpārejas koeficients.

9.2. ADIABĀTISKĀ IETVAICE

Šķidumu koncentrēšanai, it īpaši jūras ūdens atsāļošanai, samērā plaši lieto *adiabātisko ietvaici*. Tā pamatojas uz iepriekš uzkaršēta ietvaicējamā šķiduma iztvaicēšanu vakuuma ietvaicētajos (kamerās). Iegūto sekundāro tvaiku izlieto uz ietvaici aizvadāmā šķiduma sildīšanai. Šādas vairāpkāpju iekārtas lieto jūras ūdens atsāļošanai, un to ražīgums ir ļoti liels.

9.19. attēlā redzama trīspakāpju adiabātiskās ietvaices iekārta (izmanto pat vairāk nekā 40 pakāpes). Atšķaidītais šķidums plūst cauri siltumapmainītājiem-kondensatoriem 2 un sasilst, izmantojot sekundārā tvaika kondensācijas siltumu. Līdz galīgai temperatūrai (augstāk par 100 °C) šķidums uzsilst priekšsildītājā 1, no kurienes to ievada pirmajā pakāpē 3. Spiedienu pakāpēs regulē tā, lai $p_1 > p_2 > p_3$. Ietvaicējamais šķidums plūst no pirmās pakāpes uz pēdējo,



9.19. att. Trīspakāpju adiabātiskās ietvaices iekārta shēma.

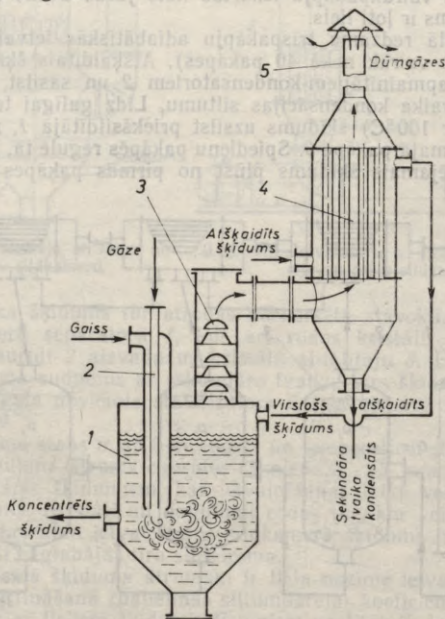
kurās spiediens secīgi samazinās, tādēļ pakāpēs iepļūstošais šķidums vienmēr ir pārkarsētā stāvoklī un iztvaiko. Sekundārais tvaiks, aizplūstot uz siltumapmainītājiem-kondensatoriem, kondensējas un kā destilātu to izvada no iekārtas. Koncentrētais šķidums aizplūst no pēdējā ietvaicētāja.

9.3. KONTAKTA IETVAICĒTĀJI

Ietvaicētājus, kuros siltumnesējs tieši saskaras ar ietvaicējamo šķidumu, sauc par *kontakta ietvaicētājiem*. Kontakta ietvaicētājos nav īpašas sildvirsmas, uz kuras varētu krāties nogulumu kārtas, tādēļ ietvaicēšana notiek ļoti intensīvi. Par siltumnesēju izmanto gāzi, šķidrums vai cietu vielu.

Ietvaicei lieto vienpakāpes un vairāpkāpju iekārtas. Vairāpkāpju iekārtās īpatnējais siltuma patēriņš 3...6 reizes mazāks nekā vienpakāpes iekārtās.

Kontakta ietvaicētāji ir dažādas konstrukcijas. Tos var kombinēt ar adiabatiskās ietvaices iekārtām. Izplatītāki ir ietvaicētāji, kuros siltumnesējs ir gāze.



9.20. att. Ietvaicētājs ar iegremdētu degli.

9.3.1. Ietvaicētājs ar iegremdētiem degļiem

Kīmiskajā rūpniecībā dažādu sāļu un skābju šķīdumu ietvaicēšanai lieto ietvaicētājus ar iegremdētiem degļiem.

9.20. attēlā redzams ietvaicētājs 1 ar iegremdētu degli (var būt arī vairāki degļi). Sākot ietvaici, degli 2 paceļ virs šķīduma līmeņa un aizdedzina gāzi. Tad degli lēni gremdē ietvaicējamā šķīdumā, kur tas turpina degt. Liesma un dūmgāzes iztvaicē šķīdinātāju. Sekundārais tvaiks kopā ar dūmgāzēm plūst cauri pilienu atdalītājam 3 uz virsmas kondensatoru 4. Kondensatorā sekundārais tvaiks kondensējas. Dūmgāzes pa cauruli 5 izplūst atmosfērā. Sekundārā tvaika kondensācijas siltumu izmanto atšķaidītā šķīduma uzsildīšanai, ievadot to kondensatora starpcauruļu telpā.

10. MASAS APMAIŅAS TEORIJA

Masas apmaiņas procesus raksturo divas galvenās komponentes: difūzijas un konvekcijas procesi. Difūzijas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas no augstākas koncentrācijas vietas uz zemāku koncentrācijas vietas. Konvekcijas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas kopā ar šķīdinātāju.

Kīmiskajā rūpniecībā masas apmaiņas procesus raksturo divas galvenās komponentes: difūzijas un konvekcijas procesi. Difūzijas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas no augstākas koncentrācijas vietas uz zemāku koncentrācijas vietas. Konvekcijas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas kopā ar šķīdinātāju.

1. Masas apmaiņas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas no augstākas koncentrācijas vietas uz zemāku koncentrācijas vietas. Difūzijas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas no augstākas koncentrācijas vietas uz zemāku koncentrācijas vietas. Konvekcijas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas kopā ar šķīdinātāju.

2. Masas apmaiņas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas no augstākas koncentrācijas vietas uz zemāku koncentrācijas vietas. Difūzijas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas no augstākas koncentrācijas vietas uz zemāku koncentrācijas vietas. Konvekcijas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas kopā ar šķīdinātāju.

3. Masas apmaiņas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas no augstākas koncentrācijas vietas uz zemāku koncentrācijas vietas. Difūzijas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas no augstākas koncentrācijas vietas uz zemāku koncentrācijas vietas. Konvekcijas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas kopā ar šķīdinātāju.

4. Masas apmaiņas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas no augstākas koncentrācijas vietas uz zemāku koncentrācijas vietas. Difūzijas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas no augstākas koncentrācijas vietas uz zemāku koncentrācijas vietas. Konvekcijas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas kopā ar šķīdinātāju.

5. Masas apmaiņas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas no augstākas koncentrācijas vietas uz zemāku koncentrācijas vietas. Difūzijas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas no augstākas koncentrācijas vietas uz zemāku koncentrācijas vietas. Konvekcijas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas kopā ar šķīdinātāju.

6. Masas apmaiņas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas no augstākas koncentrācijas vietas uz zemāku koncentrācijas vietas. Difūzijas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas no augstākas koncentrācijas vietas uz zemāku koncentrācijas vietas. Konvekcijas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas kopā ar šķīdinātāju.

7. Masas apmaiņas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas no augstākas koncentrācijas vietas uz zemāku koncentrācijas vietas. Difūzijas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas no augstākas koncentrācijas vietas uz zemāku koncentrācijas vietas. Konvekcijas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas kopā ar šķīdinātāju.

8. Masas apmaiņas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas no augstākas koncentrācijas vietas uz zemāku koncentrācijas vietas. Difūzijas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas no augstākas koncentrācijas vietas uz zemāku koncentrācijas vietas. Konvekcijas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas kopā ar šķīdinātāju.

9. Masas apmaiņas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas no augstākas koncentrācijas vietas uz zemāku koncentrācijas vietas. Difūzijas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas no augstākas koncentrācijas vietas uz zemāku koncentrācijas vietas. Konvekcijas process ir tāds, kurā komponenti pārvietojas kopā ar šķīdinātāju.

III. MASAS APMAIŅAS PROCESI UN APARĀTI

10. MASAS APMAIŅAS TEORIJA

Masas apmaiņas procesiem raksturīga viena vai vairāku komponentu (vielu) pārvietošanās starp saskarē esošām fāzēm difūzijas rezultātā. Masas apmaiņas procesi pakļauti difūzijas likumiem, tādēļ tos sauc arī par *difūzijas procesiem*.

Ķīmijas tehnoloģijā masas apmaiņas procesi, tāpat kā hidromehāniskie procesi un siltuma procesi, pieder pie tehnoloģijas pamatprocesiem.

Masas apmaiņas procesus iedala divās grupās:

1) *masas apmaiņas procesi ar brīvu (mainīgu) starpfāžu saskares robežu*. Masas apmaiņa notiek sistēmās šķidrums—šķidrums vai gāze (tvaiks)—šķidrums;

2) *masas apmaiņas procesi ar fiksētu starpfāžu saskares robežu*. Masas apmaiņa notiek sistēmās šķidrums—cieta viela vai gāze (tvaiks)—cieta viela.

Pie pirmās grupas pieder šādi procesi: *absorbcija, destilācija, rektifikācija un šķidrumu ekstrakcija*. Pie otrās grupas pieder *adsorbcija, žāvēšana, jonu apmaiņa, cieto vielu ekstrakcija, kristalizācija, šķīdināšana un membrānu procesi*.

Ķīmijas tehnoloģijā sastopami šādi masas apmaiņas veidi.

1. *Sorbcijas procesi* — komponents vai komponenti pārvietojas no gāzveida fāzes uz šķidrumu (absorbcija), no gāzveida (tvaika) fāzes vai šķidrās fāzes — uz cietās vielas virsmu (adsorbcija). Komponenti var pārvietoties arī no šķidrās vai cietās fāzes uz gāzveida fāzi (desorbcija).

2. *Pārtvaices procesi* — vieglāk gaistošais komponents pārvietojas tvaika fāzē, bet grūtāk gaistošais komponents — šķidrā fāzē. Pie šīs procesu grupas pieder destilācija un rektifikācija.

3. *Ekstrakcijas procesi* notiek ar šķidrumiem un cietām vielām; no vielu maisījuma ar selektīvu šķīdinātāju izdala vienu vai vairākus komponentus.

4. *Žāvēšanas procesi* — mitrums no materiāla (gāze, šķidrums vai cieta viela) pārvietojas uz citu fāzi.

5. *Kristalizācijas procesi* — no piesātināta šķīduma uz kristālu virsmām izdalās izšķīdinātā viela. Pretējs process ir cietu vielu šķīdināšana.

6. *Membrānu procesi* — šķīdru sistēmu (suspensiju, emulsiju un šķīdumu) sadalīšana, izmantojot puscaurlaidīgas membrānas.

7. *Jonu apmaiņas procesi* — elektrolītu šķīdumos esošo jonu apmaiņa ekvivalentā daudzumā ar jonītā (cietā sorbentā) esošo jonu.

Masas apmaiņas procesus ķīmiskajā rūpniecībā plaši izmanto ekoloģijas vajadzībām. Gāzveida sistēmu attīrīšanai lieto adsorbciju un adsorbciju. Šķidrās sistēmas (notekūdeņus u. c.) attīra, izmantojot jonu apmaiņu, membrānu procesus un ekstrakciju.

Masas apmaiņas procesu teorija ietver *statiku* un *kinētiku*. Statika aplūko *fāžu līdzsvara likumus, kuri ir pamatā komponentu koncentrācijas un procesa norises virziena noteikšanai*. Kinētika aplūko *masas apmaiņas procesu norises ātrumu un virzošo spēku*.

10.1. MASAS APMAIŅAS PROCESU STATIKA

10.1.1. Fāžu sastāva izteikšanas veidi

Šķidrās fāzes vai gāzveida (tvaika) fāzes sastāvu izsaka *absolūtās masas daļās vai moldaļās vai arī attiecīgos procentos*. Komponenta koncentrāciju gāzveida (tvaika) fāzē apzīmē ar y un Y , bet šķidrā fāzē — ar x un X .

Maisījumam $A+B+C$ komponentu koncentrāciju izsakot *absolūtās masas daļās* (kilogramos katra komponenta uz 1 kg maisījuma — apzīmēti ar svītru virs koncentrācijas apzīmējuma, \bar{x}), lietojamās šādas formulas:

$$\text{komponentam } A \quad \bar{x}_A = \frac{m_A}{m_A + m_B + m_C} = \frac{m_A}{\sum m_i},$$

$$\text{komponentam } B \quad \bar{x}_B = \frac{m_B}{m_A + m_B + m_C} = \frac{m_B}{\sum m_i} \text{ utt.,}$$

kur m_A, m_B, m_C — komponentu A, B, C masa maisījumā, kg.

Komponentu absolūto masas daļu summa vienāda ar vienu, t. i.,

$$\bar{x}_A + \bar{x}_B + \bar{x}_C = 1.$$

Komponentu koncentrāciju absolūtās moldaļās (molos katra komponenta uz 1 mol maisījuma — bez svītras virs koncentrācijas apzīmējuma x) izsaka šādi:

$$\text{komponentam } A \quad x_A = \frac{m_A/M_A}{m_A/M_A + m_B/M_B + m_C/M_C} = \frac{\bar{x}_A/M_A}{\bar{x}_A/M_A + \bar{x}_B/M_B + \bar{x}_C/M_C}$$

komponentam B

$$x_B = \frac{m_B/M_B}{m_A/M_A + m_B/M_B + m_C/M_C} = \frac{\bar{x}_B/M_B}{\bar{x}_A/M_A + \bar{x}_B/M_B + \bar{x}_C/M_C},$$

kur M_A, M_B, M_C — komponentu A, B, C molmasas, kg/mol.

Maisījuma vidējo molmasu aprēķina šādi:

$$M_{\text{vid}} = \frac{1}{\bar{x}_A/M_A + \bar{x}_B/M_B + \bar{x}_C/M_C}$$

izmantojamas arī šādas formulas:

$$M_{\text{vid}} = \frac{m_A + m_B + m_C}{m_A/M_A + m_B/M_B + m_C/M_C} \quad \text{jeb}$$

$$M_{\text{vid}} = M_A x_A + M_B x_B + M_C x_C.$$

Ja pēc minētajām formulām iegūtās absolūtās masas daļas vai moldaļas pareizina ar 100, tad iegūst attiecīgos procentus.

Maisījuma komponentu koncentrāciju absolūtajās masas daļās vai moldaļās attiecinot uz 1 kg vai 1 mol attiecīgā komponenta, iegūst *relatīvās masas daļas vai moldaļas*.

Maisījumam $A+B$, kas satur \bar{x}_A un \bar{x}_B absolūtās masas daļas, komponentu A un B relatīvās masas daļas attiecībā uz komponentu

B ir $\bar{x}'_A = \frac{\bar{x}_A}{1 + \bar{x}_A}$, $\bar{x}'_B = 1$; attiecībā uz komponentu A $\bar{x}'_B = \frac{\bar{x}_B}{1 + \bar{x}_B}$, $\bar{x}'_A = 1$. Relatīvās moldaļas aprēķina analogiski, tikai \bar{x}_A vietā formulās ievieto x_A .

Gāzu maisījuma molāro sastāvu izsaka arī ar *komponentu parciālajiem spiedieniem*. Pēc Daltona likuma sistēmas kopējais spiediens p ir gāzu maisījumā ietilpstošo atsevišķo komponentu parciālo spiedienu summa:

$$p = p_A + p_B + \dots + p_N.$$

Ja gāzu maisījuma tilpums V , bet komponenta A parciālais spiediens p_A , tad komponenta A aizņemtais tilpums V_A aprēķināms šādi:

$$p_A V = p V_A \quad \text{un} \quad V_A = \frac{p_A}{p} V.$$

No kopējā gāzu maisījuma tilpuma komponenta A aizņemtā tilpumdaļa ir

$$V_A^d = \frac{V_A}{V} = \frac{p_A}{p}.$$

Vienādā temperatūrā un spiedienā 1 mol jebkuras gāzes aizņem vienu un to pašu tilpumu, tādēļ tilpumdaļa, kuru aizņem komponents, vienāda ar komponenta moldaļu y_A , t. i., $y_A = V_A^d = p_A/p$; analogiski $y_B = p_B/p$.

Fāžu sastāvu izsaka arī kā komponenta un inertās daļas molu attiecību un gāzes fāzei apzīmē ar Y , bet šķidrājai fāzei ar X (bez svītras virs Y un X).

Fāžu sastāvu var izteikt arī ar komponenta un inertās daļas masu attiecību, apzīmējot to gāzes fāzei ar \bar{Y} , bet šķidrājai fāzei ar \bar{X} (svītra virs Y un X).

Fāžu koncentrāciju var izteikt arī ar komponenta molu skaitu (vai masu) uz tilpuma vienību (mol/m^3 vai kg/m^3). Šādi izteiktas koncentrācijas apzīmē ar C vai \bar{C} .

10.1.2. Fāžu līdzsvars

Difūzija masas apmaiņas procesos vērsta no fāzes ar augstāku komponenta koncentrāciju uz fāzi ar zemāku koncentrāciju. Komponentu pārvietošanās turpinās tik ilgi, līdz koncentrācijas starp fāzēm izlīdzinās un sasniedz attiecīgai temperatūrai un spiedienam atbilstošu līdz-



10.1. att. Masas pārejas shēma.

svaru. Piemēram, ja virs ūdens (šķidrā fāze) atrodas gaisa un hlorūdeņraža maisījums (gāzveida fāze), tad hlorūdeņraža molekulas cauri fāžu saskares virsmai (līmenim) pārvietosies no gāzveida fāzes uz ūdeni un veidos sāļsskābi (10.1. att.).

Vienlaikus ar hlorūdeņraža pāreju ūdenī notiks arī pretējs process — hlorūdeņraža molekulas no ūdens pārvietosies atpakaļ gaisā. Lielāks hlorūdeņraža molekulu skaits pārvietosies no gaisa ūdenī (HCl koncentrācija gaisā lielāka nekā ūdenī), tādēļ hlorūdeņraža apmaiņa starp fāzēm ieguvēja ir šķidrā fāze. Hlorūdeņraža pārvietošanās turpināsies tik ilgi, līdz hlorūdeņraža molekulu skaits, kas nokļūst šķidrā fāzē, kļūs vienāds ar hlorūdeņraža molekulu skaitu, kas no šķidrās fāzes pārvietojas gāzveida fāzē, t. i., līdz iestāsies līdzsvars.

Vielas koncentrāciju, kas atbilst līdzsvara stāvoklim, sauc par līdzsvara koncentrāciju.

Jebkurai šķidrās fāzes koncentrācijai X atbilst līdzsvara koncentrācija gāzveida fāzē Y^* — un otrādi, t. i.,

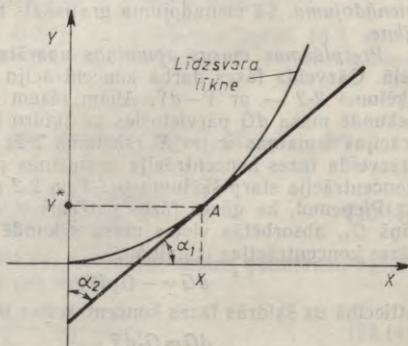
$$Y^* = f(X) \text{ un } X^* = f(Y). \quad (10.1)$$

Vienādojumu (10.1) sauc par līdzsvara koncentrācijas vienādojumu. Grafiski šo sakarību attēlo līdzsvara diagrammā (10.2. att.).

Līdzsvara līkņu konstruēšanai nepieciešamās līdzsvara koncentrācijas iegūst eksperimentāli. Visbiežāk sastopamām sistēmām tās dotas rokasgrāmatās. Pēc šiem datiem konstruē līdzsvara diagrammas.

Saistību starp līdzsvara koncentrācijām izsaka arī ar pieskares vienādojumu dotajam punktam uz līdzsvara līknes, t. i., ar taisnes vienādojumu

$$Y^* = A_1 X + B_y. \quad (10.2)$$



10.2. att. Līdzsvara diagramma.

Līdzsvara likne parasti nav taisna, tādēļ leņķa koeficients A_1 un loceklis B_y vienādojumā (10.2) ir mainīgi lielumi un atkarīgi no X . Leņķa koeficients vienāds ar leņķa α_1 tangensu. Šo leņķi veido argumenta ass un pieskare līdzsvara liknei punktā A ar koordinātu X :

$$A_1 = \operatorname{tg} \alpha_1. \quad (10.3)$$

Atrisinot vienādojumu (10.2) attiecībā uz X^* , iegūst

$$X^* = \frac{1}{A_1} Y - \frac{B_y}{A_1}.$$

Ja izdara šādus apzīmējumus:

$$\frac{1}{A_1} = A_2 \quad \text{un} \quad -\frac{B_y}{A_1} = B_x, \quad (10.4)$$

tad vienādojums (10.1) izsakāms šādi:

$$X^* = A_2 Y + B_x. \quad (10.5)$$

Koeficienta A_2 vērtība atkarīga no leņķa α_2 , kuru veido Y ass un pieskare punktā A , tātad $A_2 = \operatorname{tg} \alpha_2$.

Absorbīcijai izmanto vienādojumu (10.2), bet rektifikācijai — vienādojumu (10.5). Koeficientus A_1 un A_2 sauc par *sadalījuma koeficientiem*.

10.1.3. Darba taisnes vienādojums un materiālā bilance

Masas apmaiņas aparātiem pieņem, ka tajos pastāv fāžu *pretplūsma* vai *līdzplūsma*. Faktiskās fāžu plūsmas ir dažādas pat viena aparāta ietvaros.

Komponenta koncentrāciju fāzēs nosaka kā vidējo no visām koncentrācijām plūsmas šķersgriezumā un to sauc par *darba koncentrāciju*. Matemātisko sakarību starp darba koncentrācijām fāzēs no ieplūdes aparātā līdz izplūdei no tā sauc par *darba koncentrāciju vienādojumu*. Šā vienādojuma grafiskais attēlojums ir procesa *darba likne*.

Pretplūsmas masas apmaiņas aparāta shēma redzama 10.3. attēlā. Gāzveida fāzes darba koncentrāciju šķēlumā 1-1 apzīmē ar \bar{Y} , šķēlumā 2-2 — ar $\bar{Y} - d\bar{Y}$. Abām fāzēm saskaroties ar virsmu dS , sekundē masa dG pārvietosies uz šķidrās fāzes. Šķidrās fāzes koncentrācijas izmaiņas ir no \bar{X} (šķēlumā 2-2) uz $\bar{X} + d\bar{X}$ (šķēlumā 1-1). Gāzveida fāzes koncentrācija samazinās par $-d\bar{Y}$, bet šķidrās fāzes koncentrācija starp šķēlumiem 1-1 un 2-2 pieaug par $d\bar{X}$.

Pieņemot, ka gāzes fāzes patēriņš ir G_y , bet šķidrās fāzes patēriņš G_x , absorbētās vielas masa sekundē dG attiecībā uz gāzveida fāzes koncentrācijas izmaiņām

$$dG = -G_y d\bar{Y}, \quad (10.6)$$

attiecībā uz šķidrās fāzes koncentrācijas izmaiņām

$$dG = G_x d\bar{X}. \quad (10.7)$$

Vienādojumiem (10.6) un (10.7) kreisās puses ir vienādas, tādēļ var rakstīt

$$-G_y d\bar{Y} = G_x d\bar{X}. \quad (10.8)$$

Līdzplūsmas masas apmaiņas aparātiem ir spēkā tāda pati sakarība kā vienādojumā (10.8), tikai bez mīnusa zīmes. Tādēļ darba koncentrāciju diferenciālvienādojumi ir šādi:

$$d(G_y \bar{Y}) = \pm d(G_x \bar{X}). \quad (10.9)$$

Masas apmaiņas procesos, kuros

$$G_y = \text{const} \quad \text{un} \quad G_x = \text{const}, \quad (10.10)$$

vienādojums (10.9) izsakāms šādi:

$$G_y d\bar{Y} = \pm G_x d\bar{X}. \quad (10.11)$$

Integrējot vienādojumu (10.11), iegūst darba liknes vienādojumu

$$G_y \bar{Y} = \pm G_x \bar{X} + B,$$

kur $B = \text{const}$, $\pm \frac{G_x}{G_y} = A = \text{const}$, tad

$$\bar{Y} = A\bar{X} + B. \quad (10.12)$$

Vienādojums (10.12) parāda, ka darba likne masas apmaiņas procesiem, ievērojot nosacījumus (10.10), ir taisne. Tādēļ to sauc par darba taisnes vienādojumu.

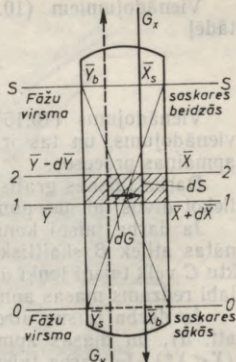
Integrējot vienādojumu (10.11) kā noteikto integrāli 10.3. attēlā redzamās robežās, fāžu pretplūsmai (līdzplūsmai jāievēro mīnusa zīme) var rakstīt

$$G_y \int_{\bar{Y}_b}^{\bar{Y}_s} d\bar{Y} = G_x \int_{\bar{X}_s}^{\bar{X}_b} d\bar{X} \quad \text{jeb} \quad G_y (\bar{Y}_s - \bar{Y}_b) = G_x (\bar{X}_b - \bar{X}_s), \quad \text{jeb}$$

$$\frac{G_x}{G_y} = \frac{\bar{Y}_s - \bar{Y}_b}{\bar{X}_b - \bar{X}_s}. \quad (10.13)$$

Sakarība (10.13) ir spēkā jebkuram šķēlumam, piemēram, šķēlumiem 1-1 un 0-0 (10.3. att.) var rakstīt

$$\frac{G_x}{G_y} = \frac{\bar{Y}_s - \bar{Y}}{\bar{X}_b - \bar{X}}. \quad (10.14)$$



10.3. att. Pretplūsmas masas apmaiņas aparāta shēma.

Vienādojumiem (10.13) un (10.14) kreisās puses ir vienādas, tādēļ

$$\frac{\bar{Y}_s - \bar{Y}_b}{\bar{X}_b - \bar{X}_s} = \frac{\bar{Y} - \bar{Y}_s}{\bar{X}_b - \bar{X}} \quad (10.15)$$

Vienādojums (10.15), tāpat kā vienādojums (10.12), ir taisnes vienādojums, un tas ir otrs darba taisnes izteiksmes veids masas apmaiņas procesos.

Darba taisnes grafisko attēlojumu koordinātās Y un X iegūst, atliekot divus taisnes punktus 1 un 2 (10.4. att. a) un tos savienojot.

Ja darba taisni konstruē pēc vienādojuma (10.12), tad uz ordinātas atliek B skaitlisko vērtību (10.4. att. b) un caur iegūto punktu C velk taisni leņķī α . Līdzsvara diagrammā attēlojot darba taisni, labi redzams masas apmaiņas procesa virziens.

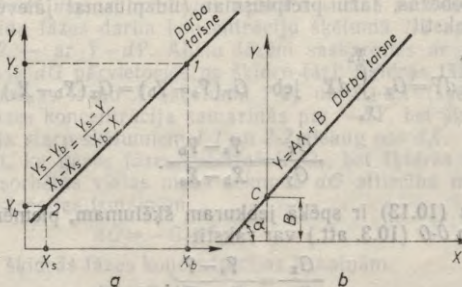
Ja darba taisne atrodas virs līdzsvara liknes, tad $Y > Y^*$ (10.5. att. a), un masas apmaiņa vērsta no gāzes fāzes uz šķidrā fāzi ($X < X^*$). Ja darba taisne ir zem līdzsvara liknes, tad $Y < Y^*$ (10.5. att. b), un process vērsts no šķidrās fāzes uz gāzveida (tvaiku) fāzi, $X > X^*$. Fāžu līdzplūsmas gadījumā darba taisni konstruē analogiski, tikai $A = -\operatorname{tg} \alpha$, tādēļ darba taisnes slīpums ir pretējs nekā pretplūsmai.

Masas apmaiņas procesa darba taisne rāda, kā procesa norises laikā aparātā no ieplūdes līdz izplūdei mainās fāžu koncentrācija.

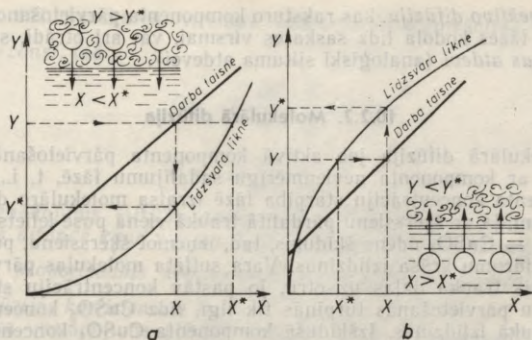
Ievērojot nosacījumu (10.10) un integrējot vienādojumus (10.6) un (10.7), var rakstīt

$$\int_{\bar{Y}_s}^G dG = -G_y \int_{\bar{Y}_s}^{\bar{Y}_b} d\bar{Y} = G_x \int_{\bar{X}_s}^{\bar{X}_b} d\bar{X} \quad \text{jeb}$$

$$G = G_y \int_{\bar{Y}_b}^{\bar{Y}_s} d\bar{Y} = G_x \int_{\bar{X}_s}^{\bar{X}_b} d\bar{X}. \quad (10.16)$$



10.4. att. Darba taisnes konstruēšana pretplūsmai.



10.5. att. Darba taisnes attēlojums līdzsvara diagrammā.

No vienādojuma (10.16) iegūst, cik liela masa sekundē pārvietojas no gāzveida fāzes uz šķidro fāzi, t. i.,

$$G = G_y (\bar{Y}_s - \bar{Y}_b). \quad (10.17)$$

Tikpat lielu masu sekundē uzņem šķidrā fāzē

$$G = G_x (\bar{X}_b - \bar{X}_s). \quad (10.18)$$

Vienādojumi (10.17) un (10.18) ir pozitīvi, tādēļ

$$\bar{Y}_s > \bar{Y}_b \text{ un } \bar{X}_b > \bar{X}_s.$$

Vienādojumus (10.17) un (10.18) sauc par *masas apmaiņas procesa materiālās bilances vienādojumiem*.

10.2. MASAS APMAIŅAS PROCESU KINĒTIKA

10.2.1. Konvektīvā difūzija

Aktīvā komponenta pārvietošanās vienā fāzē notiek no fāzes iekšienes (kodola) uz fāžu saskares virsmu, otrajā fāzē — no šīs virsmas uz fāzes kodolu. Šo procesu pamatā ir divas patstāvīgas parādības: *molekulārā difūzija* un *konvektīvā pāreja*. Ar konvektīvo pāreju saprot komponenta pārvietošanos fāzē tās kustības rezultātā.

Molekulārās difūzijas rezultātā komponents pārvietojas nekustīgā vidē. Šāda difūzija novērojama, masai pārvietojoties fāžu saskares virsmas tuvumā (robežkārtā). Pārējā fāzes daļā (kodolā) notiek *komponenta konvektīvā pāreja*. Abas parādības — komponenta konvektīvā pāreja un molekulārā difūzija notiek vienlaikus un novērojamas katrā stacionārā masas apmaiņas procesā. Vienlaikus norisošo konvektīvo masas pāreju un molekulāro difūziju fāzē sauc par *konvektīvo difūziju*.

Konvektīvo difūziju, kas raksturo komponenta pārvietošanos vienā fāzē no fāzes kodola līdz saskares virsmai, vai arī otrādi, sauc arī par *masas atdevi* (analoģiski siltuma atdevi).

10.2.2. Molekulārā difūzija

Molekulārā difūzija jeb aktīvā komponenta pārvietošanās fāzē saistīta ar komponenta nevienmērīgu sadalījumu fāzē, t. i., aktīvā komponenta koncentrāciju starpība fāzē izraisa molekulāro difūziju. Piemēram, ja ar šķērssienu pārdalītā traukā vienā pusē ieliets ūdens, bet otrā — CuSO_4 ūdens šķīdums, tad, izņemot šķērssienu, pēc kāda laika šķīdumu krāsa izlīdzinās. Vara sulfāta molekulas pārvietojas no vienas trauka daļas uz otru, jo pastāv koncentrāciju starpība. Molekulu pārvietošanās turpinās tik ilgi, līdz CuSO_4 koncentrācija visā traukā izlīdzinās. Izšķīdušā komponenta CuSO_4 koncentrācijas izlīdzināšanās notikusi molekulārās difūzijas rezultātā.

Molekulārā difūzija notiek tikai no augstākas koncentrācijas uz zemāku (analoģiski siltuma vadīšanai). Ja attālumā dn koncentrācija mainās par ∂C , tad *koncentrācijas gradients* $\frac{\partial C}{\partial n} < 0$ vai

$$|\text{grad } C| = -\frac{\partial C}{\partial n}. \quad (10.19)$$

Ja dG ir aktīvā komponenta plūsma, kas izplūst caur saskares virsmu dS , tad *masas (aktīvā komponenta) plūsmas blīvums*

$$q_m = \frac{dG}{dS}, \quad (10.20)$$

kur q_m — masas plūsmas blīvums, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ vai $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; dG — masas plūsma, kg/s vai mol/s .

Saskaņā ar Fika likumu *difundējošā komponenta plūsmas blīvums ir tieši proporcionāls koncentrācijas gradientam*, t. i.,

$$q_m = D |\text{grad } C| \quad (10.21)$$

vai saskaņā ar vienādojumu (10.19)

$$q_m = -D \frac{\partial C}{\partial n}. \quad (10.22)$$

Masas apmaiņas procesi analogi siltuma procesiem. Šī analogija ļabi redzama, aplūkojot vienādojumu (10.22). Ja šajā vienādojumā koncentrācijas C vietā ievieto temperatūru t un proporcionalitātes koeficienta D vietā λ , tad iegūst siltuma plūsmas blīvuma vienādojumu siltuma vadīšanai (7.2).

Komponenta patēriņš, kas molekulārās difūzijas rezultātā difundē caur saskares virsmu S , izsakāms no vienādojumiem (10.20) un (10.22)

$$G = \int_S q_m dS = -D \int_S \frac{\partial C}{\partial n} dS.$$

Ja fāžu saskares virsmas laukumā koncentrācijas gradients $\frac{\partial C}{\partial n} = \text{const}$, tad

$$G = -D \frac{\partial C}{\partial n} \int_S dS \quad \text{jeb}$$

$$G = -D \frac{\partial C}{\partial n} S. \quad (10.23)$$

Vienādojums (10.23) izsaka pirmo Fika likumu: *vielas patēriņš G, kas difundē caur virsmu S (kas perpendikulāra difūzijas virzienam), proporcionāls komponenta koncentrācijas gradientam $\frac{\partial C}{\partial n}$ un difūzijas koeficientam D.*

Fika vienādojums (10.23) analogs Furjē siltuma vadišanas vienādojumam (7.2).

Proporcionalitātes koeficientu D sauc par *molekulārās difūzijas koeficientu jeb difūzijas koeficientu.*

No vienādojuma (10.21) izriet, ja $|\text{grad } C| = 1$, tad $D = q_m$. Tas nozīmē, ka *difūzijas koeficients vienāds ar komponenta plūsmas blīvumu, ja koncentrācijas gradients ir viens.*

No vienādojuma (10.22) difūzijas koeficienta vienība

$$[D] = \frac{[q_m]}{[\partial C / \partial n]} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}}.$$

Molekulārās difūzijas koeficients ir fizikāla konstante un atkarīgs no difundējošā komponenta, vides, kurā difundē, temperatūras un spiediena. Difūzijas koeficienta vērtību iegūst no analitiskām vai pusempīriskām izteiksmēm; dažreiz tā vērtību nosaka eksperimentāli. Molekulārā difūzija ir ļoti lēns process, it īpaši, ja tas notiek šķīdumos.

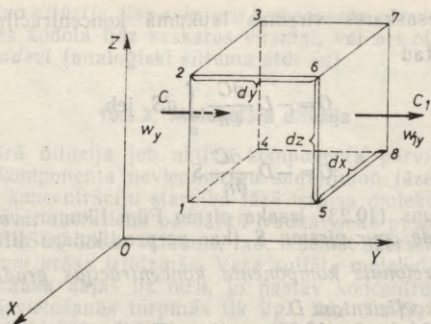
10.2.3. Masas pārejas procesu diferenciālvienādojums

Masas pārejas procesu diferenciālvienādojums rāda, kā laikā mainās aktīvā komponenta koncentrācija fāzes jebkurā punktā nestacionārā masas apmaiņas procesā molekulārās difūzijas un konvektīvās pārejas rezultātā. Vienādojumu sauc arī par konvektīvās difūzijas vienādojumu.

Fāzes plūsmā izdala elementāru taisnstūra paralēlskaldni ar malām dx , dy , dz (10.6. att.). Aktīvā komponenta koncentrācijas kreisajai un labajai skaldnei apzīmē ar C un C_1 . Fāzes kustības ātrumu y ass virzienā attiecīgi ar w_y un w_{1y} . Saistību C ar C_1 un w_y ar w_{1y} izsaka analogiski Eilera diferenciālvienādojumam (sk. 34. lpp.):

$$C_1 = C + \frac{\partial C}{\partial y} dy, \quad (10.24)$$

$$w_{1y} = w_y + \frac{\partial w_y}{\partial y} dy. \quad (10.25)$$



10.6. att. Konvektīvās difūzijas diferenciālvienādojuma risinājumam.

Vispirms izsaka *aktīvā komponenta masu*, kas paralēlskaldnī uzkrājas laikā $d\tau$. Saskaņā ar vienādojumu (10.23) *molekulārās difūzijas rezultātā* caur kreiso skaldni sekundē ieplūstošā aktīvā komponenta masa

$$G_y^d = -D \frac{\partial C}{\partial y} S_y.$$

Komponenta masa, kas ieplūst laikā $d\tau$, ir

$$dm_y^d = -D \frac{\partial C}{\partial y} S_y d\tau,$$

kur $S_y = dx dz$ — kreisās skaldnes un labās skaldnes laukums.

Fāzes tilpums, kas ieplūst paralēlskaldnī caur kreiso skaldni laikā $d\tau$, ir

$$dV_y = Q_y d\tau,$$

kur Q_y — fāzes caurtece caur kreiso skaldni, $Q_y = w_y S_y$. Tādēļ

$$dV_y = w_y S_y d\tau.$$

Aktīvā komponenta masa, ko *plūstošā fāze* ievada caur kreiso skaldni, ir

$$dm_y^w = C dV_y \quad \text{jeb} \quad dm_y^w = C w_y S_y d\tau.$$

Kopējā aktīvā komponenta masa, ko fāzes plūsma *ievada* paralēlskaldnī caur kreiso skaldni, ir

$$\Sigma dm_y = dm_y^d + dm_y^w = \left(C w_y - D \frac{\partial C}{\partial y} \right) S_y d\tau.$$

Analoģiski aprēķina aktīvā komponenta masu, ko ar fāzes plūsmu *izvada* caur paralēlskaldņa labo skaldni:

$$\Sigma dm_{y+dy} = \left(C_1 w_{1y} - D \frac{\partial C_1}{\partial y} \right) S_y d\tau.$$

Komponenta masa dm_y , kas uzkrājas paralēlskaldņa tilpumā masas apmaiņas gaitā y ass virzienā, izsakāma kā starpība starp ievadīto un izvadīto masu:

$$dm_y = \Sigma dm_{y-} - \Sigma dm_{y+dy} \quad \text{jeb}$$

$$dm_y = \left[(C\omega_y - C_1\omega_{1y}) - D \left(\frac{\partial C}{\partial y} - \frac{\partial C_1}{\partial y} \right) \right] S_y d\tau. \quad (10.26)$$

Ievērojot vienādojumus (10.24) un (10.25), iegūst

$$\begin{aligned} C_1\omega_{1y} &= \left(C + \frac{\partial C}{\partial y} dy \right) \left(\omega_y + \frac{\partial \omega_y}{\partial y} dy \right) = \\ &= C\omega_y + \left(C \frac{\partial \omega_y}{\partial y} + \omega_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) dy + \frac{\partial C}{\partial y} \frac{\partial \omega_y}{\partial y} (dy)^2. \end{aligned}$$

Ignorējot bezgalīgi mazos lielumus, šis vienādojums pārveidojams šādi:

$$C\omega_y - C_1\omega_{1y} = - \left(C \frac{\partial \omega_y}{\partial y} + \omega_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) dy = - \frac{\partial (C\omega_y)}{\partial y} dy.$$

Vienādojumam (10.26) iespējams vēl šāds pārveidojums:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial y} - \frac{\partial C_1}{\partial y} &= \frac{\partial C}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left(C + \frac{\partial C}{\partial y} dy \right) = \\ &= \frac{\partial C}{\partial y} - \frac{\partial C}{\partial y} - \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} dy = - \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} dy, \end{aligned}$$

kurš pārrakstāms šādi:

$$dm_y = \left[D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \frac{\partial (C\omega_y)}{\partial y} \right] S_y dy d\tau.$$

Tā kā $S_y dy = dV$ ir paralēlskaldņa tilpums, tad

$$dm_y = \left[D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \frac{\partial (C\omega_y)}{\partial y} \right] dV d\tau.$$

Analoģiski izsaka masu dm_x un dm_z , kas paralēlskaldnī paliek, ieplūstot fāzei x un z asu virzienos. Aktīvā komponenta masa, kas uzkrājas laikā $d\tau$ paralēlskaldņa tilpumā, ir

$$dm = dm_x + dm_y + dm_z.$$

Ievērojot minēto, iegūst šādu vienādojumu:

$$\begin{aligned} dm &= \left\{ D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) - \right. \\ &\quad \left. - \left[\frac{\partial (C\omega_x)}{\partial x} + \frac{\partial (C\omega_y)}{\partial y} + \frac{\partial (C\omega_z)}{\partial z} \right] \right\} dV d\tau. \quad (10.27) \end{aligned}$$

No koncentrācijas izmaiņas dotajā tilpumā aprēķina uzkrāto komponenta masu dm .

Ja sākuma momentā τ komponenta vidējā koncentrācija tilpumā dV ir C_τ , tad komponenta masa, kas šajā tilpumā atrodas, izsakāma šādi:

$$dm_\tau = C_\tau dV.$$

Pēc laika $d\tau$ komponenta vidējā koncentrācija paralēlskaldnī ir

$$C_{\tau+d\tau} = C_\tau + \frac{\partial C}{\partial \tau} d\tau.$$

Aktīvā komponenta masa tilpumā dV pēc momenta $d\tau$ ir

$$dm_{\tau+d\tau} = C_{\tau+d\tau} dV = C_\tau dV + \frac{\partial C}{\partial \tau} dV d\tau.$$

Masa, kas paralēlskaldnī izplūst laikā $d\tau$, izsakāma kā starpība

$$dm = dm_{\tau+d\tau} - dm_\tau \quad \text{jeb}$$

$$dm = \frac{\partial C}{\partial \tau} dV d\tau. \quad (10.28)$$

Apvienojot vienādojumus (10.27) un (10.28), iegūst *nestacionāra masas apmaiņas procesa konvektīvās difūzijas diferenciālvienādojumu*:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) - \left[\frac{\partial(Cw_x)}{\partial x} + \frac{\partial(Cw_y)}{\partial y} + \frac{\partial(Cw_z)}{\partial z} \right]. \quad (10.29)$$

No šī vienādojuma izriet, ka koncentrācijas izmaiņa laikā fāzes dažādos punktos atkarīga no attiecības starp komponenta molekulo difūziju un konvektīvo pāreju.

Vienādojuma (10.29) pēdējo locekli var izteikt arī šādi:

$$\frac{\partial(Cw_x)}{\partial x} + \frac{\partial(Cw_y)}{\partial y} + \frac{\partial(Cw_z)}{\partial z} = C \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + w_x \frac{\partial C}{\partial x} + w_y \frac{\partial C}{\partial y} + w_z \frac{\partial C}{\partial z}.$$

Ja fāzes plūsma ir stacionāra, tad (sk. 53. lpp.)

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0 \quad \text{un}$$

$$\frac{\partial(Cw_x)}{\partial x} + \frac{\partial(Cw_y)}{\partial y} + \frac{\partial(Cw_z)}{\partial z} = w_x \frac{\partial C}{\partial x} + w_y \frac{\partial C}{\partial y} + w_z \frac{\partial C}{\partial z}.$$

Ja molekulārā difūzija un konvektīvā pāreja masas apmaiņā viena otru kompensē, tad vienādojums (10.29) lietojams kā *konvektīvās difūzijas vienādojums stacionāram masas apmaiņas gadījumam* ($\frac{\partial C}{\partial \tau} = 0$):

$$D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) = w_x \frac{\partial C}{\partial x} + w_y \frac{\partial C}{\partial y} + w_z \frac{\partial C}{\partial z}. \quad (10.30)$$

Masas apmaiņai notiekot nekustīgā fāzē, t. i., $w_x = w_y = w_z = 0$, vienādojums (10.29) pārvēršas par *molekulārās difūzijas diferenciāl-vienādojumu*:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right). \quad (10.31)$$

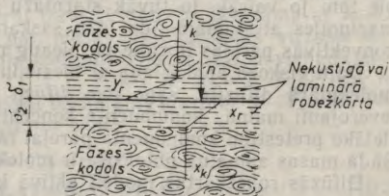
Šo vienādojumu sauc par otro Fika likumu.

10.2.4. Masas pārejas teorētiskie modeļi

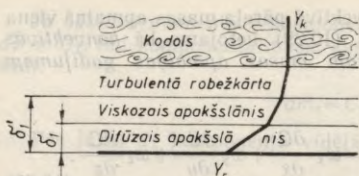
Matemātiskai masas pārejas raksturošanai izmanto vienādojumu sistēmas, kurās ietilpst arī hidrodinamikas vienādojumi. Iegūtās vienādojumu sistēmas ir tik sarežģītas, ka to analītiskais atrisinājums iespējams tikai vienkāršākajos gadījumos, kādi reti sastopami praksē.

Atrisinājuma iegūšanai sākuma vienādojumu sistēmu vienkāršo, bet tā, lai saglabātu masas pārejas procesa mehānisma raksturīgākos matemātiskos nosacījumus. Atkarībā no tā, kādi nosacījumi mūsu priekšstatos šim mehānismam ir noteicošie, sākuma vienādojumu sistēmu vienkāršošanas metodes ir dažādas. Tā rodas nepieciešamība pēc dažādiem masas pārejas vienkāršotiem matemātiskajiem modeļiem fāzes ietvaros.

Robežkārtas modeļi uzskata, ka katrā fāzē pie fāžu saskares virsmas veidojas nekustīga vai lamināra robežkārtā, kas atdala fāžu saskares virsmu no šīs fāzes kodola (10.7. att.). Pieņem, ka robežkārtā koncentrēta visa pretestība komponenta pārejai fāzē, tādēļ aktīvā komponenta koncentrācija mainās tikai robežkārtā. Fāzes kodolā aktīvā komponenta koncentrācija konvektīvo strāvojumū (virpuļu) dēļ paliek nemainīga, t. i., $Y_k = \text{const}$. Šis pieņēmums ļauj aizvietot vienādojumus (10.29) vai (10.30) ar vienādojumu (10.22), jo komponenta pārvietošanās starp fāžu saskares virsmu un kodolu vai arī otrādi notiek tikai molekulārās



10.7. att. Aktīvā komponenta koncentrācijas maiņa robežkārtas modeļi.



10.8. att. Difūzās robežkārtas modelis.

difūzijas rezultātā (robežkārtā). Izmantojot vienādojumu (10.22), iespējams noteikt komponenta plūsmas blīvumu

$$q_m \int_0^{\delta_1} dn = -D_1 \int_{Y_k}^{Y_r} dY \quad \text{jeb}$$

$$q_m = \frac{D_1}{\delta_1} (Y_k - Y_r). \quad (10.32)$$

Attiecīgi otrajai fāzei:

$$q_m = \frac{D_2}{\delta_2} (X_r - X_k), \quad (10.33)$$

kur δ_1, δ_2 — fāžu robežkārtu biezums (10.7. att.); D_1, D_2 — aktīvā komponenta difūzijas koeficienti fāzēs; Y_r, X_r — robežkoncentrācijas, t. i., aktīvā komponenta koncentrācijas fāzēs uz fāžu saskares virsmas; n — komponenta pārvietošanās virziens.

Šajā modelī nav iespējams noteikt komponenta pārvietošanās virzienu n , tādēļ šis vienādojums nav izmantojams aktīvā komponenta plūsmas blīvuma noteikšanai.

Pilnīgāk aktīvā komponenta pārvietošanos fāzē attēlo *difūzās robežkārtas modelis*. Modeļa pamatā ir turbulences pakāpeniska samazināšanās, tuvojoties starpfāžu saskares virsmai.

Difūzās robežkārtas modelī pieņem, ka fāze sastāv no stipri turbulizētā kodola un trim slāņiem. Tāpat kā robežkārtas modelī aktīvā komponenta koncentrācija kodolā Y_k paliek nemainīga (10.8. att.). Sākot no turbulentās robežkārtas, novērojama komponenta koncentrācijas maiņa, kur koncentrācija palielinās, tuvojoties starpfāžu saskares virsmai. Turbulentajā robežkārtā komponents turpina pārvietoties turbulentas pulsācijas rezultātā, bet lēnāk nekā kodolā, koncentrācijas izmaiņa šajā slānī ir niecīga. Pamatslānis, kurā komponenta koncentrācija mainās ievērojami ($Y_k - Y_r$), saistīts ar *viskozo apakšslāni*, kura biezums δ_1' .

Viskozajā apakšslānī turbulentā pulsācija zaudē savu intensitāti, pie tam jo vairāk, jo tuvāk starpfāžu saskares virsmai. Tādēļ, samazinoties attālumam līdz fāžu saskares virsmai, zūd komponenta konvektīvās pārejas nozīme un pieaug molekulārās difūzijas nozīme.

Daļu viskozā apakšslāņa ar biezumu δ_1' , kurā dominē komponenta molekulārā difūzija, sauc par *difūzo apakšslāni*. Šajā apakšslānī ievērojami mainās komponenta koncentrācija. No tā var secināt, ka lielāko pretestību komponenta pārejai fāzē rada difūzais apakšslānis. Šādā masas apmaiņā noteicošā ir molekulārā difūzija.

Difūzās robežkārtas modelī aktīvā komponenta plūsmas blīvums

$$q_m = \frac{D_1}{\delta_1'} (D_1 \nu_1)^b (Y_k - Y_r), \quad (10.34)$$

kur b — pakāpes rādītājs, kas atspoguļo fāzes turbulizācijas izmaiņu, tuvojoties starpfāžu saskares virsmai; D_1 — aktīvā komponenta difūzijas koeficients fāzē; v_1 — kinemātiskais viskozitātes koeficients.

Šajā modelī nav zināms, kā noteikt viskozā apakšslāņa biezumu δ'_1 un pakāpi b . Tādēļ vienādojums (10.34), tāpat kā vienādojumi (10.32) un (10.33), nav izmantojami aktīvā komponenta plūsmas blīvuma noteikšanai.

Salīdzinot šo divu modeļu raksturojumus, secināms, ka komponenta plūsmas blīvums proporcionāls starpībai starp komponenta koncentrācijām kodolā un uz fāžu saskares virsmas:

$$q_m = \beta_y (Y_k - Y_r). \quad (10.35)$$

Tādu pašu rezultātu iegūst arī *virsmas atjaunošanas modeļa* analizē.

Robežkārtas modelis izmantojams masas apmaiņas mehānisma izskaidrošanai sistēmām cietā viela—šķidrums (gāze). Masas apmaiņai starp cietu un šķidru (gāzes) fāzi (adsorbcija, žāvēšana, cietu vielu ekstrakcija, kristalizācija u. c.) pieņēmums par robežkārtu atbilst īstenībai, jo šķidrums (gāzes) plūsmas kustības ātrums gar cietas vielas virsmu samazinās un plūsmas raksturs ir laminārs.

Masas apmaiņa starp šķidrām fāzēm vai šķidru un gāzveida fāzi (absorbcija, šķidrums ekstrakcija, rektifikācija) īstenībā atšķiras no minētā modeļa. Nepārtrauktas robežkārtas esamība ir apšaubāma, patiesībā fāžu saskares virsma ir mainīga. Fiksētu robežu trūkums uz fāžu saskares virsmas piešķir šķidrums (gāzes) plūsmai īpatnēju raksturu, kuru sauc par *brīvo turbulenci*. Šādu plūsmu rada virpuļi, kuru ass perpendikulāras plūsmas asij. Virpuļi veicina masas pāreju starp fāzēm. Šādā masas apmaiņā noteicošā ir konvektīvā difūzija.

No aplūkotajiem modeļiem secināms, ka masas pāreja no vienas fāzes uz otru notiek molekulārās (robežkārtā) un konvektīvās (kodolā) difūzijas rezultātā.

10.2.5. Masas atdeves procesu vienādojums

Vienādojumā (10.35) aktīvā komponenta plūsmas blīvumu nosaka starpība $Y_k - Y_r$, turpretī otrai fāzei šī starpība izsakāma ar $X_r - X_k$. Šīs starpības uzskatāmas par masas pārvietošanās virzošo spēku fāzē. Pieņem, ka fāzes kodola koncentrācija $Y_k(X_k)$ ir vienāda ar fāzes darba koncentrāciju $Y(X)$, t. i., $Y_k = Y$ un $X_k = X$. Tādēļ par masas pārvietošanās virzošo spēku uzskatāma starpība $Y - Y_r$ vai $X_r - X$, un vienādojums (10.35) rakstāms šādi:

$$\begin{aligned} q_m &= \beta_y (Y - Y_r) = \beta_x (X_r - X) \quad \text{jeb} \\ q_m &= \beta_y \Delta Y = \beta_x \Delta X = \beta_1 \Delta C_1. \end{aligned} \quad (10.36)$$

Vienādojumu (10.36) sauc par *masas atdeves vienādojumu*, jo masas pārvietošanos vienā fāzē sauc par *masas atdevi*.

Vienādojumā (10.36)

$$Y > Y_r \quad \text{un} \quad X < X_r. \quad (10.37)$$

Proporcionalitātes koeficientu β sauc par *masas atdeves koeficientu* (indekss y vai x norāda, uz kuru fāzi β attiecas). Masas atdeves koeficients

$$\beta = \frac{q_m}{\Delta Y}.$$

Ja $Y - Y_r = 1$, tad $\beta = q_m$, t. i., *masas atdeves koeficients rāda, cik liels ir aktīvā komponenta plūsmas blīvums no fāzes kodola uz saskares virsmu, ja aplūkojamā fāzē virzošais spēks vienāds ar vienu.*

Masas atdeves koeficienta vienība atkarīga no koncentrācijas izteiksmes veida. Ja $[\Delta Y] = \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ un $[q_m] = \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$, tad

$$[\beta] = \frac{[q_m]}{[\Delta Y]} = \frac{\text{kg} \cdot \text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}.$$

$$\text{Ja } [\Delta C] = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \text{ tad } [\beta] = \frac{[q_m]}{[\Delta C]} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}} = \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Teorētiski masas atdeves koeficientu β iespējams noteikt, atrisinot konvektīvās masas atdeves vienādojumu sistēmu. Taču iespēja atrisināt šādas sistēmas ir ierobežota. Tādēļ bieži vien jāatsakās no teorētiskajiem pētījumiem un jāizlīdzas ar eksperimentiem.

Lietojot līdzības teorijas metodiku, eksperimentāli iegūst rezultātus, pēc kuriem var noteikt masas atdeves koeficientus masas apmaiņas aparātiem.

Masas atdeves koeficients, līdzīgi siltumatdeves koeficientam α , ir atkarīgs no daudziem mainīgiem lielumiem: no difūzijas koeficienta, iekārtas izmēriem, fāzes ātruma utt. Tādēļ masas atdeves koeficienta noteikšanai lieto kritēriālos vienādojumus.

Svarīgāko kritēriju iegūšanai masas apmaiņas procesiem izmanto vienādojumus (10.22), (10.29) un (10.36). Šiem vienādojumiem atmet minusa zīmi un diferencēšanas operatora zīmes. Vienādojumā (10.22) komponenta pārvietošanās virzienu n aizvieto ar ģeometriskā garumu l , tad iegūst šādus vienādojumus:

$$q_m = \beta C \quad \text{un} \quad q_m = D \frac{C}{l}.$$

Pielīdzinot vienādojumu labās puses, iegūst, ka $\beta C = D \frac{C}{l}$, t. i., *Nuselta kritēriju difūzijai:*

$$Nu_d = \frac{\beta l}{D}. \quad (10.38)$$

Nuselta kritērijs difūzijai Nu_d raksturo masas pārvietošanos fāzē, t. i., no fāzes kodola uz fāžu saskares virsmu — vai otrādi.

Konvektīvās difūzijas diferenciālvienādojums nestacionāram procesam X ass virzienā (no vienādojuma (10.29)) izsakāms šādi:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + \frac{\partial C}{\partial x} \omega_x = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}.$$

Dalot vienādojuma abas puses ar $D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$, iegūst bezdimensionālus kompleksus

$$\frac{\partial C \partial x^2}{\partial \tau D \partial^2 C}; \quad \frac{\partial C \omega_x \partial x^2}{\partial x D \partial^2 C}.$$

Iegūtajiem kompleksiem atmet diferenciēšanas operatora zīmes un x virzienu aizvieto ar ģeometrisko garumu l . Tad pēc saīsināšanas iegūst *Furjē kritēriju difūzijai*:

$$\frac{1}{Fo_d} = \frac{l^2}{D\tau} \quad \text{jeb} \quad Fo_d = \frac{D\tau}{l^2},$$

un *Peklē kritēriju difūzijai*:

$$Pe_d = \frac{\omega l}{D}.$$

Furjē kritērijs Fo_d ir vides koncentrāciju izmaiņas mērs, kas raksturo nestacionāru masas apmaiņas procesu.

Peklē kritērijs Pe_d ir attiecība starp konvektīvās un molekulārās difūzijas rezultātā pārgājušo vielas masu.

Peklē kritērijs ir divu kritēriju reizinājums:

$$Pe_d = Re Pr_d = \frac{\omega l}{v} \frac{v}{D} = \frac{\omega l}{D}.$$

Reinoldsa kritērijs Re ir hidrodinamiskais līdzības kritērijs, bet *Pranila kritērijs* Pr_d raksturo iekšējo berzes spēku ietekmi uz vielas difūziju:

$$Pr_d = \frac{v}{D} = \frac{\mu}{\rho D}.$$

Frūda kritērija $Fr = \frac{\omega^2}{gl}$ vietā masas apmaiņas procesos lieto *Galileja kritēriju*:

$$Ga_d = \frac{Re^2}{Fr} = \frac{gl^3}{v^2}.$$

Ar minētajiem līdzības kritērijiem konvektīvās difūzijas vienādojumu var izteikt kriteriālā veidā:

$$f(Nu_d, Re, Pr_d, Fo_d, Ga_d, G_1, G_2, \dots) = 0,$$

kur G_1, G_2, \dots — ģeometriskās līdzības simpleksi, kas vienādi ar iekārtas ģeometrisko izmēru l_1, l_2, \dots attiecību pret noteicošo izmēru l .

Nosakāmais kritērijs ir Nuselta kritērijs Nu_d , jo tikai tajā ietilpst masas atdeves koeficients, pārējie kritēriji ir noteicošie. Tādēļ rakstāma šāda sakarība:

$$Nu_d = f(Re, Pr_d, Fo_d, Ga_d, G_1, G_2, \dots). \quad (10.39)$$

Vienādojums (10.39) ir vispārīgais vienādojums. Konkrētam gadījumam tas var ievērojami mainīties.

Stacionāriem masas apmaiņas procesiem nav jāievēro Furjē kritērijs, tad vienādojums (10.39) iegūst šādu veidu:

$$Nu_d = f(Re, Pr_d, Ga_d, G_1, G_2, \dots).$$

Stacionāriem procesiem ar brīvo konvekciju neievēro arī Reinoldsa kritēriju, tad

$$Nu_d = f(Pr_d, Ga_d, G_1, G_2, \dots).$$

Ja fāžu plūsma ir piespiedu plūsma, tad smaguma spēka ietekme ir niecīga un atkrit Galileja kritērijs, t. i.,

$$Nu_d = f(Re, Pr_d, G_1, G_2, \dots).$$

Tāpat kā siltuma atdeves procesos, šo funkciju izsaka kā pakāpju funkciju, t. i.,

$$Nu_d = C Re^m Pr_d^n G_1^k G_2^p \dots$$

Eksperimentu rezultātā nosaka koeficientu C un pakāpes m, n, k un p , tad no pēdējā vienādojuma aprēķina Nuselta kritēriju un, izmantojot sakarību $\beta = Nu_d \frac{D}{l}$, iegūst masas atdeves koeficienta skaitlisko vērtību.

Vispārīgam masas atdeves gadījumam lietojams vienādojums (10.39), kuru arī izsaka kā pakāpju funkciju:

$$Nu_d = A Re^h Pr_d^p Fo_d^s Ga_d^t G_1^u G_2^z \dots$$

Izdarot aprēķinus, līdzības kritērijos ietilpstošie lielumi izsakāmi šādi: β — masas atdeves koeficients, m/s; D — difūzijas koeficients, m^2/s ; ω — vides ātrums, m/s; l — iekārtas noteicošais izmērs, m; v — kinemātiskais viskozitātes koeficients, m^2/s ; ρ — blīvums, kg/m^3 ; τ — norises ilgums, s; g — brīvās krišanas paātrinājums, m/s^2 .

10.2.6. Masas pāreja (pārnese)

Masas pārejas pamatvienādojums. Masas pāreja no vienas fāzes uz otru saistīta ar masas atdevi pirmajā fāzē, pāreju cauri fāžu saskares virsmai un masas atdevi otrajā fāzē.

So parādību raksturo vienādojumu sistēma, kas pamatojas uz vienādojumu (10.36) un nevienādību (10.37):

$$q_m = \beta_y(Y - Y_r), \quad q_m = \beta_x(X_r - X). \quad (10.40)$$

Katrs no šiem vienādojumiem raksturo masas plūsmas blīvumu attiecīgajā fāzē (masas atdevi), kas virzīta no fāzes kodola uz saskares virsmu — un otrādi. Vienādojumu sistēma satur trīs nezināmus lielumus — komponenta plūsmas blīvumu q_m un koncentrācijas Y_r un X_r . Tādēļ pieņem, ka uz fāžu saskares virsmas aktīvais komponents sasniedz līdzsvara koncentrāciju, t. i., $Y_r = Y^*$ un $X_r = X^*$. Tad vienādojumus (10.2) un (10.5) var izteikt ar robežkoncentrācijām Y_r un X_r , t. i.,

$$Y_r = A_1 X_r + B_y, \quad (10.41)$$

$$X_r = A_2 Y_r + B_x. \quad (10.42)$$

No vienādojumiem (10.40) un (10.41) iegūst šādu vienādojumu sistēmu:

$$q_m \frac{1}{\beta_y} = Y - Y_r,$$

$$q_m \frac{1}{\beta_x} = X_r - X,$$

$$Y_r = A_1 X_r + B_y.$$

Otro vienādojumu reizinot ar A_1 , pieskaitot tam un atņemot no tā B_y , un vadoties no sistēmas trešā vienādojuma, iegūst

$$q_m \frac{A_1}{\beta_x} = A_1 X_r - A_1 X = A_1 X_r + B_y - (A_1 X + B_y) = Y_r - (A_1 X + B_y).$$

Ja iegūto vienādojumu saskaita ar sistēmas pirmo vienādojumu, tad

$$q_m \left(\frac{1}{\beta_y} + \frac{A_1}{\beta_x} \right) = Y - (A_1 X + B_y). \quad (10.43)$$

Pieņem, ka $1/\beta_y + A_1/\beta_x = \frac{1}{k_y}$. Ievērojot vienādojumu (10.2), iegūst

$$q_m = k_y(Y - Y^*). \quad (10.44)$$

Ja komponenta pārejai no vienas fāzes uz otru lieto šādu vienādojumu sistēmu

$$q_m \frac{1}{\beta_y} = Y - Y_r,$$

$$q_m \frac{1}{\beta_x} = X_r - X,$$

$$X_r = A_2 Y + B_2,$$

tad, pareizinot pirmo vienādojumu ar A_2 un izdarot analogas darbības kā iepriekš, iegūst

$$q_m \left(\frac{1}{\beta_x} + \frac{A_2}{\beta_y} \right) = (A_2 Y + B_2) - X. \quad (10.45)$$

Pieņem, ka $\frac{1}{\beta_x} + \frac{A_2}{\beta_y} = \frac{1}{k_x}$. Ievērojot vienādojumu (10.5), iegūst, ka

$$q_m = k_x (X^* - X). \quad (10.46)$$

Attiecinot masas pāreju uz visu fāžu saskares virsmu, vienādojumā (10.20) q_m vietā ievietojot izteiksmi no vienādojuma (10.44) vai (10.46), iegūst

$$dG = k_y \Delta Y dS. \quad (10.47)$$

Sā vienādojuma integrālis atbilst aktīvā komponenta plūsmas sadalījumam pa visu fāžu saskares virsmu

$$G = \int_S k_y \Delta Y dS.$$

Ja pieņem, ka $k_y = \text{const}$, tad

$$G = k_y \int_S \Delta Y dS.$$

Saskaņā ar teorēmu par vidējiem lielumiem

$$\int_S \Delta Y dS = \Delta Y_{\text{vid}} S.$$

Vienādojums aktīvā komponenta masas plūsmas noteikšanai, kura izplūst cauri visai fāžu saskares virsmai, ir

$$G = k_y \Delta Y_{\text{vid}} S, \quad (10.48)$$

vai, izsakot virzošo spēku ar šķidrās fāzes koncentrāciju,

$$G = k_x \Delta X_{\text{vid}} S. \quad (10.49)$$

Vienādojumus (10.48) un (10.49) sauc par *masas pārejas pamatvienādojumiem*. Šie vienādojumi līdzīgi siltuma pārejas vienādojumam $\Phi = k \Delta t_{\text{vid}} S$. Tas izskaidrojams ar to, ka siltuma apmaiņas un masas apmaiņas procesi ir analogi.

Koeficientus k_y un k_x sauc par *masas pārejas koeficientiem*. Koncentrāciju starpības $\Delta = \Delta Y = Y - Y^*$ un $\Delta = \Delta X = X^* - X$ ir *masas pārejas virzošais spēks*.

No vienādojuma (10.48) masas pārejas koeficienta vienība:

$$[k] = \frac{[G]}{[\Delta Y S]} = \frac{\text{kg (vai mol)}}{\text{s} \cdot (\text{virzošā spēka vienība}) \cdot \text{m}^2}.$$

No šīs izteiksmes izriet, ka *masas pārejas koeficients izsaka vielas masas plūsmu, kas pārvietojas no vienas fāzes uz otru cauri fāžu*

saskares virsmas vienībai, attiecinot to uz procesa virzošā spēka vienību.

Ja procesa virzošā spēka vienība $\Delta = \Delta \bar{C}$ izteikta kilogramos uz kubikmetru (kg/m^3), tad

$$[k_c] = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2} = \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Biežāk procesa virzošo spēku izsaka ar molāro sastāvu, t. i., $\Delta = \Delta Y = Y - Y^*$ vai $\Delta = \Delta X = X^* - X$ (procesa virzošo spēku izsakot molos uz molu $\left(\frac{\text{mol}}{\text{mol}}\right)$); tad masas pārejas koeficienta vienība:

$$[k_y] = \frac{\text{mol}}{\text{s} \cdot \frac{\text{mol}}{\text{mol}} \cdot \text{m}^2} = \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}},$$

Ja $\Delta \bar{F}$ izteikts kilogramos uz kilogramu $\left(\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right)$, tad

$$[k_y] = \frac{\text{kg} \cdot \text{kg}}{\text{s} \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^2} = \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}.$$

Masas pārejas koeficienti k_y un k_x ir savā starpā saistīti. Vienādojumu (10.45), ievērojot sakarību (10.4), var pārveidot šādi:

$$\frac{1}{k_x} = \frac{1}{\beta_x} + \frac{A_2}{\beta_y} = \frac{1}{\beta_x} + \frac{1}{A_1 \beta_y} = \frac{1}{A_1} \left(\frac{1}{\beta_y} + \frac{A_1}{\beta_x} \right).$$

Ievērojot vienādojumu (10.43), iegūst, ka

$$\frac{1}{k_x} = \frac{1}{A_1} \frac{1}{k_y}$$

vai ka sakarība starp masas pārejas koeficientiem, kas izteikti ar šķidrās fāzes un gāzveida fāzes koncentrācijām, ir šāda:

$$k_x = A_1 k_y.$$

Vienādojumā (10.47) koncentrāciju starpības $\Delta Y = Y - Y^*$ raksturo masas apmaiņas procesa virzošo spēku. To pierāda šāds piemērs.

Ja no gāzveida fāzes (10.9. att.) uz šķidro fāzi pārvietojas j molekulas un no šķidrās fāzes uz gāzveida fāzi tāpat j molekulas, tad iestājas līdzsvars, t. i., $j = Y^*$.

Paaugstinot gāzveida fāzē difundējošās vielas koncentrāciju par i molekulām, pastiprinās šīs vielas pāreja šķidrājā fāzē. No tā izriet, ka procesa virzošais spēks nav atkarīgs no kopējā molekulu skaita $j+i$ (t. i., Y), bet no molekulu skaita i (t. i., ΔY), kas ir virs līdzsvara koncentrācijas.

Virzošais spēks masas apmaiņas procesos izsakāms ar vienas vai otras fāzes koncentrāciju. 10.10. attēlā parādīti difūzijas procesu virzošā spēka grafiskās izteiksmes veidi. Visos masas apmaiņas procesos

virzošais spēks ir starpība starp darba un līdzsvara koncentrāciju ($\Delta Y = Y - Y^*$) vai, lietojot otras fāzes koncentrāciju, virzošais spēks izsakāms šādi: $\Delta X = X^* - X$.

Masas pārejas procesa vidējais virzošais spēks. Vienādojumos (10.48) un (10.49) $Y - Y^*$ vai $X^* - X$ raksturo masas apmaiņas procesa virzošo spēku (vidējo koncentrāciju) tad, ja darba koncentrācija (Y vai X) visos aparāta šķērsgriezumos paliek nemainīga. Reālos apstākļos darba koncentrācija masas apmaiņas aparātos mainās (10.10. att.). Tādos gadījumos vienīgais masas apmaiņas procesa raksturotājs ir vidējais virzošais spēks. Vidējo virzošo spēku parasti aprēķina, vadoties no pārnesto vienību skaita. Pārnesto vienību skaitu nosaka, ievērojot vienas fāzes aktīvā komponenta koncentrācijas maiņu.

Masas pārejas vienādojums gāzveida fāzei ir šāds (vienādojums (10.47)):

$$dG = k_Y \Delta Y dS.$$

No vienādojuma (10.6), pieņemot, ka $G_Y = \text{const}$, iegūst

$$dG = -G_Y dY.$$

No šiem diviem vienādojumiem, ievērojot, ka $\Delta Y = Y - Y^*$, var rakstīt

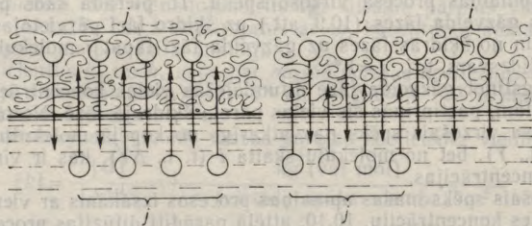
$$dS = -\frac{G_Y}{k_Y} \frac{dY}{Y - Y^*}.$$

Pieņemot, ka $k_Y = \text{const}$ un gāzveida fāze ieplūst aparātā ar sākuma koncentrāciju Y_s un izplūst no tā ar koncentrāciju Y_b , tad

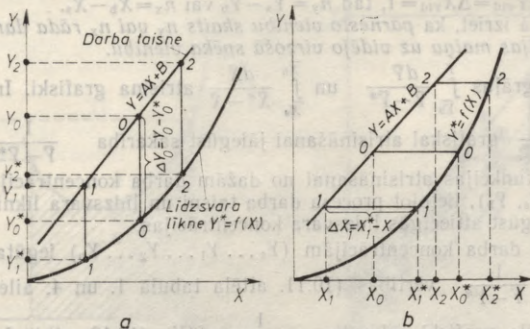
$$\int_0^S dS = -\frac{G_Y}{k_Y} \int_{Y_s}^{Y_b} \frac{dY}{Y - Y^*} = \frac{G_Y}{k_Y} \int_{Y_b}^{Y_s} \frac{dY}{Y - Y^*}.$$

Integrāli apzīmē ar n_Y :

$$n_Y = \int_{Y_b}^{Y_s} \frac{dY}{Y - Y^*}. \quad (10.50)$$



10.9. att. Masas pārejas procesa shēma.



10.10. att. Difūzijas procesu virzošā spēka izteiksmes veidi:
 a — virzošais spēks izteikts ar gāzveida fāzes koncentrāciju, b — virzošais spēks izteikts ar šķidrās fāzes koncentrāciju.

To sauc par *pārnesto vienību skaitu*.

Ievērojot vienādojumu (10.17), ka $G_y = \frac{G}{Y_s - Y_b}$, iegūst, ka

$$S = \frac{G_y}{k_y} n_y = \frac{G}{k_y} \frac{n_y}{\bar{Y}_s - \bar{Y}_b}, \quad (10.51)$$

no kurienes

$$G = k_y \frac{\bar{Y}_s - \bar{Y}_b}{n_y} S = k_y \frac{\bar{Y}_s - \bar{Y}_b}{\int_{\bar{Y}_b}^{\bar{Y}_s} \frac{d\bar{Y}}{\bar{Y} - \bar{Y}^*}} S. \quad (10.52)$$

Salīdzinot iegūto vienādojumu ar vienādojumu (10.48), redzams, ka

$$\Delta \bar{Y}_{vid} = \frac{\bar{Y}_s - \bar{Y}_b}{\int_{\bar{Y}_b}^{\bar{Y}_s} \frac{d\bar{Y}}{\bar{Y} - \bar{Y}^*}} = \frac{\bar{Y}_s - \bar{Y}_b}{n_y}. \quad (10.53)$$

Analogiski iegūstams pārnesto vienību skaits arī otrai fāzei

$$n_x = \int_{\bar{X}_s}^{\bar{X}_b} \frac{d\bar{X}}{\bar{X}^* - \bar{X}} \quad \text{un} \quad \Delta \bar{X}_{vid} = \frac{\bar{X}_b - \bar{X}_s}{\int_{\bar{X}_s}^{\bar{X}_b} \frac{d\bar{X}}{\bar{X}^* - \bar{X}}} = \frac{\bar{X}_b - \bar{X}_s}{n_x}$$

$$\text{vai} \quad n_x = \frac{\bar{X}_b - \bar{X}_s}{\Delta \bar{X}_{vid}}.$$

Ja $\Delta \bar{Y}_{\text{vid}} = \Delta \bar{X}_{\text{vid}} = 1$, tad $n_y = \bar{Y}_s - \bar{Y}_b$ vai $n_x = \bar{X}_b - \bar{X}_s$.

No tā izriet, ka *pārnesto vienību skaits* n_y vai n_x rāda darba koncentrācijas maiņu uz vidējo virzošā spēka vienību.

Integrāļus $\int_{\bar{Y}_b}^{\bar{Y}} \frac{d\bar{Y}}{\bar{Y} - \bar{Y}^*}$ un $\int_{\bar{X}_s}^{\bar{X}_b} \frac{d\bar{X}}{\bar{X}^* - \bar{X}}$ atrisina grafiski. Integrāļa $\int_{\bar{Y}_b}^{\bar{Y}} \frac{d\bar{Y}}{\bar{Y} - \bar{Y}^*}$ grafiskai atrisināšanai jāiegūst sakarība $\frac{1}{\bar{Y} - \bar{Y}^*} = f(\bar{Y})$.

Šīs funkcijas atrisināšanai no dažām darba koncentrācijām (robežās \bar{Y}_s, \bar{Y}_b), lietojot procesa darba taisni un līdzsvara likni (10.11. att.), iegūst attiecīgās līdzsvara koncentrācijas.

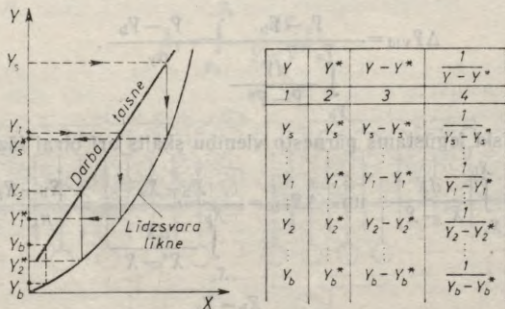
Kad darba koncentrācijām ($Y_s \dots Y_1 \dots Y_2 \dots Y_b$) iegūtas atbilstošās $\frac{1}{Y - Y^*}$ vērtības (10.11. attēla tabulā 1. un 4. ailes dati),

tad attēlo grafiski sakarību $\frac{1}{Y - Y^*} = f(Y)$ (10.12. att.). Laukumu S' , kuru ierobežo koncentrācijas Y_b un Y_s , pareizinot ar diagrammas mērogu M_{xy} (laukuma vienības skaitlisko vērtību, sk. 301. lpp.), iegūst integrāļa skaitlisko vērtību, t. i.,

$$S' M_{xy} = \int_{Y_b}^{Y_s} \frac{dY}{Y - Y^*}.$$

Pārnesto vienību skaitu n_y iespējams noteikt grafiski tieši no $Y-X$ diagrammas (10.13. att.). Šī metode lietojama tikai tad, ja posms, kas atbilst vienam pakāpienam līdzsvara liknē, daudz neatšķiras no taisnes. Pretējā gadījumā jāmeklē sakarība $\frac{1}{Y - Y^*} = f(Y)$, kā tas parādīts 10.11. attēlā.

Ja AB ir līdzsvara likne, bet CD — procesa darba taisne, tad, lai iegūtu pārnesto vienību skaitu n_y , starp darba taisni un līdzsvara



10.11. att. Sakarība starp darba koncentrāciju un līdzsvara koncentrāciju.

No darba taisnes un līdzsvara liknes vienādojumiem var rakstīt

$$dY = A dX \quad \text{un} \quad dY^* = A' dX.$$

Atņemot no pirmā vienādojuma otro vienādojumu, iegūst

$$d(Y - Y^*) = (A - A') dX = \frac{A - A'}{A} dY.$$

Ja apzīmē $Y - Y^* = \Delta Y$, tad

$$dY = \frac{A}{A - A'} d(\Delta Y).$$

Saskaņā ar vienādojumu (10.50)

$$n_y = \int_{Y_b}^{Y_s} \frac{dY}{Y - Y^*} = \frac{A}{A - A'} \int_{\Delta Y_b}^{\Delta Y_s} \frac{d(\Delta Y)}{\Delta Y} \quad \text{vai}$$

$$n_y = \frac{A}{A - A'} \ln \frac{\Delta Y_s}{\Delta Y_b}. \quad (10.54)$$

No trijstūriem 1-2-3 un abc (10.14. att.) var rakstīt

$$A = \operatorname{tg} \alpha = \frac{2-3}{1-3} = \frac{Y_s - Y_b}{X_b - X_s}; \quad A' = \operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{bc}{ac} = \frac{Y^*_s - Y^*_b}{X_b - X_s}, \quad \text{tad}$$

$$\frac{A}{A - A'} = \frac{Y_s - Y_b}{(X_b - X_s) \left(\frac{Y_s - Y_b}{X_b - X_s} - \frac{Y^*_s - Y^*_b}{X_b - X_s} \right)}$$

$$= \frac{Y_s - Y_b}{(Y_s - Y^*_s) - (Y_b - Y^*_b)} = \frac{Y_s - Y_b}{\Delta Y_s - \Delta Y_b}.$$

Vienādojumu (10.54) var pārveidot šādi:

$$n_y = \frac{Y_s - Y_b}{\Delta Y_s - \Delta Y_b} \ln \frac{\Delta Y_s}{\Delta Y_b} = (Y_s - Y_b) \frac{\ln \frac{\Delta Y_s}{\Delta Y_b}}{\Delta Y_s - \Delta Y_b} \quad \text{vai}$$

$$\frac{Y_s - Y_b}{n_y} = \frac{\Delta Y_s - \Delta Y_b}{\ln \frac{\Delta Y_s}{\Delta Y_b}}.$$

No vienādojuma (10.53) $\Delta Y_{\text{vid}} = \frac{Y_s - Y_b}{n_y}$ un no pēdējā vienādojuma iegūst

$$\Delta Y_{\text{vid}} = \frac{\Delta Y_s - \Delta Y_b}{\ln \frac{\Delta Y_s}{\Delta Y_b}} = \frac{\Delta Y_s - \Delta Y_b}{2,3 \lg \frac{\Delta Y_s}{\Delta Y_b}}.$$

Ja $\frac{\Delta Y_s}{\Delta Y_b} \leq 2$, tad ar kļūdu, kas nav lielāka par 4%, ΔY_{vid} aprēķina kā vidējo aritmētisko summu:

$$\Delta Y_{vid} = \frac{\Delta Y_s + \Delta Y_b}{2}.$$

Seit atkal redzama analogija starp siltuma apmaiņas un masas apmaiņas procesiem.

10.2.7. Masas apmaiņas aparātu aprēķinu pamati

Ķīmijas tehnoloģijā lietojamie masas apmaiņas aparāti iedalāmi divās lielās grupās:

1) *masas apmaiņas aparāti ar nepārtrauktu fāžu kontaktu* (aparāti ar pildījumu un plānu plūstošu šķidrums slāni);

2) *masas apmaiņas aparāti ar pakāpienveida fāžu kontaktu* (aparāti ar šķīvjiem).

Sādu aparātu aprēķiniem lieto masas pārejas pamatvienādojumus (10.48) un (10.49) pārveidotā (modificētā) veidā.

Masas pārejas pamatvienādojuma modificējumi aparātiem ar nepārtrauktu fāžu kontaktu. Aparāti, kuriem visā darba tilpumā fāžu kontakts paliek nepārtraukts, ir rektifikācijas kolonnas, adsorberi, adsorberi, ekstraktori un citi, kur darba tilpumā atrodas pildījuma slānis vai apstrādājamais materiāls. Pie šiem aparātiem pieder arī tādi aparāti, kur šķidrā fāze plūst plānā slānī un atrodas nepārtrauktā kontaktā ar gāzveida fāzi.

Minēto aparātu aprēķini saistīti ar jaunu jēdzienu — *fāžu saskares īpatnējo virsmu a*, kuru iegūst šādi:

$$a = \frac{S}{V},$$

kur S — fāžu saskares virsma, m^2 ; V — aparāta darba tilpums, m^3 .

Fāžu saskares īpatnējās virsmas vienība: $[a] = \frac{[S]}{[V]} = \frac{m^2}{m^3}$, t. i., *fāžu saskares virsma kvadrātmetros 1 m^3 aparāta darba tilpuma.*

Izmantojot fāžu saskares īpatnējo virsmu, aparāta darba tilpumu var aprēķināt no masas pārejas pamatvienādojuma:

$$G = k_y \Delta Y_{vid} a V. \quad (10.55)$$

Reizinājumu $k_y a = k_{yV}$ sauc par *masas pārejas tilpuma koeficientu.*

Ja $V = 1$ un $\Delta Y_{vid} = 1$, tad $k_{yV} = G$, tātad *masas pārejas tilpuma koeficients rāda aktīvā komponenta masas plūsmu cauri darba tilpuma vienībā esošajai starpjāžu virsmai, ja vides vidējais virzošais spēks vienāds ar vienu.*

No vienādojumiem (10.43) un (10.55) masas pārejas tilpuma koeficients izsakāms ar attiecīgiem masas atvešanas koeficientiem

$$\frac{1}{k_{yV}} = \frac{1}{k_y a} = \frac{1}{a} \left(\frac{1}{\beta_y} + \frac{A_1}{\beta_x} \right) = \frac{1}{a \beta_y} + \frac{1}{a \beta_x} A_1.$$

Pieņem, ka $a\beta_y = \beta_{yV}$ un $a\beta_x = \beta_{xV}$.

Lielums β_{yV} ir *masas atdeves tilpuma koeficients*, kas ir analogs masas pārejas tilpuma koeficientam k_{yV} . No iepriekš minētā iegūst, ka

$$\frac{1}{k_{yV}} = \frac{1}{\beta_{yV}} + \frac{A_1}{\beta_{xV}}, \quad (10.56)$$

un otrajai fāzei

$$\frac{1}{k_{xV}} = \frac{1}{\beta_{xV}} + \frac{A_2}{\beta_{yV}}.$$

Fāžu šķērsgriezums aparātā atbilst tā aktīvam (darba) laukumam S_a . Ja $S_a = \text{const}$, tad, ievērojot aparāta darba tilpumu V , iegūst masas apmaiņas aparāta darba augstumu (garumu) H , jo $V = S_a H$. Tad (tā kā $Va = S$)

$$S = aS_a H.$$

Ievērojot vienādojumu (10.51), iegūst

$$aS_a H = \frac{G_y}{k_y} n_y \quad \text{vai}$$

$$H = \frac{G_y}{k_y a S_a} n_y = \frac{G_y}{k_{yV} S_a} n_y, \quad (10.57)$$

kur $\frac{G_y}{k_{yV} S_a} = h_{oy}$ sauc par *pārnesto vienību augstumu*. Tad aparāta darba augstums

$$H = h_{oy} n_y.$$

Ja $n_y = 1$, tad $h_{oy} = H$, tātad h_{oy} rāda *aparāta darba augstumu (garumu), kurš atbilst pārnesto vienību skaita vienībai un kuru sauc par pārnesto vienību augstumu*.

No vienādojumiem (10.56) un (10.57) izsaka pārnesto vienību augstumu

$$\begin{aligned} h_{oy} &= \frac{G_y}{aS_a} \frac{1}{k_y} = \frac{G_y}{aS_a} \left(\frac{1}{\beta_y} + \frac{A_1}{\beta_x} \right) = \\ &= \frac{G_y}{\beta_y a S_a} + \frac{G_y A_1}{\beta_x a S_a} = \frac{G_y}{\beta_y a S_a} + \frac{G_x}{\beta_x a S_a} \frac{G_y A_1}{G_x}, \end{aligned}$$

kur G_x — otrās (šķidrās) fāzes patēriņš, kg/s vai mol/s.

Pieņem, ka

$$\frac{G_x}{A_1 G_y} = f_1. \quad (10.58)$$

Pirmo summas locekli $\frac{G_y}{\beta_y a S_a} = h_y$ sauc par *pirmās fāzes pārejas augstumu*, bet locekli $\frac{G_x}{\beta_x a S_a} = h_x$ — par *otrās fāzes pārejas aug-*

stumu. Sakarība starp pārnesto vienību augstumu un fāžu pārejas augstumu ir šāda:

$$h_{0y} = h_y + \frac{h_x}{f_1}.$$

Analogiski otrajai fāzei iegūst

$$h_{0x} = h_x + \frac{h_y}{f_2}, \quad (10.59)$$

$$\text{kur } f_2 = \frac{G_y}{A_2 G_x}.$$

Lielumus f_1 un f_2 sauc par *masas pārejas faktoriem*.

Absorbcijas procesos aprēķiniem lieto vienādojumu (10.58), bet rektifikācijas aprēķiniem — vienādojumu (10.59).

No vienādojuma (10.4) iegūst, ka $f_1 f_2 = 1$.

Masas pārejas pamatvienādojuma modificējumi aparātiem ar pakāpienveida fāžu kontaktu. Aparātus ar pakāpienveida fāžu kontaktu plaši lieto absorbcijas, rektifikācijas, ekstrakcijas, adsorbcijas, žāvēšanas un citos procesos. Šādi aparāti ir sekcijveida. Tie darbojas pretplūsmas režīmā. Aparāta katrā sekcijā, kuru sauc par *pakāpi (šķīvi)* vai *fāzes kontakta pakāpienu*, notiek nepārtraukts kontakts starp fāzēm. Katrā pakāpienā nepārtraukti atkārtojas viena un tā pati darbība. Pakāpienu skaita noteikšanai izmanto masas pārejas pamatvienādojumu (10.48)

$$G = k_y \Delta Y_{vid} S$$

un to pārveido šādi:

$$G = k_y \frac{S}{S_a} \Delta Y_{vid} S_a,$$

kur S_a — aparāta šķēluma aktīvais (darba) laukums; S/S_a — fāžu saskares virsma uz aktīvā laukuma vienību.

Reizinājumu

$$k_y \frac{S}{S_a} = k_{ys} \quad (10.60)$$

sauc par *masas pārejas virsmas koeficientu*. Tad

$$G = k_{ys} \Delta Y_{vid} S_a. \quad (10.61)$$

Ja $S_a = 1$ un $\Delta Y_{vid} = 1$, tad $k_{ys} = G$, tātad *koeficients k_{ys} raksturo aktīvā komponenta plūsmu caur aparāta aktīvā laukuma vienību, ja vidējais virzošais spēks vienāds ar vienu*.

Izsakot lielumu k_{ys} ar attiecīgiem masas atdeves koeficientiem (vienādojums (10.43)), iegūst

$$\frac{1}{k_{ys}} = \frac{1}{k_y} \frac{S_a}{S} = \frac{S_a}{S} \left(\frac{1}{\beta_y} + \frac{A_1}{\beta_x} \right) = \frac{S_a}{\beta_y S} + \frac{S_a}{\beta_x S} A_1. \quad (10.62)$$

Ja šajā summā locekļus apzīmē šādi:

$$\frac{\beta_y S}{S_a} = \beta_{ys} \quad \text{un} \quad \frac{\beta_x S}{S_a} = \beta_{xs}, \quad (10.62)$$

$$\text{tad} \quad \frac{1}{k_{ys}} = \frac{1}{\beta_{ys}} + \frac{A_1}{\beta_{xs}}. \quad (10.63)$$

Analogi otrajai fāzei

$$\frac{1}{k_{xs}} = \frac{1}{\beta_{xs}} + \frac{A_2}{\beta_{ys}}.$$

Koeficienti k_{ys} un β_{ys} ir analogiski, jo tos abus izsaka ar attiecību starp fāžu saskares virsmu, kas attiecināta uz aparāta aktīvā laukuma vienību.

No vienādojuma (10.51) $S = \frac{G_y}{k_y} n_y$ var rakstīt

$$n_y = \frac{k_y S}{G_y} = \frac{k_y S}{S_a} \cdot \frac{S_a}{G_y}.$$

Tā kā $\frac{k_y S}{S_a} = k_{ys}$, tad pārnesto vienību skaitu n_y , lietojot masas pārejas koeficientu, aprēķina pēc formulas

$$n_y = k_{ys} \frac{S_a}{G_y}. \quad (10.64)$$

Pakāpienu (šķīvju) skaita noteikšanas analītiskā metode. Fāžu patēriņus, sākuma un beigu koncentrācijas apzīmē šādi: gāzveida fāzei — G_y , Y_s un Y_b , bet šķidrājai fāzei — G_x , X_s un X_b . Vadoties no fāžu sākuma un beigu koncentrācijām un ievērojot vienādojumu (10.12), Y - X koordinātās zīmē darba taisni (10.15. att. a). Uz tās pašas diagrammas pēc rokasgrāmatas datiem zīmē līdzsvara likni.

Pieņem šādus apzīmējumus (10.15. att. b):

- 1) gāzveida fāzei: Y_j — koncentrācija, plūstot uz šķīvja j , un Y_{j+1} — aizplūstot no šī šķīvja: $Y_s = Y_1$ un $Y_b = Y_{n+1}$;
- 2) šķidrājai fāzei: X_j — koncentrācija, aizplūstot no šķīvja j , un X_{j+1} — plūstot uz šī šķīvja: $X_b = X_1$ un $X_s = X_{n+1}$.

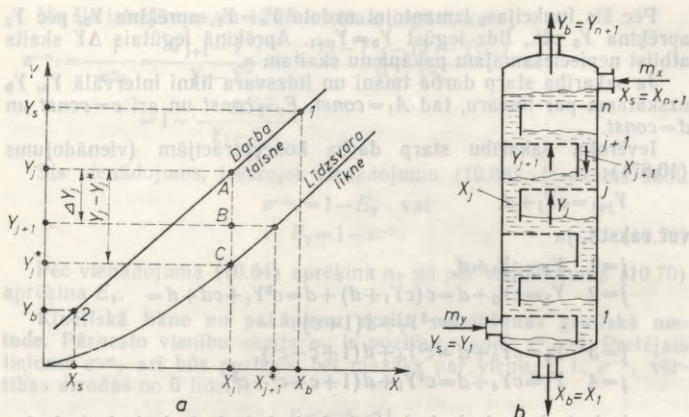
Koncentrācijas maiņas moduli attiecīgām fāzēm uz šķīvja j apzīmē ar ΔY_j un ΔX_j .

Aplūkojamā shēmā (10.15. att. a) $Y_j > Y_{j+1}$ un $X_j > X_{j+1}$, tādēļ

$$\Delta Y_j = Y_j - Y_{j+1} \quad \text{un} \quad \Delta X_j = X_j - X_{j+1}. \quad (10.65)$$

Pakāpienu (šķīvju) skaita noteikšanai lieto jēdzienu *pakāpiena (šķīvja) efektivitāte* E_y vai E_x . *Pakāpiena efektivitāte izsaka aplūkojamās fāzes darba koncentrācijas maiņu ΔY_j attiecībā pret virzošo spēku $Y_j - Y_j^*$, šai fāzei plūstot uz pakāpiena.* No definīcijas izriet, ka pakāpiena efektivitātes matemātiskā izteiksme ir šāda:

$$E_y = \frac{\Delta Y_j}{Y_j - Y_j^*} \quad \text{un} \quad E_x = \frac{\Delta X_j}{X_{j+1}^* - X_{j+1}}. \quad (10.66)$$



10.15. att. Pakāpienu (šķīvju) skaita noteikšanas princips.

Ja zināms E_y un izmanto vienādojumus (10.66), (10.12), (10.2) un (10.65), iegūt vienādojumu sistēmu:

$$\Delta Y_j = Y_j - Y_{j+1} \quad (\text{konzentrācijas maiņas modulis});$$

$$E_y = \frac{\Delta Y_j}{Y_j - Y_j^*} \quad (\text{pakāpiena efektivitāte});$$

$$Y_j^* = A_1 X_j + B_y \quad (\text{līdzsvara līknes vienādojums});$$

$$Y_j = A X_j + B \quad (\text{darba taisnes vienādojums}).$$

Izslēdzot starplielumus, šo sistēmu izsaka kā funkciju:

$$Y_{j+1} = c Y_j + d, \quad (10.67)$$

$$\begin{aligned} Y_{j+1} &= Y_j - \Delta Y_j = Y_j - E_y (Y_j - Y_j^*) = \\ &= Y_j - E_y (Y_j - A_1 X_j - B_y) = Y_j - \\ &- E_y \left(Y_j - A_1 \frac{Y_j - B}{A} - B_y \right) = \\ &= Y_j - E_y Y_j + E_y \frac{A_1}{A} Y_j - E_y \frac{A_1}{A} B + E_y B_y = \\ &= \left(1 - E_y + E_y \frac{A_1}{A} \right) Y_j + E_y \left(B_y - \frac{A_1}{A} B \right). \end{aligned}$$

Tad

$$c = 1 - E_y + E_y \frac{A_1}{A} \quad (10.68)$$

$$d = E_y \left(B_y - \frac{A_1}{A} B \right). \quad (10.69)$$

Pēc šīs funkcijas, izmantojot uzdoto $Y_s = Y_1$, aprēķina Y_2 , pēc Y_2 aprēķina Y_3 utt., līdz iegūst $Y_b = Y_{n+1}$. Aprēķinā iegūtais ΔY skaits atbilst nepieciešamajam pakāpienu skaitam n .

Ja sakarība starp darba taisni un līdzsvara līkni intervālā Y_s, Y_b uzskatāma par lineāru, tad $A_1 = \text{const}$, $E_y = \text{const}$ un arī $c = \text{const}$ un $d = \text{const}$.

Ievērojot sakarību starp darba koncentrācijām (vienādojums (10.67)):

$$Y_{j+1} = cY_j + d,$$

var rakstīt, ja

$$j=1 \quad Y_2 = cY_1 + d,$$

$$j=2 \quad Y_3 = cY_2 + d = c(cY_1 + d) + d = c^2Y_1 + cd + d = c^2Y_1 + d(1+c),$$

$$j=3 \quad Y_4 = cY_3 + d = c^3Y_1 + d(1+c+c^2),$$

$$j=4 \quad Y_5 = cY_4 + d = c^4Y_1 + d(1+c+c^2+c^3)$$

$$\dots \dots \dots$$

$$j=n \quad Y_{n+1} = cY_n + d = c^nY_1 + d(1+c+c^2+c^3+\dots+c^{n-1}).$$

Ģeometriskās progresijas locekļu summa ir

$$1 + c + c^2 + c^3 + \dots + c^{n-1} = \frac{1 - c^n}{1 - c}, \quad \text{tad}$$

$$Y_{n+1} = c^n Y_1 + d \frac{1 - c^n}{1 - c}.$$

No šejienes formula pakāpienu skaita n noteikšanai

$$n = \frac{(1-c)Y_{n+1} - d}{\lg c (1-c)Y_1 - d}.$$

Pakāpienu efektivitātes saistība ar pārnesto vienību skaitu. Šķidrajai fāzei saskaroties ar gāzi (tvaiku), var uzskatīt, ka uz šķīvjā šīs fāzes ideāli samaisās un sasniedz līdzsvaru. Pārnesto vienību skaits uz šķīvjā j (vienādojums (10.50)) ir

$$n_y = \int_{Y_{j+1}}^{Y_j} \frac{dY}{Y - Y_j^*}.$$

Ja sasniedz līdzsvaru uz šķīvjā, tad $dY = d(Y - Y_j^*)$ un pēdējo vienādojumu var pārrakstīt šādi:

$$n_y = \int_{Y_{j+1}}^{Y_j} \frac{d(Y - Y_j^*)}{Y - Y_j^*} = \ln \frac{Y_j - Y_j^*}{Y_{j+1} - Y_j^*}, \quad \text{tad}$$

$$\frac{Y_j - Y_j^*}{Y_{j+1} - Y_j^*} = e^{n_y}.$$

No šīs izteiksmes un 10.15. attēla a iegūst, ka

$$e^{-n_y} = \frac{1}{e^{n_y}} = \frac{Y_{j+1} - Y_j^*}{Y_j - Y_j^*} = \frac{Y_j - Y_j^* - (Y_j - Y_{j+1})}{Y_j - Y_j^*} = 1 - \frac{\Delta Y_j}{Y_j - Y_j^*}.$$

Sis vienādojums, ievērojot vienādojumu (10.66), izsakāms šādi:

$$e^{-n_y} = 1 - E_y \quad \text{vai} \\ E_y = 1 - e^{-n_y} \quad (10.70)$$

Pēc vienādojuma (10.64) aprēķina n_y un pēc vienādojuma (10.70) aprēķina E_y .

Kinētiskā likne un pakāpienu skaita noteikšanas grafiskā metode. Pārnesto vienību skaits n_y ir pozitīvs, tādēļ $e^{n_y} > 1$. Pretējais lielums e^{-n_y} arī būs pozitīvs, bet mazāks par vienu, t. i., e^{-n_y} vērtības atrodas no 0 līdz 1:

$$0 < e^{-n_y} < 1.$$

No vienādojuma (10.70) redzams, ka tādās pašās robežās mainās pakāpienu efektivitāte, t. i.,

$$0 < E_y < 1.$$

Tādēļ var noteikt punkta B atrašanās vietu uz nogriežņa AC (10.15. att. a). Nogrieznis AB proporcionāls ΔY_j , bet nogrieznis AC — starpībai $Y_j - Y_j^*$.

Ievērojot vienādojumu (10.66), var rakstīt

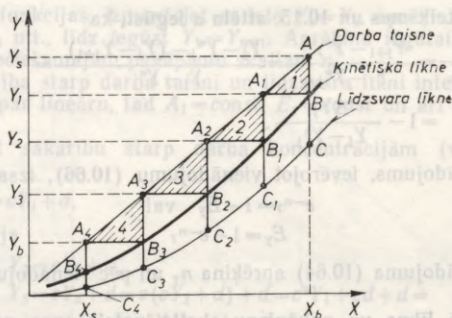
$$E_y = \frac{AB}{AC} \quad \text{vai} \\ AB = E_y AC. \quad (10.71)$$

No šī vienādojuma secināms, ka $0 < AB < AC$.

Koncentrācijai Y_j punkts $B(X_j, Y_{j+1})$ atrodas starp punktiem $A(X_j, Y_j)$ un $C(X_j, Y_j^*)$. Punkta B vietu nosaka E_y .

Ja visām Y koncentrācijām robežās (Y_b, Y_s) nosaka atbilstošās E_y vērtības, bet pēc tam, lietojot attiecīgos AC nogriežņus, pēc vienādojuma (10.71) aprēķina AB nogriežņus un iegūtos punktus B, B_1, B_2 utt. savieno, tad iegūst līniju BB_4 , kas atrodas starp līdzsvara līkni un darba taisni (10.16. att.). Iegūtās līknes pamatā ir pakāpienu efektivitāte, tādēļ tā rāda no pakāpieniem aizplūstošā tvaika un šķidrums faktisko koncentrāciju. Līkne raksturo procesa kinētisko pusi, tādēļ to sauc par *kinētisko līkni*.

Izmantojot kinētisko līkni, var noteikt faktiski nepieciešamo pakāpienu skaitu n : pēc uzdotās koncentrācijas Y_s iegūst punktu A (uz darba taisnes), novelk vertikāli AC (līdz līdzsvara līknei), pēc vienādojuma (10.70) aprēķina E_y un no vienādojuma (10.71) iegūto nogriezni AB atliek no punkta A uz leju, iegūstot punktu B . No



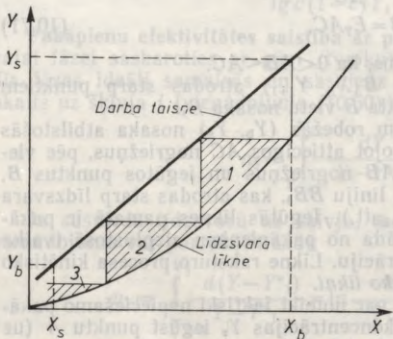
10.16. att. Kinētiskās līknes konstruēšana.

punkta B velkot horizontāli uz darba taisni, iegūst punktu A_1 . Aprēķinot A_1B_1 , iegūst punktu A_2 utt., līdz sasniedz vajadzīgo beigu koncentrāciju Y_b . Iesvītotie laukumi norāda nepieciešamo pakāpienu skaitu $n_f=4$, lai koncentrācija gāzes fāzei mainītos no Y_s līdz Y_b .

Teorētiskais koncentrācijas maiņas pakāpiens. Šķīvja lietderības koeficients. Ja pieņem, ka $E_y=1$, tad $AB=AC$ (vienādojums (10.71)). Tas nozīmē, ka darba koncentrācija, gāzveida fāzei aizplūstot no šķīvja j (10.15. att. *b*), ir vienāda ar līdzsvara koncentrāciju Y_j^* , t. i., $Y_{j+1}=Y_j^*$.

Pakāpienu, uz kura fāzes sasniedz līdzsvara koncentrācijas, sauc par *teorētisko koncentrācijas maiņas pakāpienu* jeb *teorētisko šķīvi*. Uz teorētiskā šķīvja koncentrācija gāzveida fāzei izmainījies par lielumu ΔY_j^t :

$$\Delta Y_j^t = Y_j - Y_j^*.$$



10.17. att. Teorētiskā šķīvju skaita grafiskā noteikšana.

Pieņemot, ka gāzveida fāzes koncentrācija uz pakāpiena j izmainās par ΔY_j (sk. vienādojumu (10.65)), tad, ja fāzes patēriņš G_y , komponenta patēriņš, kas pārvietojas uz šķīdro fāzi, ir

$$G_j = \Delta Y_j G_y.$$

Ja aplūkojamo pakāpienu aizvietotu teorētiskais pakāpiens (šķīvis), tad komponenta patēriņš, kas pārvietotos uz šķīdro fāzi, būtu šāds:

$$G_j^t = \Delta Y_j^t G_y = G_y (Y_j - Y_j^*).$$

Attiecība starp šīm masām ir *šķīvja lietderības koeficients*

$$\eta_j = \frac{G_j}{G_j^t} = \frac{\Delta Y_j}{Y_j - Y_j^*}.$$

Teorētisko šķīvju skaitu grafiski attēlo, pieņemot, ka uz šķīvjiem fāzes sasniedz līdzsvaru, t. i., pakāpienus velk starp darba taisni un līdzsvara likni (10.17. att.).

Izmantojot šķīvja lietderības koeficientu η , faktiski nepieciešamais šķīvju skaits

$$n_t = \frac{n_t}{\eta}.$$

kur n_t — teorētiski nepieciešamais šķīvju skaits, kas iegūstams no 10.17. attēla grafika (iesvitrotie pakāpieni, dotajā gadījumā $n_t = 3$).

10.2.8. Masas pāreja sistēmās ar cietu fāzi

Sistēmām ar cietu fāzi masas pāreju iedala

1) *masas atdevē*, kur difundējošā viela no plūsmas pārvietojas uz cietas vielas virsmu molekulārās un konvektīvās difūzijas rezultātā (process var tikt virzīts arī otrādi — no cietās fāzes uz šķidro fāzi), un

2) *masas vadīšanā*, kuras rezultātā difundējošā viela pārvietojas cietajā fāzē. Masas vadīšana ir ļoti sarežģīts process, un līdz šim laikam tā nav pietiekami izpētīta. Vielas masu, kas pārvietojas masas vadīšanas rezultātā, izsaka ar vienādojumu, kas analogs siltuma vadīšanas vienādojumam.

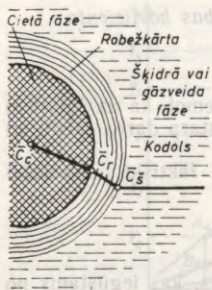
Masa m , kas masas vadīšanas rezultātā pārvietojas cauri cietās fāzes slānim, tieši proporcionāla cietās fāzes šķēlumam S , difundējošās vielas koncentrāciju starpībai uz cietās fāzes virsmām $\Delta \bar{C} = \bar{C}_c - \bar{C}_r$ un procesa ilgumam τ , bet apgriezti proporcionāla cietās fāzes biezumam δ :

$$m = D_m \frac{\Delta \bar{C}}{\delta} S \tau, \quad (10.72)$$

kur m — masa, kg; D_m — masas vadītspējas koeficients, m^2/s ; $\Delta \bar{C}$ — koncentrāciju starpība, kg/m^3 ; δ — cietās fāzes biezums, m; S — cietās fāzes virsma, m^2 ; τ — procesa ilgums, s.

Masas vadītspējas koeficients rāda, cik liela vielas masa masas vadīšanas rezultātā 1 sekundē pārvietojas cauri 1 m biežam cietās fāzes slānim ar šķēlumu 1 m^2 , ja koncentrāciju starpība cietās fāzes abās pusēs 1 kg/m^3 .

Var uzskatīt, ka vielas pārvietošanās no cietās fāzes uz šķidro (gāzveida) fāzi noris šādi: procesa sākumā difundējošās vielas koncentrācija visos cietās fāzes punktos ir konstanta (koncentrācijas gradients cietajā fāzē $\frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = 0$). Procesā laikā viela difundē no



10.18. att. Masas apmaiņa starp cieto un šķidro (gāzveida) fāzi.

cietās fāzes virsmas, kas tieši saskaras ar šķidro (gāzveida) fāzi. Vielai pārejot no cietās fāzes virsmas uz šķidro fāzi, cietajā fāzē koncentrācijas gradients mainās $\frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \neq 0$. Pēc bezgalīgi ilga laika difundējošās vielas koncentrācija cietajā fāzē sasniedz līdzsvaru, un process izbeidzas.

Masas apmaiņa starp cieto un šķidro (gāzveida) fāzi notiek pēc 10.18. attēla redzamās shēmas. Cietajā fāzē difundējošās vielas koncentrācija samazinās virzienā no centra uz saskares virsmu (vielas pārvietošanās notiek no cietās uz šķidro (gāzveida) fāzi). Cietajā fāzē viela pārvietojas masas vadīšanas rezultātā, un pārgājusi vielas masa izsakāma ar vienā-

dojumu (10.72).

Uz cietās fāzes virsmas veidojas šķidrums (gāzes) robežkārtā. Robežkārtā masa pārvietojas molekulārās difūzijas rezultātā. Uz robežkārtas ārējās virsmas pārejošās masas koncentrācija molekulārās un konvektīvās difūzijas rezultātā izlīdzinās un kļūst vienāda ar masas koncentrāciju šķidrās fāzes (gāzveida fāzes) kodolā. Aktīvā komponenta koncentrācija atsevišķos cietās fāzes punktos nepārtraukti samazinās vai pretējā procesa rezultātā palielinās. Minēto iemeslu dēļ procesi ar cietās fāzes līdzdalību uzskatāmi par nestacionāriem procesiem.

Vielas masa, kas pārvietojas robežkārtā, izsakāma ar masas atdeves vienādojumu un ir vienāda ar to vielas masu, kas masas vadīšanas rezultātā pārvietojas cietajā fāzē, tāpēc ka uz virsmas nenotiek vielas koncentrēšanās, t. i.,

$$m = \beta \Delta \bar{C} S \tau. \quad (10.73)$$

No vienādojumiem (10.72) un (10.73) iegūst, ka

$$D_m \frac{\Delta \bar{C}}{\delta} = \beta \Delta \bar{C}.$$

Dalot pēdējā vienādojuma labo pusi ar kreiso un δ vietā rakstot l , iegūst Bio kritēriju difūzijas procesiem cietās fāzes klātbūtnē:

$$Bi_d = \frac{\beta l}{D_m}. \quad (10.74)$$

Molekulārās difūzijas diferenciālvienādojums (10.31) lietojams arī sistēmām ar cieto fāzi, tikai tad difūzijas koeficients D jāapmaina ar masas vadīšanas koeficientu, t. i.,

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} = D_m \left(\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial z^2} \right). \quad (10.75)$$

Attiecībā uz abscisu asi vienādojums (10.75) izsakāms šādi:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} = D_m \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2}. \quad (10.76)$$

Vienādojums (10.76) rakstāms arī šādi:

$$\frac{\Delta \bar{C}}{\tau} = D_m \frac{\Delta \bar{C}}{l^2}.$$

Sā vienādojuma labo pusi dalot ar kreiso, iegūst Furjē kritēriju difūzijai sistēmā ar cieto fāzi:

$$F_{O_d} = \frac{D_m \tau}{l^2}.$$

Procesa kopējā kritēriālā vienādojuma sastādīšanai jāievēro koncentrāciju maiņa cietajā fāzē, kas nav ietverta *Bio* un *Furjē* kritērijos.

Koncentrācijas maiņu kritēriālajam vienādojumam izsaka bezdimensionālā attiecība $\frac{\bar{C}_s - \bar{C}_\tau}{\bar{C}_s - \bar{C}_s}$, kur \bar{C}_s, \bar{C}_τ — aktīvā komponenta koncentrācija cietajā fāzē sākumā un pēc laika τ ; \bar{C}_s — šķidrās fāzes koncentrācija (līdzplūsmas aparātiem $\bar{C}_s = \bar{C}'_s$, kur \bar{C}'_s — sākuma koncentrācija; pretplūsmas aparātiem $\bar{C}_s = \bar{C}'_b$, kur \bar{C}'_b — šķidrās fāzes koncentrācija, izplūstot no aparāta).

Difundējošās vielas koncentrācija cietajā fāzē visur nav vienāda un ir atkarīga no aplūkojamā punkta ģeometriskās vietas. Šādu stāvokli iespējams fiksēt, izmantojot ģeometrisko simpleksu. Lodveida cietai vielai šis simplekss izsakāms ar attiecību starp punkta attālumu no centra x un lodes rādiusu, t. i., $\frac{x}{r}$, vai lodes diametru, t. i., $\frac{2x}{d}$.

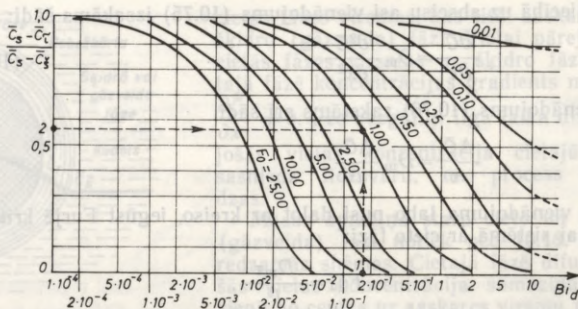
To ievērojot, kopējo kritēriālo vienādojumu sistēmām ar cieto fāzi var uzrakstīt šādi:

$$f \left(Bi_d, F_{O_d}, \frac{\bar{C}_s - \bar{C}_\tau}{\bar{C}_s - \bar{C}_s}, \frac{x}{r} \right) = 0.$$

Aplūkojot masas apmaiņu sistēmās ar cieto vielu, jāaprēķina procesa ilgums, kādā sasniegs vēlamu masas koncentrāciju cietajā fāzē. Tādēļ nosakāmais kritērijs ir Furjē kritērijs F_{O_d} un pārējie ir noteicošie kritēriji, t. i.,

$$F_{O_d} = f \left(Bi_d, \frac{\bar{C}_s - \bar{C}_\tau}{\bar{C}_s - \bar{C}_s}, \frac{x}{r} \right). \quad (10.77)$$

Šīs funkcijas noteikšanai lieto grafikus (10.19. att.), kas līdzīgi temperatūras lauka grafikiem cietā ķermenī (plāksnē, lodē vai cilindrā).



10.19. att. Sakarības $\frac{\bar{C}_s - \bar{C}_\tau}{\bar{C}_s - \bar{C}_s} = f(Bi_d)$ grafiskais attēlojums.

Furjē kritērija noteikšanai aprēķina masas atdeves koeficientu β , pēc tam nosaka masas vadīšanas koeficientu D_m . Zinot aplūkojamā ķermeņa veidu (lode, cilindrs, plāksne), var noteikt lineāro izmēru l (lodes un cilindra rādiusu, pusi no plāksnes biezuma) un aprēķināt Bio kritērija Bi_d vērtību. Tad var iegūt punktu l (10.19. att.).

Pieņemot cietajai fāzei nepieciešamo koncentrāciju \bar{C}_τ , aprēķina koncentrācijas simpleksa $\frac{\bar{C}_s - \bar{C}_\tau}{\bar{C}_s - \bar{C}_s}$ skaitlisko vērtību. Atliekot grafikā uz ordinātu ass iegūto lielumu, atzīmē punktu 2. Lietojot grafiku (10.19. att.), nosaka Furjē kritērija skaitlisko vērtību un aprēķina nepieciešamo procesa ilgumu $\tau = Fo_d \frac{l^2}{D_m}$.

11. ABSORBCIJA

11.1. SORBCIJAS PROCESU VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS

Vielas saistišanu uz divu fāžu saskares virsmas sauc par *sorbciju*.

Ķīmijas tehnoloģijā sorbciju lieto ļoti plaši, piemēram, SO_3 saistišana ar ūdeni sērskābes rūpniecībā; slāpekļa oksīdu saistišana ar ūdeni slāpekļskābes rūpniecībā; butadiēna sorbcija sintētiskā kaučuka rūpniecībā; deggāzes, koksas gāzes un citu gāzu attīrīšana no H_2S un no benzola; slāpekļa—ūdeņraža maisījuma attīrīšana no CO_2 un CO amonjaka sintēzes rūpniecībā; šķīdinātāju (spirta, acetona u. c.) reģenerācija u. tml.

Pie sorbcijas procesiem pieder *absorbcija*, *adsorbcija*, *kapilārā kondensācija* un *hemosorbcija*.

Absorbcija ir gāzveida fāzē vai tvaikā esošā komponenta saistišana ar šķidrumu. Absorbcijā ņem dalību divas fāzes — gāzveida un šķidrā. Viela no gāzveida fāzes pārvietojas uz šķidrumu un difūzijas rezultātā izkļiedējas pa visu šķidruma masu.

Adsorbcija ir gāzveida fāzē vai šķidrā fāzē ietilpstošā komponenta saistišana uz cietas vielas virsmas.

Kapilārā kondensācija ir dažu vielu tvaiku kondensācija cietas vielas kapilāros.

Apskatītie trīs sorbcijas veidi pieder pie *fizikālās sorbcijas*.

Hemosorbcija jeb *ķīmiskā sorbcija* ir gāzes saistišana ar šķidrumu vai cietu vielu, gāzei ar sorbentu veidojot ķīmisku savienojumu. Hemosorbcija novērojama arī uz katalizatoru virsmas.

Sorbcijai pretējo procesu — saistītās vielas izdalīšanu no šķidruma vai cietas vielas sauc par *desorbciju* jeb *eksorbciju*. So procesu lieto sorbentu reģenerēšanai, ja sorbents vai saistītā viela ir vajadzīga. Ja absorbcijas rezultātā iegūst šķidrumus, kas ir ražošanas galaprodukts, piemēram, svarīgāko neorganisko skābju iegūšana, tad desorbcija nav vajadzīga.

Vielas, kas saista gāzes vai šķidrumus, sauc par *sorbentiem* un attiecīgi iedala *absorbentos* un *adsorbentos*. Absorbcijas rezultātā iegūto produktu sauc par *absorbātu*.

Sorbcijas procesi ir selektīvi, t. i., katrs sorbents no vielu maisījuma saista tikai kādu noteiktu komponentu. So sorbentu īpašību izmanto gāzu vai šķidrumu maisījumu sadalīšanai. Sorbcijas procesus veicina temperatūras pazemināšana un spiediena paaugstināšana, bet desorbciju, gluži pretēji, veicina temperatūras paaugstināšana un spiediena pazemināšana.

Gāzu šķīdība. Sistēmas gāze—šķidrums un tvaiks—šķidrums, ar kādām jāstopas absorbcijas procesos, sastāv no trim komponentiem $K=3$ (absorbējamais komponents, gāzes inertā daļa un absorbents) un no divām fāzēm $L=2$ (gāzveida fāze un šķidrā fāze). Pēc fāžu likuma ($B=K+2-P$) šādu sistēmu līdzsvaru nosaka $B=3+2-2=3$ parametri. Noteicošie parametri ir absorbējamā komponenta koncentrācija x , parciālais spiediens virs šķidruma p un temperatūra t .

Ja temperatūra ir konstanta, tad iegūst sakarību, kas parāda gāzes šķīdības atkarību no spiediena. Tā izsakāma ar Henri likumu:

$$p = \psi x, \quad (11.1)$$

kur ψ — Henri konstante; x — izšķīdušā komponenta koncentrācija (moldaļās); p — parciālais spiediens līdzsvara stāvoklī, Pa vai mm Hg.

Henri likumam pakļaujas ideālie šķīdumi. Lielā atšķaidījumā visi šķīdumi tuvojas ideāliem, tādēļ Henri likums lietojams tikai atšķaidītiem šķīdumiem. Sis likums labi raksturo grūti šķīstošu gāzu līdzsvaru, jo tās veido atšķaidītus šķīdumus.

No minētā likuma, ja koncentrācija izteikta moldaļās, iegūstama izteiksme, kas parāda līdzsvara stāvoklī pastāvošo sakarību starp šķīstošā komponenta koncentrāciju gāzveida fāzē y^* un šķīdumā x :

$$y^* = Ax, \quad (11.2)$$

kur $A = \frac{\psi}{p_k}$ — fāžu līdzsvara konstante; p_k — kopējais spiediens.

No vienādojuma (11.2) redzams, ka atšķaidītiem šķīdumiem līdzsvara likne ir taisne, kas virzīta caur koordinātu sākumu un ar abscisu asi veido leņķi α , kura $\text{tg } \alpha = A$.

Ja koncentrāciju šķidrā un gāzveida fāzē izsaka kā relatīvās moldaļas, tad no Henri likuma iegūst šādu līdzsvara liknes vienādojumu:

$$y^* = \frac{AX}{1+X(1-A)}.$$

Koordinātu sistēmā $Y-X$, ja $A=1$, tad līdzsvara līnija sakrīt ar koordinātu leņķa bisektrisi; ja $A < 1$, tad līdzsvara līnija atrodas zem bisektrises, turpretī, ja $A > 1$, tad līdzsvara līnija ir virs bisektrises.

Absorbcijas mehānisms. Absorbcijas procesa mehānismu var izskaidrot ar robežkārtas hipotēzi (sk. 10. nodaļu). Absorbējamais komponents difundē cauri gāzveida fāzes un šķidrās fāzes robežkārtām šķīdumā, t. i., absorbentā. Difūzijas cēlonis ir šo komponentu koncentrāciju starpība abās fāzēs.

Gāzes absorbcijas procesā uz šķidrās fāzes virsmas ātri iestājas līdzsvars, jo absorbējamā komponenta difūzija cauri šķidruma robežkārtai ir ievērojami lēnāks process nekā šī paša komponenta difūzija cauri gāzveida fāzes robežkārtai. Kad šķidrās fāzes robežkārtā iestājas līdzsvars, tad tālākā absorbcija kļūst lēnāka. Tādēļ absorbcijas procesus intensificēšanai ieteicams nepārtraukti atjaunot gāzveida fāzes un šķidrās fāzes saskares virsmu. Absorbcijas iekārtās jāpanāk,

lai molekulārās difūzijas vietā būtu konvektīvā difūzija. Rūpniecības iekārtās to realizē, lietojot pretplūsmu ar noteiktu plūsmas ātrumu, ievietojot aparātā pildījuma slāņus, maisītājus, izsmidzinot absorbentu gāzveida fāzē u. c.

11.2. ABSORBCIJAS MATERIĀLĀ BILANCE UN ĪPATNĒJĀIS ABSORBENTA PATĒRIŅŠ

Absorbcijas procesa materiālo bilanci raksturo vienādojumi (10.17) un (10.18), kur G_y — laika vienībā izplūstošais gāzes inertās daļas patēriņš, kg/s; G_x — laika vienībā izplūstošais absorbenta patēriņš, kg/s; Y_s un Y_b — absorbējamā komponenta saturs gāzveida fāzē absorbcijas sākumā un beigās, $\frac{\text{kg absorbējamās vielas}}{\text{kg gāzes inertās daļas}}$; X_s un X_b — absorbējamā komponenta koncentrācija absorbentā procesa sākumā un beigās, $\frac{\text{kg absorbējamās vielas}}{\text{kg absorbenta}}$.

No procesa materiālās bilances (sk. vienādojumu (10.13)) *īpatnējais absorbenta patēriņš* ir izlietotie kilogrami absorbenta uz 1 kg inertās gāzes

$$b = \frac{G_x}{G_y} = \frac{Y_s - Y_b}{X_b - X_s}$$

Kopējais absorbenta patēriņš

$$G_x = b G_y$$

Absorbenta darba efektivitāti raksturo *absorbcijas koeficients* γ .

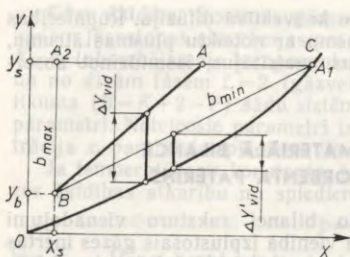
Pilnīgas absorbcijas gadījumā $Y_b = 0$ un absorbētā vielas masa sekundē ir $G_y Y_s$. Reālos apstākļos faktiski absorbētā vielas masa sekundē ir $G_y (Y_s - Y_b)$, kur $Y_b \neq 0$. *Attiecību starp faktiski absorbēto vielas masu sekundē un teorētiski iespējamo masu sekundē sauc par absorbcijas koeficientu:*

$$\gamma = \frac{G_y (Y_s - Y_b)}{G_y Y_s} = \frac{Y_s - Y_b}{Y_s} \quad (11.3)$$

Ja iekārtā absorbējas pilnīgi viss komponents, tad absorbcijas koeficients $\gamma = 1$. Reālos apstākļos $\gamma < 1$. Absorbcijas koeficientu iespējams paaugstināt, palielinot fāžu saskares virsmu vai īpatnējo absorbenta patēriņu.

No materiālās bilances iespējams iegūt absorbcijas procesa *darba līnijas vienādojumu*. *Absorbcijas procesa darba līnija, kas rāda, kā procesā mainās fāžu sastāvs attiecībā pret absorbējamā komponentu, ir taisne*. Absorbcijas procesa darba taisne konstruējama pēc vienādojuma (10.15), bet konstruēšanas principi redzami 10.4. attēlā.

Darba taisnes stāvokli diagrammā $Y-X$ ietekmē īpatnējais absorbenta patēriņš b . Atkarībā no īpatnējā absorbenta patēriņa darba



11.1. att. Īpatnējā absorbenta patēriņa robežas.

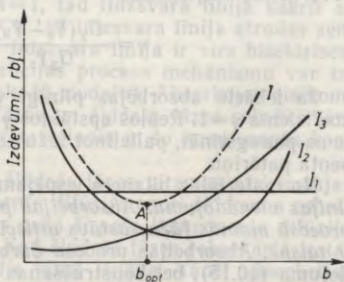
tot ar vertikāli BA_2 , nepieciešams bezgalīgi liels īpatnējais absorbenta patēriņš. Šajā stāvoklī procesa virzošais spēks ir maksimālais un nepieciešamā fāžu saskares virsma ir minimālā (nepieciešama maza absorbcijas iekārta). Darba taisnes stāvoklī A_1B un A_2B ir tās galējās robežas un praktiski nav izmantojami.

Īpatnējais absorbenta patēriņš reālos apstākļos vienmēr lielāks par minimālo patēriņu. Optimālo īpatnējo absorbenta patēriņu var noteikt, vadoties no tehniski ekonomiskiem apsvērumiem. Palielinoties absorbenta patēriņam, samazinās absorbera tilpums, bet palielinās desorbcijas un šķidrums pārsūkņēšanas izdevumi.

Summāros izdevumus absorberā uz 1 mol gāzes fāzes iespējams izteikt ar vienādojumu:

$$I = I_1 + I_2 + I_3,$$

kur I_1 — izdevumi, kas saistīti ar gāzes izmaksu, piegādi u. c. Šie izdevumi nav atkarīgi no īpatnējā absorbenta patēriņa. Atliekot šos izdevumus uz diagrammas izdevumi—īpatnējais absorbenta patēriņš, iegūst horizontālu taisni (11.2. att., I_1); I_2 — izdevumi, kas atkarīgi no absorbera izmēriem (amortizācija, remonts, enerģijas izmaksa gāzes transportēšanai cauri aparātam u. c.). Palielinot absorbenta patēriņu, samazinās absorbera augstums un hidrauliskā pretestība, bet vienlaikus palielinās absorbera diametrs. Sasniedzot noteiktu absorbenta patēriņu, absorbera diametrs sāk strauji palielināties. Tas izraisa ievērojamu izdevumu I_2 pieaugumu. Minēto iemeslu dēļ likne I_2 grafikā



11.2. att. Optimālā īpatnējā absorbenta patēriņa noteikšana.

virzās cauri minimumam (11.2. att. likne I_2). Likne I_3 ietver izdevumus, kas saistīti ar absorbenta pārsūknešanu, desorbcijas izdevumiem u.c. Palielinoties absorbenta patēriņam, pieaug izdevumi par absorbenta pārsūknešanu un desorbciju, tādēļ likne I_3 grafikā ir kāpjoša.

Summējot visas trīs izdevumu ordinātas, iegūst summāro izdevumu likni I 1 mol gāzes absorbcijai. Summārās liknes minimums (punkts A) atbilst optimālajam īpatnējam absorbenta patēriņam b_{opt} .

11.3. NEIZOTERMISKĀ ABSORBCIJA

Absorbcijas procesā izdalās siltums, tādēļ izotermiska absorbcija iespējama tikai tad, ja iekārtai pievada lielu absorbenta daudzumu salīdzinājumā ar absorbētā komponenta daudzumu vai arī ja labi aizvada siltumu no absorbera.

Absorbcijas procesos nav iespējams ignorēt izdalīto siltumu, un tādēļ procesu uzskata par *neizotermisku*.

Absorbcijas procesa neizotermiskums ietekmē

1) procesa līdzsvaru, jo gāzveida fāzes līdzsvars atkarīgs ne tikai no šķidrās fāzes sastāva, bet arī no temperatūras. Temperatūrai paaugstinoties, līdzsvara likne pārvietojas pa kreisi; tas izraisa procesa virzošā spēka samazināšanos;

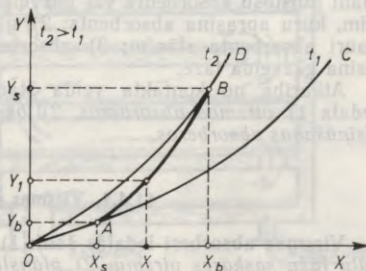
2) fāzēs līdz ar koncentrācijas gradientu ir arī temperatūras gradienti, kas ietekmē difūziju.

Ja absorbcijas procesā radušos siltumu neaizvada, tad līdzsvara likne temperatūrai t_1 (absorbenta temperatūra, gāzei izplūstot) atēlojama ar likni OC (11.3. att.). Ja, gāzei ieplūstot, absorbenta temperatūra ir t_2 , tad līdzsvara likne pārvietosies stāvoklī OD . Likne AB uzskatāma par procesa faktisko līdzsvara likni.

Lai konstruētu faktisko līdzsvara likni, jānosaka šķidrās fāzes sastāvam X atbilstošā līdzsvara koncentrācija gāzveida fāzē Y_1 . Tas izdarāms, nosakot līdzsvara temperatūru t šķīdumam ar sastāvu X . Temperatūras t noteikšanai sastāda siltuma bilanci absorbēra daļai starp gāzes ievadīšanas vietu un aplūkojamo šķēlumu:

$$r_A(\bar{Y}_s - \bar{Y}) = bc(t_2 - t), \quad (11.4)$$

kur r_A — šķīšanas siltums, kas atbrīvojas, šķīstot 1 molam vielas bezgalīgi lielā šķīduma tilpumā (aptuveni vienkārši ar attiecīgā komponenta kondensācijas siltumu); b — īpatnējais absorbenta patēriņš; c — absorbenta īpatnējā



11.3. att. Līdzsvara liknes konstruēšana neizotermiskai absorbcijai.

siltumietilpība; \bar{Y}_s , \bar{Y} — gāzveida fāzes koncentrācija, iekļūstot iekārtā un izraudzītā šķēlumā; t_2 , t — absorbenta temperatūra, izkļūstot no iekārtas un izraudzītā šķēlumā.

Ipatnējā absorbenta patēriņa vietā vienādojumā (11.4) ieliekot izteiksmi $b = \frac{\bar{Y}_s - \bar{Y}}{\bar{X}_b - \bar{X}}$, iegūst

$$r_A(\bar{X}_b - \bar{X}) = c(t_2 - t), \text{ tad}$$

$$t = t_2 - \frac{r_A}{c}(\bar{X}_b - \bar{X}). \quad (11.5)$$

Faktiskās līdzsvara liknes konstruēšanai izvēlas vairākas \bar{X} vērtības robežās no \bar{X}_s līdz \bar{X}_b un pēc vienādojuma (11.5) aprēķina atbilstošās šķīduma temperatūras. Pēc \bar{X} un t vērtībām no tabulām iegūst attiecīgos absorbējamā komponenta tvaika parciālos spiedienus p_A un aprēķina atbilstošo \bar{Y} vērtību pēc formulas

$$\bar{Y} = \frac{p_A}{1,013 \cdot 10^5 - p_A - p_{ab}}, \quad (11.6)$$

kur p_{ab} — absorbenta tvaika spiediens temperatūrā t , Pa.

Pēc faktiskās līdzsvara liknes konstruēšanas darba taisnes aprēķinu, kā arī pārējos aprēķinus izdara tāpat kā izotermiskajam absorbcijas procesam.

11.4. ABSORBERU VEIDI UN KONSTRUKCIJA

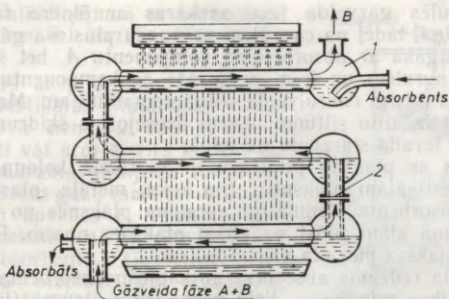
Kā jau minēts, absorbētā vielas masa ir tieši proporcionāla fāžu saskares virsmas laukumam, tādēļ rūpniecībā lietojamie absorberi veidoti ar lielu fāžu saskares virsmu. Jo komponents grūtāk šķīst, jo labākai jābūt saskarei starp fāzēm.

Nepieciešamo kontaktu starp fāzēm iegūst pēc vairākiem paņēmieniem: 1) gāzes plūsmu vada virs absorbenta limeņa, gar plānā slānī plūstošu absorbentu vai gāzveida fāzi laiž cauri pildījuma slānim, kuru aprasina absorbents; 2) gāzveida fāzi burbuļo (*barbotē*) cauri absorbenta slānim; 3) absorbentu sīku pilienu veidā izsmidzina gāzveida fāzē.

Atkarībā no kontakta veida starp fāzēm absorbcijas iekārtas iedalā 1) *virsmas absorberos*, 2) *barbotāžas absorberos*, 3) *izsmidzināšanas absorberos*.

11.4.1. Virsmas absorberi

Virsmas absorberi iedalās šādi: 1) *virsmas absorberi ar horizontālu fāžu saskares virsmu*; 2) *plānslāņa absorberi*; 3) *absorberi ar pildījuma slāni* (ar stacionāru pildījuma slāni); 4) *mehāniskie plānslāņa absorberi*.



11.4. att. Kvarca absorbers ar ūdens dzesēšanu.

Virsmas absorberi ar horizontālu fāžu saskares virsmu. Pie šīs grupas pieder turilas, celāriji, kvarca un grafiņa absorberi. Masas apmaiņa notiek caur lēni plūstošu absorbenta horizontālo virsmu. 11.4. un 11.5. attēlā parādīti plašāk lietojamie šīs grupas absorberi.

Hlorūdeņraža absorbcijai lieto kvarca (arī faolīta u. c.) absorberus (11.4. att.), kuru ārējo virsmu dzesēšanas nolūkā aprasina ar ūdeni. Absorbents izveidots no atsevišķiem elementiem 1, kurus savieno rindā tā, lai elementi atrastos cits virs cita. Absorbenta līmeni elementā uztur pārtece 2.

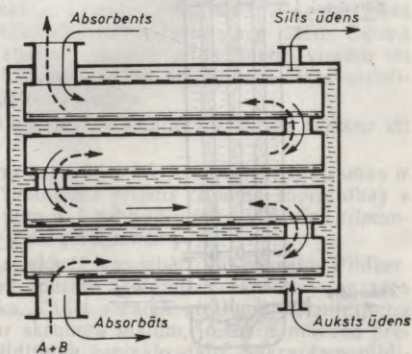
11.5. attēlā redzams grafiņa absorbers ar ūdens dzesēšanu, kurā ūdens plūst starp grafiņa plāksnēm.

Aplūkotie absorberi ir mazefektīvi un netiek plaši lietoti. Tos lieto nelielu daudzumu labi šķīstošu gāzu absorbcijai.

Plānslāņa absorberi.

Absorbēcija šī veida aparātos notiek uz absorbenta plāna slāņa, kas plūst pa vertikālu cauruļu vai plāksņu virsmu. Plānslāņa absorberi pēc masas apmaiņas procesa norises un saskares virsmas lieluma efektīvāki par kvarca un grafiņa absorberiem.

11.6. attēlā parādīts cauruļveida plānslāņa absorbers. Pa cauruļu 1 iekšējo virsmu absorbents nepārtraukti plānā slānī plūst uz leju. Pretējā virzienā pa cauruļu apakšējo galu ievada gāzu maisījumu



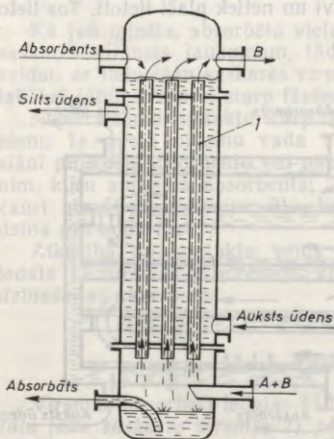
11.5. att. Grafiņa absorbera shēma.

$A+B$. Caurulēs gāzveida fāze saskaras ar šķidro fāzi. Notiek masas apmaiņa, tādēļ pa caurulēm uz augšu plūstošā gāzveida fāze kļūst nabadzīgāka ar absorbējamo komponentu A , bet šķidrā fāze, plūstot pa caurulēm uz leju, bagātinās ar komponentu A . Absorbērs izveidots līdzīgi cauruļveida siltumapmainītājam. Masas apmaiņas rezultātā izdalīto siltumu uzņem dzesējošais šķidrums (parasti ūdens), kuru ievada starpcauruļu telpā.

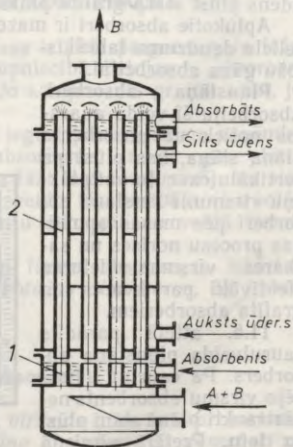
Absorbērs ar plākšņu pildījumu ir vertikāla kolonna, kas aizpildīta ar vertikālām plāksnēm (no koka, metāla, plastmasas vai auduma). Absorbents vienmērīgi aprasina plāksnes no augšas, un šķidrums plānā slānī plūst pa abām plāksnes pusēm. Preti absorbentam no apakšas pievada gāzveida fāzi.

11.7. attēlā redzams absorbērs ar kāpjošu absorbenta slāni. Absorbēra darbības princips — lielā gāzes fāzes ātrumā (līdz 40 m/s) šķidrums slānis kāpj pa caurules iekšpusi uz augšu, saskaras ar gāzes fāzi, un notiek masas apmaiņa. Gāzes fāze, kuru ievada absorbēra no apakšas, plūstot uz augšu, isās caurulēs 1 plūstošo absorbentu rauj līdzī un caurulēs 2 pārvieto plānā slānī pa caurules iekšējo sienu uz augšu. No cauruļu vaļējiem augšējiem galiem izplūst absorbēts kopā ar inerto gāzes daļu. Absorbēcijas laikā izdalījušos siltumu iespējams novadīt ar dzesējošo šķidrumu (parasti ūdeni), ko pievada starpcauruļu telpā. Šiem absorbēriem ir samērā liela hidrauliskā pretestība.

Absorbēri ar pildījumu. Absorbēri ar pildījumu (absorbēcijas kolonnas) ir viens no izplatītākajiem absorbēru veidiem, jo pēc konstruktīvā izveidojuma ir vienkārši, tos iespējams lietot agresīvām



11.6. att. Cauruļveida plānslāņa absorbēra shēma.

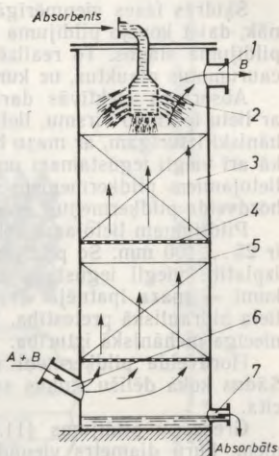


11.7. att. Absorbērs ar kāpjošu absorbenta slāni.

vidēm un salīdzinājumā ar barbotāžas iekārtām tiem ir mazāka hidrauliskā pretestība.

Absorbers ar pildījumu (11.8. att.) sastāv no vertikālas cilindriskas kolonnas 5, kurā ir viens vai vairāki caurumoti plauktī vai ārdi 4, virs kuriem sabērts vai sakrauts pildījums 3. Absorbēcijai paredzēto gāzu maisījumu ievada aparātā no apakšas 6. Pretēji gāzes kustības virzienam no aparāta augšas 2 pievada absorbentu. Gāzveida fāzes inertā daļa aizplūst pa izvadu 1, bet šķidrā fāze pēc absorbēcijas izvada no iekārtas apakšas 7. Absorberus ar pildījumu sauc arī par *skruberiem*.

Skruberi nav izmantojami, ja apstrādājamā fāze satur mehāniskus piemaisījumus, jo tad iespējami pildījuma slāni esošo kanālu aizsērējumi. Tas palielina iekārtas pretestību. Skruberi nav izmantojami arī tad, ja lieli gāzes daudzumi jāapstrādā ar nelielu šķidrums daudzumu, jo nav iespējams nodrošināt apmierinošu pildījuma virsmas saslāpinašanu.



11.8. att. Absorbers ar pildījumu.

11.4.2. Pildījuma veidi

Par *pildījumu* sauc dažāda veida pildķermeņus, ar kuriem aizpilda absorbēcijas aparāta iekšējo tilpumu. Pildījumam jāveido ciešs kontakts un pēc iespējas lielāka saskares virsma starp fāzēm. Šķidrā fāze, plūstot no kolonnas augšas, slapina pildķermeņu virsmu un nepārtraukti to atjauno. Pildījums veicina arī šķidrās fāzes sadalīšanos pilienos un plānos plūstošos slāņos.

Pildījumu raksturo *īpatnējā virsma*, *īpatnējais brīvais tilpums* un *tilpummasa*.

Pildījuma īpatnējā virsma a parāda, cik kvadrātmetru virsmas ir 1 m³ pildījuma. *Pildījuma īpatnējais brīvais tilpums* (porainība) *e* parāda, cik kubikmetru tukšumu ir 1 m³ pildījuma. *Pildījuma tilpummasa rāda*, cik liela masa ir 1 m³ pildījuma.

Pildķermeņus absorbēcijas iekārtā var iebērt vai sakraut. Pildķermeņus iebērot, to blīvums pa aparāta šķēlumu ir dažāds — aparāta centrā lielāks, malās mazāks. Tādēļ zināmā attālumā no pildījuma augšas šķidrā fāze plūst gar skruberu malām, jo tur ir mazāka pretestība, un vāji aprasina pildījuma centrālo daļu. Sakrautam pildījumam šķidrās fāzes sadalījums pa aparāta šķēlumu ir vienmērīgāks.

Šķidrās fāzes vienmērīgāku sadalījumu pa iekārtas šķēlumu panāk, dalot kopējo pildījuma augstumu atsevišķos 1,5...3 m augstos pildījuma slāņos. To realizē, skruberā zināmos attālumos ievietojot caurumus plauktus, uz kuriem novieto pildķermeņus.

Absorbera efektīvās darbības nodrošināšanai pildījumam jābūt ar lielu īpatnējo virsmu, lielu īpatnējo brīvo tilpumu, ķīmiski un mehāniski izturīgam, ar mazu hidraulisko pretestību, mazu tilpummasu, kā arī viegli iegūstamam un pietiekami lētam. No rūpniecībā plašāk lietojamiem pildķermeņiem var minēt koksu un smalcinātu kvarcu, hordveida pildķermeņus, gredzenus u. c.

Pildījumam lietojamā koksa un smalcinātā kvarca gabalu lielums ir 25...100 mm. Šo pildījumu priekšrocība — tie ir lēti, dabā plaši izplatīti, viegli iegūstami un izturīgi pret agresīvām vidēm, trūkumi — maza īpatnējā virsma un mazs īpatnējais brīvais tilpums, liela hidrauliskā pretestība. Kvarcam ir liela tilpummasa, koksam — niecīga mehāniskā izturība.

Hordveida pildķermeņi (11.9. att. a) veidoti no koka dēļiņiem. Šādus koka dēļišu riņķus sakrauj pa 15...20 elementiem citu virs cita.

Gredzenu pildījums (11.9. att. b) sastāv no plānsienu gredzeņiem, kuru diametrs vienāds ar gredzena augstumu (Rašiga gredzeņi). Gredzeņus ar diametru līdz 50 mm kolonnā ieber. Lielāka diametra gredzeņus ($d > 50$ mm) kolonnā sakrauj noteiktā kārtībā, pie tam katru nākamo rindu pārbīda pamišus pāri iepriekšējai, kā tas redzams attēlā. Gredzeņus izgatavo no keramikas, stikla un plastmasas. Lieto arī plānsienu metāla gredzeņus, pie tam fāžu saskares virsmas palielināšanai gredzenā ievieto šķērssienas vai spirāli (11.9. att. c). Gredzenu pildījumam ir liela hidrauliskā pretestība un aizsērēšanas iespēja.

11.9. attēlā redzami arī citi pildķermeņu veidi: seglveida, propellerveida un lodveida pildķermeņi. Pildījumam lieto arī no skārda lentēm pagatavotas spirāles, sietveida pildķermeņus u. c.

Hidrodinamika absorberiem ar pildījumu. Absorbenta plūsmas veids pildījuma slānī atkarīgs no hidrodinamiskā režīma.

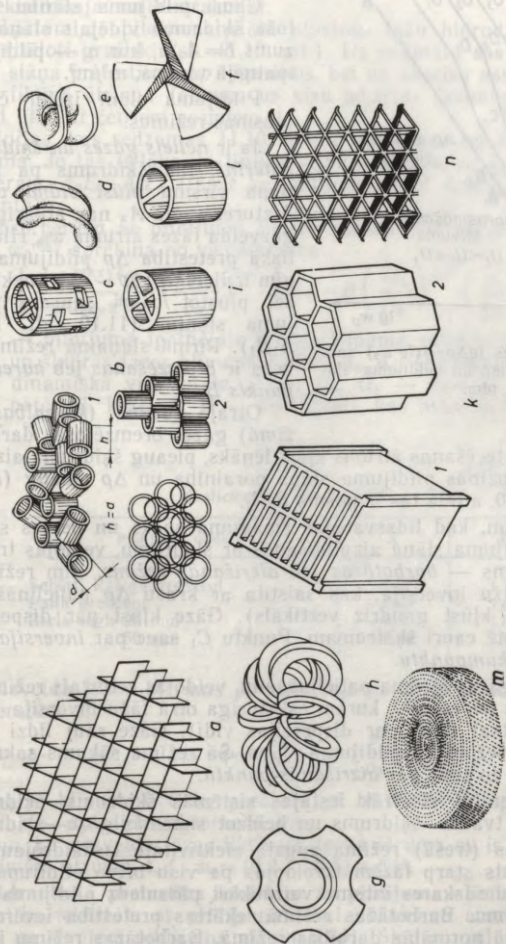
Absorberos ar pildījumu šķidrums plūsmu raksturo ar *tilpuma* vai *masas aprasināšanas blīvumu* U . *Aprasināšanas blīvums ir šķidrums patēriņš kubikmetros vai kilogramos uz 1 m² absorbera šķērsriezuma laukuma S_k laika vienībā* (sekundē vai stundā)

$$U = \frac{G_x}{\rho_x S_k} \quad \text{vai} \quad U = \frac{G_x}{S_k},$$

kur U — aprasināšanas blīvums m³/(m²·s) vai kg/(m²·s).

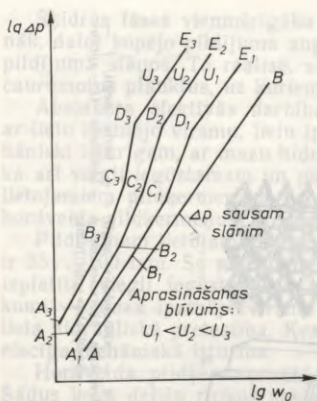
Pildījumu raksturo ar *aiztures spēju* jeb *aizturi* A_a , kas ir tas absorbera tilpums kubikmetros, kurš uzkrājas 1 m³ pildījuma. Pildījuma aizture ir *statiskās aiztures* A_{st} un *dinamiskās aiztures* A_{din} summa, t. i., $A_a = A_{st} + A_{din}$.

Šķidrums tilpumu, kas uzkrājas pildījumā, ja nav gāzveida fāzes plūsmas, sauc par *statisko aizturi*. Ja preti šķidrums plūsmai cauri



11.9. att. Pildķermeņi:

a — hordveida, b — Rašīga gredzenī (1 — sabērti, 2 — sakrauti), c — Palla gredzens, d — «Intaloksa» segli, e — Berla segli, f — propellerveida, g — lodveida, h — Tellera rozete (polietilēna), i — gre dzenveida ar krusteniskām šķērslīnām; k — blokveida (1 — sprau-
gu, 2 — šūnu), l — Lessinga gredzens, m — Gudloje pildījums, n — «Speilpaka» pildījums.



11.10. att. Līknes $\lg \Delta p = f(\lg w_0)$ sausam un aprasinātam pildījuma slānim.

pildījuma slānim plūst gāze, tad šo aizturi sauc par *dinamisko aizturi*, t. i., $A_{din} = A_a - A_{st}$.

Cauri pildījuma slānim plūstošā šķidruma vidējais slāņa biežums $\delta = A_a/a$, kur a — pildījuma īpatnējā virsma, m^2/m^3 .

Pildījuma slāni izšķir četrus plūsmas režimus.

Ja ir *neliels gāzes un šķidruma patēriņš*, tad šķidrums pa pildījuma virsmu *plūst slāņa veidā*. Aiztures spēja A_a nav atkarīga no gāzveida fāzes ātruma w_0 . Hidrauliskā pretestība Δp pildījuma slānim ir lielāka ($\Delta p \sim w_0^2$), nekā gāzei plūstot cauri sausam pildījuma slānim (11.10. att. līnija A_1B_1). Pirmā slāņainā režīma robeža ir *bremzēšanas jeb kareņības punkts* B_1 .

Otrajā režīmā (*kareņības režīmā*) gāzes *bremzējošās darbības*

dēļ šķidruma tecēšanas ātrums kļūst lēnāks, pieaug šķidruma aizture, attiecīgi samazinās pildījuma slāņa porainība un Δp pieaug ($\Delta p \sim w_0^{4,5}$). 11.10. attēlā tas ir posms B_1C_1 .

Līdz brīdim, kad līdzsvarojošs smaguma spēks un berzes spēks, turpinās pildījuma slāņa aizpildīšanu ar šķidrumu, veidojas trešais plūsmas režīms — *barbotāžas jeb aizrišanās režīms*. Šim režīmam raksturīga fāžu inversija, kas saistīta ar krasu Δp palielināšanos (posms C_1D_1 kļūst gandrīz vertikāls). Gāze kļūst par disperģēto fāzi un barbotē cauri šķidrumam. Punktu C_1 sauc par *inversijas jeb aizrišanās sākumpunktu*.

Turpinot gāzes ātruma palielināšanu, veidojas ceturtais režīms — *pneimatiskais transports*, kuram raksturīga otrā fāžu inversija (gāzveida fāze atkal kļūst par dispersijas vidi). Gāze rauj līdzī šķidrumu un izsviež to no pildījuma slāņa. Šā režīma sākums sakrīt ar punktu D_1 un to sauc par *aizrišanās punktu*.

Fāžu inversija visātrāk iestājas sistēmās šķidrums—šķidrums, tad sistēmās tvaiks—šķidrums un beidzot sistēmās gāze—šķidrums.

Barbotāžas (trešā) režīma augstā efektivitāte izskaidrojama ar to, ka kontakts starp fāzēm izveidojas pa visu brīvo pildījuma tilpumu un fāžu saskares virsma vairākkārt pārsniedz pildījuma ģeometriskā virsma. Barbotāžas režīmā iekārtas pretestība ievērojami augstāka nekā normālās darbības režīmā. Barbotāžas režīmu iespējams sasniegt arī zem inversijas punkta. Tad daļa no pildījuma jāaizpilda ar šķidrumu. Tas panākams, lietojot pārteces cauruli (sk. 11.13. att. a).

Barbotāžas kolonnas masas pārejas ātrums jebkurā gāzes ātrumā ir lielāks nekā parastā režīma iekārtās. Barbotāžas režīms uzskatāms par izdevīgāko kolonnās ar pildījumu ne tikai absorbcijai, bet arī rektifikācijai un ekstrakcijai.

Iekārtām ar pildījuma slāni plūstošo fāžu hidrodinamiskie režīmi attēloti grafiski (sk. 11.10. att.). Uz ordinātu ass atlikts pildījuma slāņa pretestības Δp logaritms, bet uz abscisu ass — gāzveida fāzes fiktīvā ātruma (ātrums uz visu iekārtas šķēlumu) logaritms; iegūst likni ar četriem posmiem.

Līnijas, kas redzamas 11.10. attēlā, atkarīgas no aprasināšanas blīvuma. Jo tas lielāks, jo līnijas virzītas vairāk pa kreisi no A_1E_1 , piemēram, A_2E_2 , A_3E_3 (tāpēc ka pildījuma slāni uzkrājas vairāk absorbenta).

Absorberiem ar pildījumu fiktīvo maksimālo gāzveida fāzes ātrumu ω_0^{\max} aprēķina no vienādojuma

$$\lg \left[\frac{(\omega_0^{\max})^2 \rho_y}{g d_{ekv} \varepsilon^2 \rho_x} \left(\frac{\mu_y}{\mu_x} \right)^{0,16} \right] = A - B \left(\frac{G_x}{G_y} \right)^{0,25} \left(\frac{\rho_y}{\rho_x} \right)^{0,125},$$

kur ε — pildījuma īpatnējais brīvais tilpums, m^3/m^3 ; ρ_y , ρ_x — gāzveida un šķidrās fāzes blīvums, kg/m^3 ; μ_y , μ_x — gāzveida un šķidrās fāzes dinamiskā viskozitāte, $Pa \cdot s$; G_x , G_y — šķidrās un gāzveida fāzes patēriņš, kg/s ; A , B — koeficienti, kas atkarīgi no pildījuma veida.

11.1. tabula

Koeficientu A un B vērtības

Pildījuma veids	A	B
Sabērti Rašiga gredzeni	-0,073	1,75
Palla gredzeni	-0,49	1,04
Berla segli 25 mm	-0,33	1,04
" " 50 mm	-0,58	1,04

Gāzveida fāzes blīvums ρ_y vienādojumā attiecas uz absorbcijas temperatūru t :

$$\rho_y = \rho_{0y} \frac{273}{273+t} \frac{p}{p_0},$$

kur ρ_{0y} — blīvums $0^\circ C$ temperatūrā un $1,013 \cdot 10^5 Pa$ spiedienā (p_0), kg/m^3 ; p — spiediens absorberā, Pa .

Pieņem, ka gāzveida fāzes fiktīvais darba ātrums ω_0 ir $0,2 \dots 0,5$ no maksimālā ātruma, t. i., $\omega_0 = (0,2 \dots 0,5) \omega_0^{\max}$.

Hidrauliskā pretestība iekārtām ar pildījuma slāni. Hidrauliskā pretestība iekārtām ar pildījuma slāni nosakāma atsevišķi sausam (Δp_s) un slapjam pildījuma slānim (Δp). Slapjam pildījuma slānim pretestība ir lielāka, jo daļu no pildījuma kanālu šķēļumiem aizņem šķidrā fāze. Tas rada gāzveida fāzes ātruma pieaugumu un līdz ar to hidrauliskās pretestības palielināšanos.

Sakarība starp slapjā un sausā pildījuma slāņa hidraulisko pretestību ir šāda:

$$\Delta p = \Delta p_s \cdot 10^{kU},$$

kur Δp_s un Δp — sausā un slapjā pildījuma slāņa pretestība, Pa; k — koeficients; U — aprasīšanās blīvums, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

11.2. tabula

Koeficienta k vērtības

Pildījuma veids	k	Pildījuma veids	k
Rašīga gredzeni, sakrauti		Palla gredzeni 50 mm	126
50 mm	173	Berla segli 25 mm	30
100 mm	119		
Rašīga gredzeni, sabērti			
50 mm	169		

Sausā pildījuma slāņa pretestības aprēķināšanas pamatā ir Darsī—Veisbaha formula (2.47).

$$\Delta p_s = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho_y \omega^2}{2}, \quad (11.7)$$

kur λ — hidrauliskais pretestības koeficients; l — vidējais kanāla garums pildījuma slānī, m; d — ekvivalentais slāņa diametrs, m (sk. vienādojumu (2.85)); ρ_y — gāzveida fāzes blīvums, kg/m^3 ; ω — faktiskais gāzes ātrums, m/s.

Iekārtās ar pildījuma slāni faktiskais gāzes ātrums ω nav zināms, tādēļ aprēķinos lieto fiktīvo gāzes ātrumu ω_0 , t. i., gāzes ātrumu, kāds tas būtu, ja gāze plūstu cauri visam aparāta šķēlumam bez pildījuma. Faktiskais gāzes ātrums $\omega = \frac{\omega_0}{\varepsilon}$, kur ε — pildījuma slāņa porainība, m^3/m^3 (sk. vienādojumu (2.90)).

Vienādojumā (11.7) ātruma vietā ievietojot izteiksmi no vienādojuma (2.90) un attiecīgo izteiksmi no vienādojuma (2.85), iegūst, ka

$$\Delta p_s = \lambda \frac{Ha}{4\varepsilon} \frac{\rho_y \omega_0^2}{2\varepsilon^2} \quad \text{jeb} \quad \Delta p_s = \lambda \frac{\rho_y Ha \omega_0^2}{8\varepsilon^3}.$$

Sabērtiem gredzenu un gabalu pildķermeņiem sausā stāvoklī hidrauliskais pretestības koeficients λ ir šāds: gāzes laminārai plūsmai ($Re_y < 40$) $\lambda = 140/Re_y$; turbulentai plūsmai ($Re_y > 40$) $\lambda = 16/Re_y^{0,2}$.

Sakrautam pildījumam $\lambda = f/Re_y^{0,375}$, kur gredzenu pildījumam koeficients $f = 9,2$. Sabērtam pildījumam (lodveida, seglveida) lietojams vienādojums $\lambda = 133/Re_y + 2,34$; bet hordveida pildījumam $\lambda = 6,64/Re_y^{0,375}$.

Reinoldsa skaitli gāzveida fāzei aprēķina pēc izteiksmes

$$Re_y = \frac{\omega d_{ekv} \rho_y}{\mu_y},$$

kur ω — faktiskais gāzveida fāzes ātrums, m/s;

Reinoldska skaitļa formulā lielumu ω un d_{ekv} vietā ievietojot attiecīgās vērtības no vienādojumiem (2.85) un (2.90), iegūst

$$Re_y = \frac{4\omega_0\rho_y}{a\mu_y} = \frac{4W_y}{a\mu_y}, \quad (11.8)$$

kur W_y — gāzveida fāzes masas ātrums, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

Pildījuma saslavināšanās. Iekārtās ar pildījuma slāni masas apmaiņā piedalās tikai saslavinātā virsma. Saslavināto pildījuma virsmu raksturo ar *slapināšanas koeficientu* Ψ . Šā koeficienta vērtību nosaka, *dalot ipatnējo saslavināto virsmu a_s ar pildījuma ipatnējo virsmu a* , t. i., $\Psi = a_s/a$. Šis koeficients atkarīgs no pildījuma aprasināšanas blīvuma U . Slapināšanas koeficients Ψ pieaug, līdz virsma saslavināta, tad $\Psi = 1$. Tālāka aprasināšanas blīvuma palielināšana koeficientu Ψ neizmaina.

Slapināšanas koeficientu var aprēķināt pēc formulas

$$\Psi = 0,122 (U\rho_x)^{1/3} d_p^{-1,2} \sigma_x^{-n}, \quad (11.9)$$

kur d_p — Rašīga gredzena diametrs, m; σ_x — šķidrās fāzes virsmas spraigums, mN/m ; pakāpe $n = 0,133 d_p^{-0,5}$ — sabērtiem Rašīga gredzeniem.

Masas apmaiņas procesā ne visa saslavinātā pildījuma virsma ņem aktīvu dalību, piemēram, aparāta «mirušās» joslās, pildījuma elementu saskares vietās u. c. Tādēļ pastāv vēl arī jēdziens *pildījuma aktīvā saslavinātā virsmas daļa* Ψ_a , kuru aprēķina pēc formulas

$$\Psi_a = \frac{U}{a(p+qU)}, \quad (11.10)$$

kur p un q — koeficienti, kas atkarīgi no pildījuma veida; U — aprasināšanas blīvums, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; a — ipatnējā pildījuma virsma, m^2/m^3 .

11.3. tabula

Koeficientu p un q vērtības

Pildījuma veids	$p \cdot 10^2$	$q \cdot 10^2$
Sakrauti Rašīga gredzeni 50 mm	1,94	0,86
100 mm	0,78	1,46
Sabērti Rašīga gredzeni 25 mm	3,67	0,86
50 mm	2,40	1,20
Palla gredzeni 50 mm	2,10	1,16

Absorberiem ar pildījumu izšķir jēdzienu *efektīvais* (minimālais) *aprasināšanas blīvums* U_{\min} . Ja aprasināšanas blīvums pārsniedz U_{\min} , ievērojami pieaug Ψ_a . Lielumu U_{\min} aprēķina pēc formulas

$$U_{\min} = aq_{ef}, \quad (11.11)$$

kur $q_{ef} = 0,022 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ — lineārais efektīvais aprasināšanas blīvums visa veida pildījumiem, izņemot gredzenus, kas lielāki par 75 mm, un hordveida pildījumu, kuram spraugas izmērs lielāks par 50 mm.

Diametra un slāņa augstuma noteikšana kolonnām ar pildījumu. Absorberiem ar pildījumu galvenie izmēri ir kolonnas diametrs un pildījuma slāņa augstums. Kolonnas diametru nosaka, lietojot caurteces formulu:

$$d_k = \sqrt{\frac{4Q}{\pi w_0}},$$

kur d_k — kolonnas diametrs, m; Q — gāzes caurtece kolonnā, m^3/s ; w_0 — gāzes fiktīvais ātrums, m/s .

Gāzveida fāzes ātruma palielināšana uzlabo masas apmaiņu un paaugstina iekārtas darbības intensitāti. Vienlaikus palielinās iekārtas hidrauliskā pretestība; tas izraisa gāzes pārvietošanai nepieciešamās enerģijas pieaugumu. Lielu gāzes ātrumi veicina arī šķidrās fāzes līdzraušānu pilienu veidā.

Fiktīvais gāzes ātrums atkarīgs no pildījuma veida un no pildījuma elementu materiāla. Keramikas gredzenu pildījumam fiktīvais gāzes ātrums ir 0,4...1,2 m/s , koksam (ar gabalu izmēriem 25...76 mm) — 0,26...0,96 m/s , kvarcam — 0,13...0,6 m/s . Maza diametra iekārtās gāzes ātrumi lielāki nekā liela diametra iekārtās. Praksē pieņem, ka fiktīvais ātrums ir 0,3...1,5 m/s .

Aprēķinātais aparāta diametrs jāsaprot ar aprasināšanas blīvumu, tādēļ jāaprēķina kolonnas šķēluma laukums S_k un jānosaka aprasināšanas blīvums U_x : $U_x = Q_x/S_k$, kur Q_x — absorbenta caurtece, m^3/s .

Ja aprēķinātais aprasināšanas blīvums ievērojami atšķiras no minimālā aprasināšanas blīvuma, t. i., mazs pildījuma slapināšanas koeficients Ψ , tad pildījums netiks labi saslapināts un to procesā izmantos tikai daļēji. Lai samazinātu U_{\min} , jālieto citi pildķermeņi ar mazāku īpatnējo virsmu.

Šķidrā fāze sadalās vienmērīgi pa pildījuma slāņa šķēlumu, ja aparāta diametrs $d_k > 8d_p$, kur d_p — pildījuma elementa diametrs.

Ar nelielu aprasināšanas blīvumu nav iespējams panākt visas pildījuma virsmas saslapināšanu. Minimālais aprasināšanas blīvums kolonnām ar pildījumu ir 1...1,5 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$. Ja aprasināšanas blīvums mazāks par minimālo, tad ieteicams lietot barbotāžas absorbcijas iekārtu.

Pildījuma augstuma noteikšanai lieto šādas formulas:

$$H = h_{0y}n_y \text{ vai } H = h_{0x}n_x.$$

$$h_{0y} = h_y + \frac{h_x}{f_1} \text{ un } h_{0x} = h_x + \frac{h_y}{f_2},$$

kur h_y — gāzveida fāzes pārejas augstums, m; $h_y = G_y/(\beta_y a S_a)$; h_x — šķidrās fāzes pārejas augstums, m; $h_x = G_x/(\beta_x a S_a)$; $f_1 = G_x/(A_1 G_y)$ un $f_2 = G_y/(A_2 G_x)$ (sk. vienādojumus (10.58) un (10.59)).

Kā redzams, pārnesto vienību augstumu noteikšanai jāzina masas atdeves koeficienti β_y un β_x .

Regulāri sakrautam pildījumam gāzes fāzei masas atdeves koeficientu β_y var aprēķināt pēc kritēriālās formulas:

$$Nu_d = 0,167 Re_d^{0,74} Pr_d^{0,33} (h_p/d_{ekv})^{-0,47} \rho_y,$$

kur $Nu_d = \beta_y d_{ekv}/D_y$.

Masas atdeves koeficients

$$\beta_y = 0,167 D_y/d_{ekv} Re_d^{0,74} Pr_d^{0,33} (h_p/d_{ekv})^{-0,47} \rho_y, \quad (11.12)$$

kur β_y — masas atdeves koeficients, $kg/(m^2 \cdot s)$; D_y — absorbējamā komponenta difūzijas koeficients gāzes fāzei, m^2/s ; $Re_d = \omega_0 d_{ekv} \rho_y / (\epsilon \mu_y)$ — Reynoldsa kritērijs gāzes fāzei; $Pr_d = \mu_y / \rho_y D_y$ — Prantla difūzijas kritērijs gāzes fāzei; h_p — pildījuma elementa augstums, m.

Kolonnām ar sabērtu pildījuma slāni masas atdeves koeficientu β_y var aprēķināt pēc formulas:

$$Nu_d = 0,407 Re_d^{0,655} Pr_d^{0,33} \rho_y.$$

Difūzijas koeficientu šķidrums tvaikiem gāzes fāzē var aprēķināt pēc vienādojuma

$$D_y = 4,3 \cdot 10^{-8} \frac{T^{3/2}}{p(V_A^{1/3} + V_B^{1/3})^2} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}},$$

kur V_A, V_B — absorbējamā komponenta un gāzes fāzes moltilpumi viršanas temperatūrā, cm^3/mol ; M_A, M_B — šķidrums un gāzes fāzes molmasa, kg/mol ; T — absorbcijas vidējā temperatūra, K; p — gāzes spiediens, ietilpstot absorberā, MPa.

Masas atdeves koeficientu β_x šķidrā fāzei iegūst no kritēriālā vienādojuma, kas lietojams gan sabērtam, gan regulāri sakrautam pildījumam:

$$Nu_d = 0,0021 Re_d^{0,75} Pr_d^{0,5} \rho_x,$$

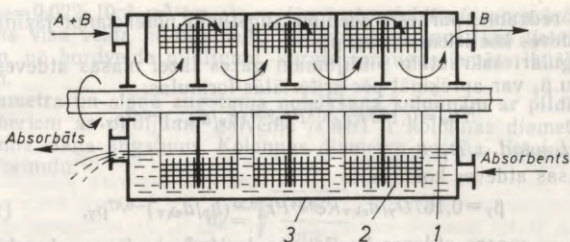
kur $Nu_d = \beta_x \delta_{ekv}/D_x$ — Nuselta difūzijas kritērijs šķidrā fāzei. Tad

$$\beta_x = 0,0021 \frac{D_x}{\delta_{ekv}} Re_d^{0,75} Pr_d^{0,5} \rho_x, \quad (11.13)$$

kur β_x — masas atdeves koeficients šķidrā fāzei, $kg/(m^2 \cdot s)$; D_x — absorbējamā komponenta difūzijas koeficients absorbentam, m^2/s ; $\delta_{ekv} = (\mu_x^2 / (\rho_x^2 g))^{1/3}$ — ekvivalentais plūstošā šķidrums slāņa biezums, m; $Re_d = 4U\rho_x / (a\mu_x)$ — modificētais Reynoldsa kritērijs pa pildījumu plūstošam šķidrums slānim; $Pr_d = \mu_x / (\rho_x D_x)$ — Prantla difūzijas kritērijs šķidrums.

Atšķaidītos šķīdumos difūzijas koeficientu D_x var aprēķināt pēc formulas:

$$D_x = 7,4 \cdot 10^{-12} \frac{(\beta M)^{0,5} T}{\mu_x V_A^{0,6}},$$

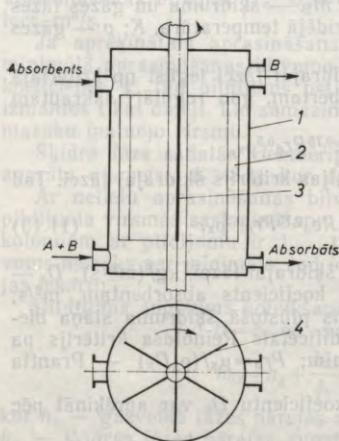


11.11. att. Rotējošo disku absorbera shēma.

kur M — absorbenta molmasa, kg/mol; T — absorbenta temperatūra, K; μ_x — absorbenta viskozitāte, MPa·s; V_A — absorbējamā komponenta moltilpums, cm³/mol; β — molekulu asociāciju raksturojošais koeficients.

Pārnesto vienību skaitu $n_y = \int_{Y_b}^{Y_a} \frac{dY}{Y - Y^*}$ nosaka, grafiski integrējot vai grafiski no Y - X diagrammas (sk. 416. un 417. lpp.).

Lai gāzveida fāzi vienmērīgi sadalītu pa iekārtas šķēlumu, attiecībai starp pildījuma augstumu H un kolonnas diametru d_k jābūt vismaz 1,5...2. Kolonnām ar pildījumu ieteicams paredzēt šādu maksimālo attiecību starp pildījuma slāņa augstumu un kolonnas diametru: Rašiga gredzeniem — 2,5...3; Berla un Intaloksa segliem — 5...8 un Palla gredzeniem — 5...10.



11.12. att. Rotācijas plānslāņa absorbera ar lāpstveida rotoru shēma.

Lielām gāzes un šķidrums slodzēm, ja spiediena kritums pārsniedz 400...700 Pa uz 1 m pildījuma slāņa augstuma, slāņa augšā novieto režģi, lai novērstu pildķermeņu pārvietošanos. Režģa masa 50...150 kg/m² atkarībā no spiediena krituma.

Pildījuma kolonnu ražīgumu un efektivitāti negatīvi ietekmē tvaika kondensācija uz sienām, tādēļ kolonnas ar pildījuma slāni rūpīgi jāizolē.

Mehāniskie plānslāņa absorberi. Šīs grupas aparāti iedalāmi *rotējošo disku absorberos* un *rotācijas kolonnu absorberos*.

Rotējošo disku absorberos (11.11 att.) horizontālai rotējošai

vārpstai 1 piestiprināti caurumoti diski vai diski ar šūnveida elementiem 2 (lai palielinātu saskares virsmu).

Vārpstai rotējot (disku lineārais ātrums 0,2...0,3 m/s), diskjiem piestiprinātos šūnveida elementus iegremdē absorbentā, kas atrodas horizontālā katla 3 apakšējā daļā, un nepārtraukti atjauno absorbenta slāni uz to virsmas.

Rotējošo disku absorberu trūkumi — tie patērē daudz enerģijas, absorbentam jābūt bez mehāniskiem piemaisījumiem.

Pie rotācijas kolonnu absorberiem pieder dažādas rotācijas kolonnas. 11.12. attēlā redzama kolonna 1 ar lāpstveida rotoru 2. Sā tipa absorberam pie vertikālas vārpstas 3 piestiprinātas vertikālas lāpstiņas 4, kas nepieskaras pa kolonnas iekšējo sienu (uz leju) plūstošajam absorbenta slānim. Lāpstiņas maisa tikai gāzveida fāzi.

Ražošanā lieto arī rotācijas kolonnas, kur rotora lāpstiņas pieskaras kolonnas iekšējai sienai un maisa abas fāzes. Šāda veida kolonnas lieto arī rektifikācijā.

11.4.3. Barbotāžas absorberi

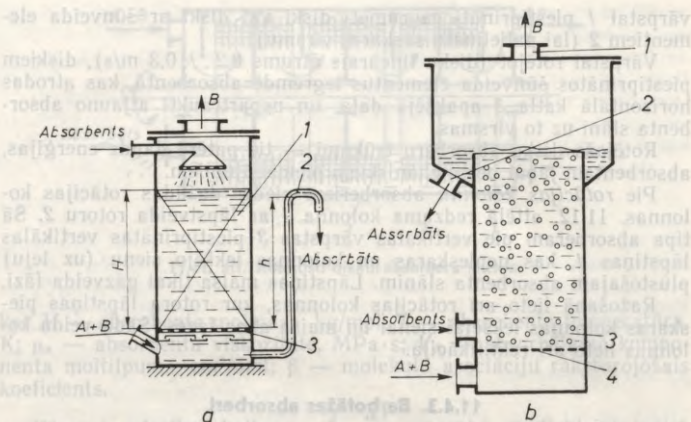
Barbotāžas absorberu darbības pamatā ir gāzveida fāzes burbuļošana cauri nekustīgam vai plūstošam šķidrums slānim. Barbotāžas aparātus lieto dažādos masas apmaiņas procesos, piemēram, absorbcijā, rektifikācijā un ekstrakcijā.

Masas apmaiņa barbotāžas iekārtās notiek tad, kad gāzes burbuliši ceļas pa šķidrums slāni uz augšu. Gāzes burbulītim virzoties cauri šķidrums slānim, notiek nepārtraukta saskares virsmas atjaunošanās šķidrums pusē. Difundējošā viela no burbuliša virsmas nokļūst šķidrums. Gāzveida fāzes kustība burbulītī ir niecīga, tādēļ burbulītī difundējošā viela pārvietojas molekulārās difūzijas rezultātā. Lielos burbuļos iespējama arī niecīga konvektīvā difūzija.

Šķidrums pusē masas apmaiņas nosacījumi ir labi, jo nepārtraukti atjaunojas fāžu saskares virsma, turpretī pašā burbulītī masas apmaiņa noris vāji, jo tā atkarīga no molekulārās difūzijas. Šķidrums slāņa augstuma palielināšana virs noteikta lieluma, kas parasti ir daži desmiti milimetru, nedod efektu masas apmaiņas uzlabošanai, jo vielas difūzija no gāzes burbuliša iekšienes uz tā virsmu ir niecīga. Šādos apstākļos masas apmaiņu ierobežo gāzveida fāze. Mīnēto trūkumu iespējams novērst, sadalot gāzveida fāzi pēc iespējas mazākos burbulīšos vai arī ļaujot gāzveida fāzei burbuļot cauri vairākiem šķidrums slāņiem, kas atrodas cits virs cita.

Ja gāzveida fāze sastāv no viena komponenta, tad burbuliša iekšienē difūzija nenotiek, un masas apmaiņa atkarīga no tā, cik lielu pretestību izrāda šķidrā fāze.

Barbotāžas iekārtās masas apmaiņu var ievērojami uzlabot, palielinot burbulišu kustības ātrumu cauri šķidrums slānim (palielinot gāzes caurteci). Tad novērojama burbulišu deformācija, kas veicina gāzveida fāzes samaisīšanos burbuliša iekšienē. Bez tam virs šķidrums slāņa rodas putas un notiek šķidrums pilienu izsmidzināšana gāzveida fāzē.



11.13. att. Absorberi ar nepārtrauktu barbotāžas slāni.

Barbotāžas absorberi iedalās 1) absorberos ar nepārtrauktu barbotāžas slāni; 2) absorberos ar šķīvjiem; 3) absorberos ar suspendētu pildījuma slāni; 4) absorberos ar maisītājiem.

Absorberi ar nepārtrauktu barbotāžas slāni. Šā veida absorberi ir kolonnas bez pildījuma slāņa un ar pildījuma slāni vai arī ar dažādos līmeņos novietotiem sietveida diskjiem.

11.13. attēlā *a* redzamais absorbers darbojas barbotāžas režīmā. Šāds absorberus sauc arī par *emulsijas kolonnām*. Pildījuma slānis *I* sabērts uz režģa *3*, zem kura pievada gāzveida fāzi *A+B*. Absorbents pildījuma slāni aprasina no augšas. Absorbātu (absorbents + komponents *A*) aizvada pa pārteces cauruli *2*, kuras augstums *h* nosaka barbotāžas slāņa augstumu kolonnā. Pārteces caurules augstumu aprēķina šādi:

$$h = H \frac{\rho_p}{\rho_y},$$

kur *h* — pārteces caurules augstums, m; ρ_p , ρ_y — putu un šķidrums blīvums, kg/m^3 .

Šiem absorberiem lieto neliela izmēra pildījumu.

Aplūkojamie absorberi var būt arī līdzplūsmas absorberi, kuros gāzveida fāzi un absorbentu ievada kolonnā no apakšas (11.13. att. *b*). Kolonnā *3* zem režģa *4* pievada gāzu maisījumu *A+B*. Gāzveida fāze burbuļu veidā plūst kolonnā uz augšu un bagātinās ar komponentu *B*. Absorbāts izplūst pa izvadu *2*, bet inertā gāzveida fāze pa izvadu *1*.

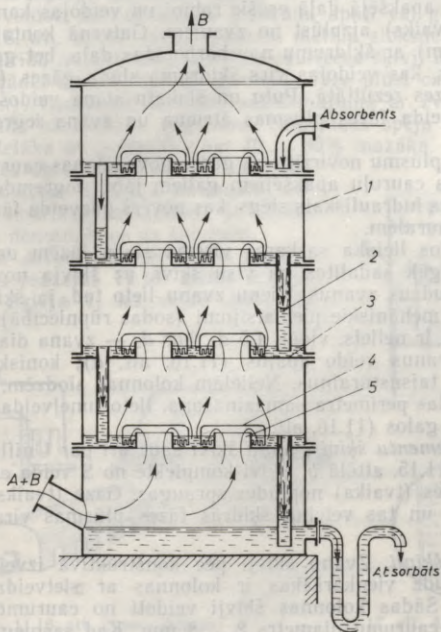
Absorberi ar šķīvjiem. Absorberi ar šķīvjiem ir masas apmaiņas aparāti ar pakāpienveida saskari starp fāzēm. Kontakts starp fāzēm

notiek uz šķīvjiem, kas cilindriskā kolonnā novietoti cits virs cita. Šķīvju izveidojums absorberos var būt dažāds. Šķīvjus iedala *zvanu, sietveida, caurplūdes, vārstu šķīvjos* u. c.

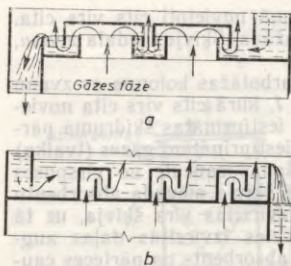
Zvanu šķīvji. 11.14. attēlā redzama barbotāžas kolonna ar zvanu šķīvjiem. Tā sastāv no vertikāla cilindra 1, kurā cits virs cita novietoti šķīvji 3. Šķivis ir metāla disks, kurā iestiprinātas šķidrums pārteces caurules 2 un izveidoti caurumi ar piestiprinātām gāzes (tvaika) novadišanas caurulēm 5. Gāzes novadišanas caurule no virspuses pārsegta ar zvanu 4. Kolonnā uz augšējā šķīvja pievada absorbentu (šķidro fāzi). Tā kā pārteces caurules izvērztas virs šķīvja, uz tā uzkrājas šķidrums slānis pārteces caurules izvērztās daļas augstumā. Turpinot absorbenta pievadišanu, absorbents pa pārteces caurulēm aizplūst uz nākamo — zemāk esošo šķīvi utt. No pēdējā šķīvja šķidrums ieplūst kolonnas apakšējā daļā un tur to izvada no iekārtas.

Pārteces cauruļu vietā lieto arī segmentveida šķidrums noplūdes (11.15. att. a, b).

Gāzveida fāzi kolonnā ievada no apakšas. Pa gāzes novadišanas caurulēm gāze (tvaiks) šķīvjos ceļas uz augšu. Gāzes novadišanas



11.14. att. Absorbēšanas kolonna ar zvanu šķīvjiem.



11.15. att. Zvanu šķīvja un S veida šķīvja darbības shēmas.

caurules pārsegtas ar zvaniem. Zvanu apakšējās robotās malas iegremdētas šķidrumā un veido hidraulisko slēgu, tādēļ gāze spiesta mainīt savu virzienu un burbuļot cauri šķidruma slānim. Šajā vietā gāze saskaras ar šķidro fāzi un notiek masas apmaiņa. Pēc barbotēšanas cauri šķidrums slānim gāzveida fāze pārvietojas tālāk uz nākamo šķīvi, kur atkārtojas masas apmaiņa, tā turpinoties visā kolonnas augstumā. No augšējā šķīvja gāzveida fāzes inerto daļu aizvada no kolonnas.

Zvanu šķīvja darbības shēma parādīta 11.15. attēlā *a*. Gāzveida (tvaika) fāze pa gāzes novadišanas caurulēm plūst tālāk līdz zvana robotajām malām, kur tā veido gāzes burbuļu virknes. Tās plūst cauri šķidrums slānim, kur saplūst cita ar citu. Tādējādi daļēji atsedzas zvana apakšējā daļā esošie robiņi un veidojas kanāli, pa kuriem gāze (tvaiks) aizplūst no zvaniem. Galvenā kontakta virsma gāzei (tvaikam) ar šķidrums nav barbotāžas daļa, bet gan putu un šļakatu slānis, kas veidojas virs šķidrums slāņa gāzes (tvaika) un šķidrums berzes rezultātā. Putu un šļakatu slāņa veidošanās atkarīga no gāzveida fāzes plūsmas ātruma un zvana iegremdes dziļuma.

Lai gāzes plūsmu novirzītu pa gāzes novadišanas caurulēm, šķidrums pārteces cauruļu apakšējiem galiem jābūt iegremdētiem šķidrums. Tā rodas hidrauliskais slēgs, kas novērš gāzveida fāzes plūsmu pa pārteces caurulēm.

Lai veidotos lielāka saskares virsma starp fāzēm un gāzveida fāze vienmērīgāk sadalītos pa visu šķīvi, uz šķīvja novieto nevis vienu, bet daudzus zvanus. Vienu zvanu lieto tad, ja šķidrums fāzē var uzkrāties mehāniskie piemaisījumi (sodas rūpniecībā). Attālums starp zvaniem ir neliels, vidēji $1,5 d_z$, kur d_z — zvana diametrs.

Parasti zvanus veido apaļus (11.16. att. *a*), koniskus (11.16. att. *b*), retāk taisnstūrains. Nelielām kolonnas slodzēm, ja pieļaujama barbotāžas perimetra samazināšana, lieto tunelveida zvanus ar balstiem abos galos (11.16. att. *c*).

S veida elementu šķīvis. Šādu šķīvi sauc arī par Unifluka šķīvi. Tas parādīts 11.15. attēlā *b*. Šķīvi komplektē no S veida elementiem, kas veido gāzes (tvaika) noplūdes spraugas. Gāze (tvaiks) plūst no vienas puses, un tas veicina šķidrums fāzes plūsmas virzīšanos uz pārteci.

Sietveida šķīvi. Zvanu šķīvi pēc konstruktīvā izveidojuma ir sarežģīti. Daudz vienkāršākas ir kolonnas ar sietveida šķīviem (11.17. att.). Šādas kolonnas šķīvi veidoti no caurumota metāla diska *I*, kura caurumu diametrs $2 \dots 8$ mm. Kad sasniegts noteikts gāzveida fāzes ātrums, šķidrums neplūst cauri šķīvja caurumiem,

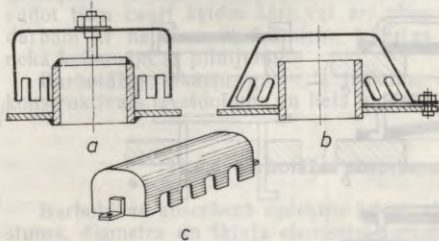
bet pārvietojas uz segmentveida pārteci 2. Pārteces augstums virs šķīvja nosaka šķidrums slāņa biezumu h uz šķīvja. Gāze (tvaiks) plūst pa caurumiem un sīku burbuliņu un strūkliņu veidā pārvietojas cauri šķidrums slānim. Gāzveida fāzes plūsmas rezultātā virs šķidrums slāņa veidojas putu un šlakatu josla, kurā notiek intensīva masas apmaiņa.

Sietveida šķīvji daudz efektīvāki par zvanu šķīvjiem. Galvenais sietveida šķīvju trūkums ir tas, ka tie labi darbojas tikai samērā šaurā slodzes diapazonā. Gāzes (tvaika) spiedienam un ātrumam jābūt tādiem, lai nepieļautu šķidrās fāzes tecēšanu cauri sietam. Pat īslaicīga gāzes (tvaika) pieplūdes pārtraukšana rada šķidrās fāzes notecešanu no šķīvjiem, un kolonnas darbināšana jāsāk no jauna. Sietveida šķīvju efektivitātes paaugstināšanai cenšas panākt ilgstošāku kontaktu starp šķidro fāzi un gāzveida fāzi. Kolonna var normāli darboties, ja šķīvji novietoti horizontāli, jo citādi tvaiks virzīsies tur, kur mazāka pretestība, un pasliktināsies masas apmaiņa. Ja gāzes (tvaika) ātrumi ir lieli, sietveida šķīvju pretestība ievērojami pieaug un var pārsniegt zvanu šķīvju pretestību.

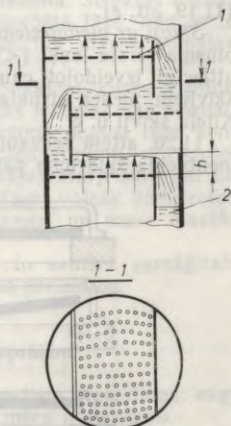
Caurteces šķīvji. Caurteces šķīvji ir visvienkāršākie un lētākie šķīvji. Tie veidoti no caurumota (caurumi apaļi vai garenī) metāla diska (11.18. att. *a, A*) vai no plānām metāla sloksnēm (11.18. att. *a, B*). Atšķirībā no sietveida šķīvjiem caurteces šķīvji ir bez pārteces caurulēm, tādēļ šķidrā fāze un gāzveida fāze plūst cauri spraugām (caurumiem). Caurteces šķīvjiem salīdzinājumā ar zvanu šķīvjiem, ja ir vienāds barbotāžas augstums, caurlaides spēja ir par 20... 100% lielāka un pretestība par 40... 80% mazāka.

Caurteces šķīvjiem, tāpat kā sietveida šķīvjiem, jāievēro noteikta minimālā slodze, kuru nedrīkst samazināt, jo citādi šķidrā fāze nenoturēsies uz šķīvjiem.

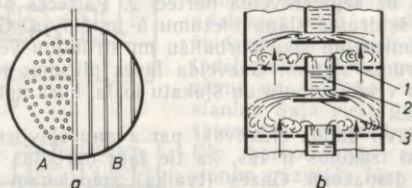
Šķīvji ar divām fāžu kontakta joslām. Šāds šķivis redzams 11.18. attēlā *b*. Tas sastāv no šķīvja *1*, ko veido disks ar



11.16. att. Zvanu shēmas.



11.17. att. Absorbijas kolonnas daļa ar sietveida šķīvjiem.



11.18. att. Daži šķīvjū veidi:

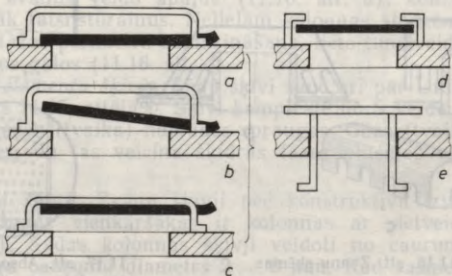
a — caurteces šķivis, *b* — šķivis ar divām fāžu kontakta joslām.

caurumiem, spraugām, vārstiem u. tml., un šķidrums pārtēces caurules 2. Pārtēces caurules novietotas cita zem citas un nesniedzas līdz apakšējam šķīvim. Zem pārtēces caurules novietots metāla disks 3, kas nodrošina šķidrums izplūdi starpšķīvju telpā strūklu veidā. Saskaņā starp gāzi (tvaiku) un šķidrumu notiek vispirms uz šķīvja, pēc tam starpšķīvju telpā.

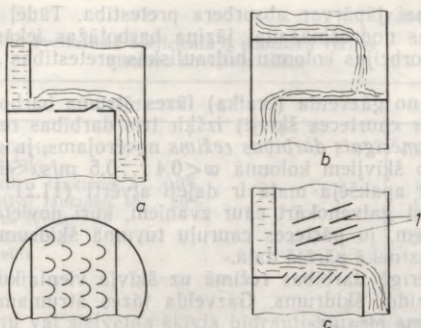
Šķīvi ar vārstiem. Šā veida šķīvjos esošos caurumus (to diametrs 8...35 mm) pārsež ar viegliem vārstiem (apaļas vai taisnstūrains metāla plāksnītes), kas nodrošina normālu kolonnas darbību plašā gāzes fāzes patēriņa intervālā. Vārstu pacēlums (līdz 7 mm) atkarīgs no absorberā ievadāmā gāzes daudzuma. 11.19. attēlā *a*, *b* un *c* redzams taisnstūrainis vārsts (aizvērts, daļēji atvērts un pilnīgi atvērts), bet 11.19. attēlā *d* — daļēji atvērts apaļš vārsts. Ir vēl arī citas vārstu konstrukcijas, piemēram, vārsts ar fiksatoru (11.19. att. *e*).

Šķīvi ar vienvirziena fāžu kustību. Aplūkojamos šķīvjos abu fāžu plūsma vērsta leņķī ($<90^\circ$) pret šķīvja virsmu. Sādu plūsmu iegūst, attiecīgi izveidojot caurumus vai spraugas šķīvī. Pie šās grupas šķīvjiem pieder strūklas (zvīņveida, plākšņu, kaskādveida) šķīvi, Kiteļa šķīvi u. c.

11.20. attēlā redzami daži strūklas šķīvi. Uz šķīvjiem nav segmentveida šķidrums pārtēces sliekšņa. Uz dažiem šā veida šķīvjiem



11.19. att. Šķīvi ar vārstiem.



11.20. att. Strūklas šķīvji.

pilienu līdzraušanas aizkavēšanai novietoti atsitiena vairogī *I*. 11.20. attēlā *a* parādīts *zvirņveida šķivis*, kas ir metāla disks ar daļēji izspiestiem caurumiem. Pie caurumiem palikušās metāla plāksnītes noliekta vienādā leņķī. 11.20. attēlā *b* redzams *kaskādveida šķivis*. 11.20. attēlā *c* parādīts *žalūzījveida šķivis*, kas izgatavots no vienādā attālumā un slīpumā saliktām metāla sloksnēm.

Aplūkotie šķīvji darbojas barbotāžas režīmā arī tad, ja gāzveida fāzes ātrums ir neliels un šķidrums līmenis zems. Palielinoties gāzes ātrumam, barbotāžas režīms pāriet strūklas režīmā. Strūklas režīmā dispersijas vide ir gāze un šķidrums ir disperģētā fāze, līdz ar to veidojas liela fāžu saskares virsma, kas veicina masas apmaiņu starp fāzēm.

Barbotāžas kolonnām salīdzinājumā ar kolonnām, kurās ir pildījuma slānis, ir šādas priekšrocības: barbotāžas iekārtas var normāli darbināt plašā aprasināšanas blīvuma diapazonā; iegūst labu kontaktu starp fāzēm; viegli aizvadīt atbrīvojušos siltumu, novietojot dzesējošās virsmas uz šķīvjiem vai dzesinātājus starp šķīvjiem un vadot tiem cauri šķidro fāzi vai arī abas fāzes; vairāk piemērotas darbam ar netīriem šķidrumiem; iekārtas izmēri un masa mazāki nekā kolonnām ar pildījumu.

Barbotāžas iekārtu galvenie trūkumi ir to samērā sarežģītais konstruktīvais izveidojums un lielā hidrauliskā pretestība.

11.4.4. Barbotāžas absorberu aprēķins

Barbotāžas absorberu aprēķins ietver absorbera pretestības, augstuma, diametra un šķīvja elementu pamatizmēru noteikšanu.

Šķīvju absorberu pretestības noteikšana. Lai varētu noteikt absorbcijas (arī rektifikācijas) iekārtas optimālo režīmu, jāzina gāzveida (tvaika) fāzes maksimālais pieļaujamais ātrums. Šī ātruma

nodrošināšanai jāpārvar absorbera pretestība. Tādēļ efektīvas masas apmaiņas nodrošināšanai jāzina barbotāžas iekārtu hidrodinamika un absorbcijas kolonnu hidrauliskās pretestības aprēķināšanas metodika.

Atkarībā no gāzveida (tvaika) fāzes ātruma barbotāžas iekārtās (izņēmums ir caurteces šķīvji) izšķir trīs darbības režīmus.

1. *Nevienmērīgais darbības režīms* novērojams, ja gāzveida fāzes ātrums starp šķīvjiem kolonnā $\omega < 0,4 \dots 0,5$ m/s. Šādos apstākļos zvana robiņi apakšējā malā ir daļēji atvērti (11.21. att. a). Gāze (tvaiks) plūst galvenokārt caur zvaniem, kuri novietoti tuvāk pārteces caurulēm, jo pārteces cauruļu tuvumā šķidrums līmenis nedaudz zemāks nekā pārējā daļā.

Nevienmērīgā darbības režīmā uz šķīvja vienlaikus ir šūnveida putas un dzidrš šķidrums. Gāzveida fāzes ātrumam palielinoties, putu daudzums pieaug.

Sietveida kolonnās ar nelielu gāzes (tvaika) ātrumu novērojama šķidrās fāzes pastiprināta caurtece, un gāze neplūst caur visiem caurumiem, bet tikai caur daļu no tiem.

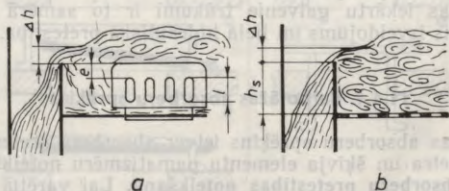
2. *Vienmērīgais darbības režīms* veidojas, palielinot gāzes (tvaika) ātrumu. Šajā režīmā uz zvana šķīvjiem pilnīgi atveras zvana apakšmalas robiņi. Gāze (tvaiks) no zvana izplūst strūklū veidā. Šķidrums pārvēršas šūnveida putās. Sietveida šķīvjos gāze (tvaiks) plūst cauri visiem caurumiem.

3. *Gāzes strūklū un šlakatu režīms* novērojams, ja gāzes (tvaika) ātrums $\omega > 0,9 \dots 1,1$ m/s. Šajā režīmā šūnveida putas noārdās un to vietā rodas augsti turbulizēts gāzes—šķidrums maisījums. Virs putām veidojas liels daudzums šlakatu. Tālāka gāzes (tvaika) ātruma palielināšana rada šķidrās fāzes līdzraušānu un tās pārņēšanu uz nākamo šķīvi.

Šķīvja hidrauliskā pretestība Δp_s neatkarīgi no šķīvja veida izsakāma kā triju pretestību summa:

$$\Delta p_s = \Delta p_s + \Delta p_\sigma + \Delta p_{st}, \quad (11.14)$$

kur Δp_s — sausā šķīvja pretestība; Δp_σ — pretestība, kuru rada šķidrās fāzes virsmas spraigums; Δp_{st} — hidrostatiskā pretestība, kuru rada uz šķīvja esošais šķidrums slānis.



11.21. att. Apzīmējumi hidrostatiskās pretestības aprēķināšanai:

a — zvana šķīvim, b — sietveida šķīvim.

Pretestības koeficienta ζ skaitliskā vērtība
atkarībā no šķīvja veida

Šķīvja veids	ζ
Zvanu šķīvis	4,5 .. 5
Sietveida šķīvis	
ar aktīvo laukumu 7...10%	1,82
ar aktīvo laukumu 15...20%	1,45
Caurteces šķīvis:	
ar caurumiem	2,1
režģveida	1,4...1,5
vārstu	3,6

Sausa zvanu vai sietveida šķīvja hidrauliskā pretestība izsakāma šādi:

$$\Delta p_s = \zeta \frac{\rho_y \omega_y^2}{2}, \quad (11.15)$$

kur Δp_s — sausa šķīvja hidrauliskā pretestība, Pa; ρ_y — gāzes (tvaika) blīvums, kg/m³; ω_y — gāzes (tvaika) ātrums zvana robiņos vai sieta caurumos, m/s; ζ — pretestības koeficients, kura skaitliskās vērtības sakopotas 11.4. tabulā.

Virsmas sprauguma izraisītā pretestība izsakāma šādi:

$$\Delta p_\sigma = \frac{4\sigma}{d_{ekv}}, \quad (11.16)$$

kur Δp_σ — virsmas sprauguma izraisītā pretestība, Pa; σ — virsmas spraigums, N/m; $d_{ekv} = \frac{4S_s}{\kappa}$ — zvana robiņa ekvivalentais diametrs, m; $S_s = hb$ — robiņa brīvais laukums, m²; κ — robiņa perimetrs, m; h — robiņa augstums, m; b — robiņa platums, m.

Sietveida šķīvjiem, ja cauruma diametrs $d < 1$ mm, tad $d_{ekv} = d$, ja $d > 1$ mm, tad $d_{ekv} = 1,38d$. Caurteces šķīvjiem ar apaļiem caurumiem $d_{ekv} = d$, bet ar spraugām $d_{ekv} = 2a_s$, kur a_s — spraugas platums, m.

Hidrostatisko pretestību šķīvjiem aprēķina šādi:

$$\text{zvanu šķīvjiem } \Delta p_{st} = 1,3g\rho_p \left(l + \frac{e}{2} + \Delta h \right);$$

$$\text{sietveida šķīvjiem } \Delta p_{st} = 1,3g\rho_p (h_s + \Delta h);$$

$$\text{caurteces šķīvjiem: } \Delta p_{st} = g\rho_p H_p,$$

kur Δp_{st} — šķīvja hidrostatiskā pretestība, Pa; g — brīvās krišanas paātrinājums, m/s²; H_p — putu slāņa augstums uz šķīvja, m; lielumi e , l , Δh , h_s — doti 11.21. attēlā, m; ρ_p — putu blīvums (pieņem, ka $\rho_p = 400 \dots 600$ kg/m³). Lieluma Δh aprēķināšanai lietojama formula (11.27).

Putu slāņa augstumu uz šķīvja var aprēķināt pēc formulas:

$$H_p = 4d_{ekv} Fr^{0,2}, \quad (11.17)$$

kur H_p — putu slāņa augstums, m; Fr — Frūda kritērijs, $Fr = \omega_y^2 / (g d_{ekv})$, d_{ekv} — gāzes (tvaika) noplūdes atveres ekvivalentais diametrs, m; ω_y — gāzes ātrums atverēs, m/s.

Pēc šķīvja hidrauliskās pretestības Δp_s aprēķināšanas ieteicams pārbaudīt, vai pieņemtais attālums starp šķīvjiem H_{sk} ir pietiekams (sk. vienādojumu (11.23)).

$$H_{sk} > 1,8 \Delta p_s / (\rho_y g). \quad (11.18)$$

Zvanu šķīvjiem hidrauliskā pretestība ir 245...490 Pa (25...50 mm H₂O), ja iekārta darbojas atmosfēras spiedienā. Vakuumiekārtām šķīvja hidrauliskā pretestība nedaudz mazāka.

Visu šķīvju pretestība kolonnā ir

$$\Delta p_k = \Delta p_s n_t,$$

kur n_t — faktiskais šķīvju skaits kolonnā.

Absorbera augstuma aprēķināšana. Šķīvju absorbera augstums aprēķināms šādi:

$$H = H_{sk} (n_t - 1). \quad (11.19)$$

Nepieciešamā šķīvju skaita noteikšana. Absorbcijai (rektifikācijai) nepieciešamā faktiskā šķīvju skaita noteikšanas pamatā ir vienādojumi (10.64), (10.70), (10.71) un $Y-X$ diagramma, jo tad iespējams iegūt sakarību, kāda pastāv starp šķidro fāzi un gāzveida fāzi, tām uzplūstot uz šķīvja un aizplūstot no tā. Pieņem, ka gāzveida fāzes sastāvs mainās, bet šķidrās fāzes sastāvs visos šķīvja punktos paliek nemainīgs. Minētais pieņēmums nav pareizs liela diametra (lielāki par 1 m) šķīvjiem, jo uz tādiem šķidrajai fāzei ir koncentrācijas gradients.

Faktiskā šķīvju skaita noteikšanai absorbcijas (rektifikācijas) barbotāžas kolonnām pēc vienādojuma (10.64) aprēķina kopējo pārnesto vienību skaitu $n_y = k_{ys} S_a / G_y$, kur k_{ys} — masas pārejas virsmas koeficients, kg/(m²·s); S_a — šķīvja aktīvais (darba) laukums, m²; G_y — gāzes fāzes patēriņš, kg/s.

Masas pārejas virsmas koeficientu aprēķina pēc vienādojuma (10.63).

$$k_{ys} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{ys}} + \frac{A_1}{\beta_{xs}}},$$

kur β_{ys} , β_{xs} — masas atdeves virsmas koeficienti gāzveida un šķidrajai fāzei, kg/(m²·s); A_1 — līdzsvara liknes leņķa koeficients (sk. vienādojumu (10.3)).

Masas atdeves koeficienti β_{ys} un β_{xs} aprēķināmi pēc šādiem vienādojumiem:

$$\beta_{ys} = 6,24 \cdot 10^5 S_a D_y^{0,5} \left(\frac{\omega}{\varepsilon} \right)^{0,5} h_0 \left(\frac{\mu_y}{\mu_x + \mu_y} \right)^{0,5} \rho_y, \quad (11.20)$$

$$\beta_{xs} = 6,24 \cdot 10^5 D_x^{0,5} \left(\frac{U}{1 - \varepsilon} \right)^{0,5} h_0 \left(\frac{\mu_y}{\mu_x + \mu_y} \right)^{0,5} \rho_x, \quad (11.21)$$

kur S_a — šķīvja aktīvā šķērsriezuma daļa, m^2/m^2 ; D_y, D_x — absorbējamā komponenta molekulārās difūzijas koeficienti gāzē un šķidrumā, m^2/s ; $\frac{U}{1-\varepsilon}, \frac{\omega}{\varepsilon}$ — vidējie šķidruma un gāzes ātrumi barbotāžas slānī, m/s ; ω — gāzes ātrums kolonnā, m/s ; h_0 — dzidrā šķidruma slāņa augstums uz šķīvja, m ; ε — gāzes saturs putu slānī, m^3/m^3 .

Gāzes ātrumu kolonnā aprēķina atkarībā no šķīvja konstruktīvā izveidojuma.

Zvanu šķīvjiem $\omega = \frac{0,0155 \sqrt{\rho_x}}{d_z^{2/3}} \frac{\rho_x}{\rho_y} h_z$, kur ω — gāzes ātrums kolonnā, m/s ; d_z — zvana diametrs, m ; h_z — attālums no zvana virsmas līdz nākamajam šķīvim, m .

Sietveida šķīvjiem $\omega = 0,05 \sqrt{\rho_x / \rho_y}$.

Vārstu šķīvjiem $\omega^{1,85} = (m_v / S_0) \cdot 2g / (\zeta \rho_y)$, kur m_v — vārsta masa, kg ; S_0 — cauruma laukums zem vārsta, m^2 ; ζ — pretestības koeficients, pieņem, ka $\zeta = 3$.

Gāzes saturu putu slānī ε barbotāžas šķīvjiem (izņēmums ir caurteces šķīvji) aprēķina pēc formulas $\varepsilon = \sqrt{Fr} / (1 + \sqrt{Fr})$, kur Fr — Frūda kritērijs, $Fr = \omega^2 / (gh_0)$.

Dzidrā šķidruma slāņa augstumu uz šķīvja h_0 aprēķina atkarībā no šķīvja konstruktīvā izveidojuma.

Caurteces šķīvjiem $h_0 = (1 - \varepsilon) h_p$, kur h_p — putu slāņa augstums virs šķīvja, m ; $h_p = \omega^2 / (S_a^2 g Fr)$.

Zvanu šķīvjiem $h_0 = 0,0419 + 0,19 h_n - 0,0135 \omega \sqrt{\rho_y} + 2,46 q$, kur h_n — pārtieces sliekšņa augstums uz šķīvja, m ; q — lineārais aprasināšanas blīvums, $m^3/(m \cdot s)$, $q = Q_x / b$; Q_x — absorbenta caurtece, m^3/s ; b — pārtieces platums, m .

Šķīvja aktīvais (darba) laukums $S_a = \varphi S_k$, kur S_k — kolonnas šķērsriezuma laukums, m^2 , $S_k = 0,785 d_k^2$; d_k — kolonnas diametrs, m ; φ — koeficients, kas rāda, kāda daļa no šķīvja ir aktīva, realizējot masas apmaiņu. Ja šķīvim nav šķidrās fāzes pārtieces ietaises, tad $\varphi = 1$ (caurteces šķīvji). Ja šķīvim ir pārtieces ietaises, tad $\varphi < 1$;

$\varphi = \frac{S_k - S_p}{S_k}$, kur S_p — pārtieces ietaises laukums, m^2 .

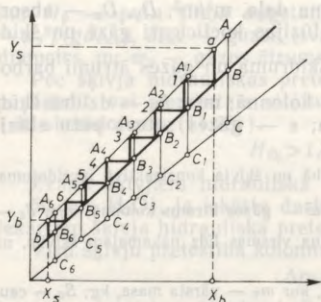
Aprasināšanas blīvums U caurteces šķīvjiem ir šāds:

$$U = Q_x / S_k, \quad (11.22)$$

kur U — aprasināšanas blīvums, $m^3/(m^2 \cdot s)$; Q_x — absorbenta caurtece, m^3/s .

Pēc masas pārejas virsmas koeficienta k_{ys} aprēķināšanas nosaka kopējo pārnesto vienību skaitu n_y . Izmantojot vienādojumu (10.70), aprēķina pakāpienu efektivitāti E_y .

Absorbcijas (rektifikācijas) kolonnām faktiskā šķīvju skaita noteikšanai ērti lietot kinētisko likni. $Y-X$ diagrammā (11.22. att.) uzvelk līdzsvara likni un darba taisni. Starp līdzsvara likni un darba taisni velk brīvi izraudzītus vertikālus nogriežņus (AC, A_1C_1, A_2C_2 utt.). Izmērot attālumu AC (milimetros), pēc formulas (10.71) ($AB = E_y AC$) aprēķina nogriežņa AB garumu (milimetros). No punkta A uz leju atliek nogriezni AB un iegūst punktu B . To pašu atkārto ar A_1C_1, A_2C_2 u. c. un iegūst attiecīgos punktus B_1, B_2 u. c. Caur iegūtajiem punktiem B, B_1, B_2 u. c. velk procesa kinētisko likni. No



11.22. att. Šķīvju skaita noteikšana, izmantojot kinētisko likni.

punkta *a*, kas atbilst gāzveida un šķidrās fāzes parametriem kolonnas apakšā, veido pakāpienus līdz punktam *b* (gāzveida fāzes un šķidrās fāzes parametri kolonnas augšā).

Iegūto vertikāļu (*a*, 1, 2, 3 utt.) skaits norāda faktiski nepieciešamo šķīvju skaitu. Dotajā gadījumā nepieciešami $n_t = 8$ šķīvji gāzveida fāzes koncentrācijas maiņai no Y_s līdz Y_b .

Nepieciešamo faktisko šķīvju skaitu n_f var noteikt arī analītiski, vadoties no šķīvja aktīvā laukuma S_a , jo

$$n_f = S/S_a,$$

kur S — procesa realizēšanai nepieciešamā kopējā fāžu saskares virsma, m^2 . Kopējo fāžu saskares virsmu iegūst no vienādojuma (10.51).

Attālums starp šķīvjiem. Eksperimenti rāda, ka attālumam starp šķīvjiem ir noteikta ietekme uz masas apmaiņas procesiem.

Attālums starp kolonnas šķīvjiem $H_{\text{šk}}$ summējas no dzidrā šķidrumsa slāņa H_s , putu slāņa H_p un separācijas telpas augstuma H_{sep} , t. i.,

$$H_{\text{šk}} = H_s + H_p + H_{\text{sep}}. \quad (11.23)$$

Dzidrā šķidrumsa slāņa augstums H_s atkarīgs no šķīvja konstruktīvā izveidojuma, un tas sasniedz pat 50 mm. Putu slāņa augstumu aprēķina pēc formulas (11.17). Tvaika separācijas telpas augstumu virs putu slāņa nosaka pēc pieļaujamās šķidrās fāzes masas, kuru gāzes plūsma var pārvietot uz nākamo šķīvi (pieņem, ka tā vienāda ar 0,1 kg šķidrās fāzes uz 1 kg gāzveida fāzes).

Gāzes (tvaika) plūsmas līdzrauto šķidrumsa masu m_e aprēķina pēc formulas

$$m_e = C\alpha w^m / H_{\text{sep}}^n, \quad (11.24)$$

kur α — koeficients, kas atkarīgs no šķidrās fāzes īpašībām, $\alpha = 56,5 \cdot 10^{-3} (\rho_x / \sigma_x)^{1,1}$, kur σ_x — šķidrās fāzes virsmas spraigums, mN/m ; ρ_x — šķidrās fāzes blīvums, kg/m^3 .

11.5. tabula

Koeficienta C un pakāpju m un n vērtības

Šķīvju veids	C	m	n
Caurteces šķīvji	$1,4 \cdot 10^{-4}$	2,56	2,56
Vārstu šķīvji	$6,5 \cdot 10^{-5}$	2,15	2,5

Zvanu šķīvjiem H_{sep} aprēķināms no vienādojuma

$$3600EH_{sep}^{2,59}\mu_x\sigma^{0,4} = \alpha(\omega_y\sqrt{\rho_y/\rho_x}), \quad (11.25)$$

kur E — šķidrums masa, ko gāze (tvaiks) pārsviež no 1 m² aktivā šķīvja laukuma sekundē, kg/(m²·s); μ_x — dinamiskā viskozitāte, mPa·s.

Sietveida šķīvjiem

$$m_e = 7,7 \cdot 10^{-5} (73/\sigma_x) (\omega_y/H_{sep})^{3,2}. \quad (11.26)$$

Pēc vienādojuma (11.24) nosaka gāzes plūsmas līdzrauto šķidruma masu m_e un atkarībā no šķīvja konstrukcijas pēc formulām (11.24) ... (11.26) nosaka H_{sep} .

Ja pēc vienādojuma (11.23) iegūtais attālums starp šķīvjiem nepmierina prasības, kādas uzstāda vienādojums (11.18), tad H_{sk} noteikšana jāatkārto, mainot pieņemamos lielumus.

Kolonnas izgatavo ar šādiem attālumiem starp šķīvjiem: 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200 mm.

Kopējais kolonnas augstums

$$H_k = H_{sk}(n_t - 1) + h_1 + h_2,$$

kur H_k — izteikts metros; n_t — faktiskais šķīvju skaits kolonnā; h_1 — attālums no augšējā šķīvja līdz kolonnas vākam, m; $h_1 = 2H_{sk}$; h_2 — attālums starp kolonnas pamatu un apakšējo šķīvi, m, $h_2 = 3H_{sk}$.

Absorbcijas kolonnas diametra noteikšana. Absorbcijas (rektifikācijas) kolonnas diametra noteikšanas pamatā ir hidraulikā lietojamā caurteces formula

$$Q_y = \omega S_k.$$

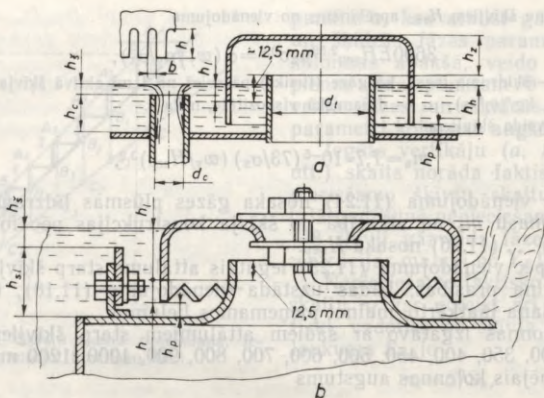
Ja iekārtas šķēluma laukums ir riņķis, tad $S_k = \frac{\pi d_k^2}{4}$, un nepieciešamais kolonnas diametrs

$$d_k = \sqrt{\frac{Q_y}{0,785\omega}},$$

kur d_k — kolonnas diametrs, m; Q_y — kolonnai caurplūstošās gāzes (tvaika) patēriņš, m³/s; ω — gāzveida fāzes ātrums starpšķīvju telpā, m/s.

Gāzveida fāzes ātrumu brīvā kolonnas šķēlumā (starp šķīvjiem) izvēlas tādu, lai kolonna darbotos vienmērīgā režīmā vai gāzes strūklu un šļakatu režīmā. Gāzveida fāzes ātrums nedrīkst pārsniegt zināmu ātruma robežu ω_r , virs kuras strauji palielinās līdzrausana uz nākamo šķīvi. Pieļaujamie gāzes (tvaika) ātrumi aprēķināmi pēc formulām, kas dotas 459. lappusē.

Atmosfēras spiedienā darbināmām iekārtām pieņem, ka gāzveida fāzes ātrums ir 0,5 ... 2 m/s. Kolonnās, kas darbojas retinājumā, gāzveida fāzes ātrums ir lielāks, turpretī kolonnās, kas darbojas paugstinātā spiedienā, gāzes (tvaika) ātrums ir mazāks.



11.23. att. Zvanu šķīvju pamatizmēri.

Kīmiskajā rūpniecībā plašāk lietojamiem kolonnas tipa aparātiem diametrs ir 0,4... 8 m. Naftas pārstrādes rūpniecās lieto kolonnas pat ar diametru 12 m un augstumu 50 m.

Šķīvja elementu pamatizmēru noteikšana. 11.23. attēlā parādīti pamatizmēri, kādi nosakāmi, izdarot zvanu šķīvju konstruktīvo aprēķinu.

Tvaika cauruļu kopējais šķēluma laukums S_c ir 10...15% no kolonnas šķēluma laukuma, t. i., $S_c = (0,1 \dots 0,15) S_k$.

Tvaika caurules diametrs

$$d_t = \sqrt{\frac{4S_c}{\pi n}}$$

kur n — tvaika cauruļu, resp. zvanu, skaits uz šķīvja.

Zvanu skaits uz šķīvja atkarībā no kolonnas diametra var sniegties simtos, piemēram, ja kolonnas diametrs $d_k = 1$ m, tad apaļo zvanu skaits $n = 27$; ja $d_k = 1,8$ m, tad $n = 91$; ja $d_k = 3$ m, tad $n = 273$.

Zvana robiņa platums $b = 4 \dots 10$ mm, bet augstums $h = 20 \dots 50$ mm (sk. 11.23. att. a). Robiņa augstums nedrīkst pārsniegt pārteces caurules augstumu h_c . Zvana robiņu kopējam laukumam jābūt vienādam ar tvaika caurules šķēluma laukumu.

Zvana attālumu virs tvaika caurules h_z izvēlas tādu, lai tvaika ātrumi caurulē un zem zvana būtu vienādi, t. i., tvaika caurules perimetra reizinājumam ar h_z jābūt vienādam ar tvaika caurules šķēluma laukumu.

Pārteces caurules diametru d_c aprēķina šādi:

$$d_c = \sqrt{\frac{4Q_x}{\pi n \omega_x}}$$

kur Q_x — faktiskā caurtece pa pārteces caurulēm, m^3/s (sk. formulu (11.28)); n — pārteces cauruļu skaits; ω_x — šķidrums plūsmas ātrums, m/s . Šķidrums ātrums pārteces caurulēs nepārsniedz $0,1 \dots 0,2$ m/s . Pārteces cauruļu vietā dažreiz lieto segmentveida pārteci (sk. 11.17. att.).

Šķidrums augstumu virs pārteces sliekšņa (caurules) Δh aprēķina pēc formulas

$$\Delta h = 0,68 (Q_x / \kappa)^{0,67}, \quad (11.27)$$

kur Q_x — šķidrums caurtece pārteci sliekšnim, m^3/s ; κ — pārteces perimetrs (garums), m ; caurulei $\kappa = \pi d_c$, m .

Faktiskā šķidrums caurtece Q_x saistīta ar tvaika fāzes līdzrauto šķidrums, tādēļ

$$Q_x = Q_a + \frac{G_y m_e}{\rho_x}, \quad (11.28)$$

kur Q_a — absorbenta caurtece kolonnā, m^3/s ; G_y — gāzes patēriņš, kg/s ; m_e — līdzrauto šķidrums daudzums, kg/kg (sk. vienādojums (11.24)); ρ_x — šķidrums fāzes blīvums, kg/m^3 .

Pārteces caurules augstums virs šķīvja aprēķina šādi:

$$h_c = h_n - \Delta h.$$

Šķidrums slāņa augstums virs šķīvja h_n ir $20 \dots 60$ mm .

Pārteces augstums h_s summējas no šādiem lielumiem:

$$h_s = h_1 - \Delta h + h + h_p,$$

kur h_1 — barbotāžas dziļums, m ; h — robiņu augstums.

Zvana pacēlums virs šķīvja h_p ietekmē masas apmaiņu; jo tas mazāks, jo masas apmaiņa realizējas labāk. Parasti $h_p = 0 \dots 10$ mm . Ja aprēķinātais $h_s < 45$ mm , tad pieņem, ka $h_s = 45$ mm .

Barbotāžas dziļums h_1 aprēķināms pēc formulas:

$$h_1 = (0,7 / \rho_x) p^{0,35}, \quad (11.29)$$

kur p — absolūtais spiediens kolonnā, Pa .

Zvanus novieto 40 mm attālumā no kolonnas sienām, bet no pārteces caurulēm — 75 mm attālumā.

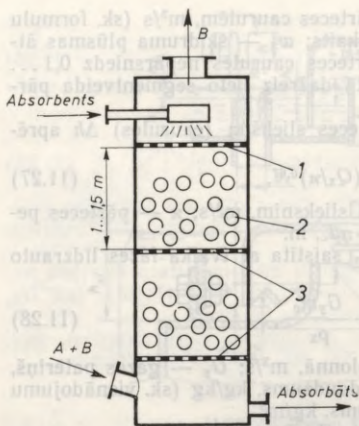
Sietveida un vārstu šķīvjiem (sk. 11.21. att.)

$$h_s = h_1 - \Delta h$$

un h_1 aprēķina pēc formulas (11.29) un Δh — pēc formulas (11.27).

11.4.5. Absorberi ar suspendētu pildījumu

Absorberos ar suspendētu pildījumu (11.24. att.) gāzes plūsmas uz tur pildījumu suspendētā stāvoklī. Par pildījumu lieto vieglas plastmasas (polietilēna, polipropilēna, putu stirola) un porains gumijas lodītes vai gredzenus 2. Gredzenveida pildķermeņiem augstāka masas apmaiņas intensitāte nekā lodītēm, bet lielāka hidrauliskā pretestība. Lodiņu slāņa augstums uz pamatreizēm $0,15 \dots 0,3$ m .



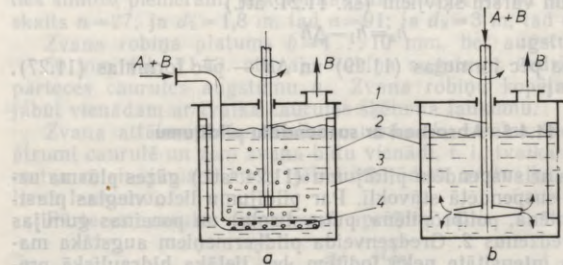
11.24. att. Absorbera ar suspendētu pildījumu shēma.

šķidrumus vai arī ja absorbcijas laikā rodas nogulsnes. Pildījuma nepārtrauktā kustība novērš aizsērējumus.

So absorberu negatīvās īpašības — samērā liela hidrauliskā pretestība, pildījuma nolietošana un šķidruma līdzraušana ar gāzveida fāzi.

11.4.6. Absorberi ar maisītājiem

Absorberi ar maisītājiem sastāv no tvertnes un mehāniskā maisītāja. Biežāk lieto turbīnveida maisītājus. Gāzveida fāze barbotē cauri šķidruma slānim. Maisītājs veicina gāzes burbuļu smalcinā-



11.25. att. Absorberu ar mehānisko maisītāju shēmas.

Pamatrežģu 3 aktīvais laukums 30...50%, bet norobežojošā režģa 1 aktīvais laukums — 80...90%.

Gaisa ātrums absorberā atmosfēras spiedienā ir līdz 7 m/s. Aprasināšanas blīvums 25...100 m³/(m²·h). Lai panāktu vienmērīgu lodīšu kustību, liela diametra absorberos telpu starp režģiem sadala ar šķērssienu kvadrātos, taisnstūros.

Šķidruma līdzraušanas samazināšanai absorberus izgatavo koniskus, ar gāzes ātrumu apakšā līdz 10 m/s un augšā — 1...2 m/s. Šā veida absorberi darbojas ar lieliem gāzes ātrumiem, pie tam neiestājas aizrīšanās. Absorberi ar suspendētu pildījumu izmantojami, ja ievērojami mainās slodzes; ja apstrādā putekļainas gāzes, netirus

šanu. Tas palielina saskares virsmu starp fāzēm un paaugstina masas apmaiņas intensitāti. Hidrauliskā pretestība šiem absorberiem atkarīga no šķidruma slāņa augstuma tvertnē un parasti ir liela. Šos absorberus lieto, ja nepieciešama ilga šķidruma uzturēšanās aparātā, piemēram, bioloģiskiem procesiem, ķīmiskām reakcijām u. c.

11.25. attēlā parādīti absorberi ar mehāniskiem maisītājiem. Absorbērs sastāv no tvertnes 2, kurā iepilda šķidro fāzi. Šķidrumā iegremdēts mehāniskais maisītājs 1. Lai maisīšanas laikā novērstu gaisa piltuves veidošanos, gar tvertnes sienām piestiprināti vairāgi 3. Gāzes fāzi pievada pa cauruli 4 zem maisītāja (11.25. att. a) vai pa dobu maisītāja vārpstu (11.25. att. b).

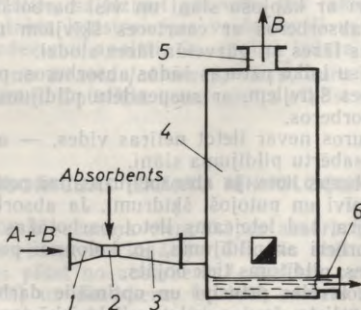
11.4.7. Izsmidzināšanas absorberi

Pie šīs grupas pieder absorberi ar sprauslām, ar mehānisku izsmidzināšanu un Venturi cauruli.

Absorberi ar sprauslām ir lēti, ar nelielu hidraulisko pretestību un var darboties arī, ja gāzes ir putekļainas. Tomēr tos samērā maz lieto, jo tiem ir zema efektivitāte.

Absorbenta izsmidzināšanai lieto arī rotējošas zvaigznītes, kas iegremdētas šķidrumā. Zvaigznītēm ātri rotējot, šķidrumu izsmidzina sīku pilienu veidā, tā palielinot saskares virsmu starp fāzēm un veicinot masas apmaiņu.

Efektīvākie ir Venturi absorberi, kuru veidi ir dažādi. 11.26. attēlā parādītajā absorberā gāzi ievada konfuzorā 1. Absorbentu pievada Venturi caurules šaurākajā vietā 2. Difuzorā 3 notiek intensīva fāzu samaisīšanās. Telpu 4 izmanto par separatoru, kur pa pieskari ievada gāzes un šķidruma maisījumu (gāzes fāzes nodalīšanai no šķidruma). Gāze aizplūst pa separatora augšu 5, bet absorbātu izvada pa cauruli 6.



11.26. att. Venturi absorbera shēma.

11.5. DAŽĀDAS KONSTRUKCIJAS ABSORBERU SALĪDZINOŠS RAKSTUROJUMS UN TO LIETOŠANA

Izraugoties absorberus, jāvadās no procesa tehnoloģiskajām prasībām un ekonomiskajiem rādītājiem. Salīdzinot vairākus konkrētajam gadījumam piemērotus absorberus, jāievēro to cena, izgatavošanas grūtības, metālu un citu materiālu patēriņš, ekspluatācijas ērtības u. c.

Salīdzinot visus iepriekš apskatītos absorberus, var izdarīt šādus secinājumus.

1. Ja aprēķināts, ka kopējais pārnesto vienību skaits $n_y < 2$, tad var lietot ikvienu absorberu;

ja $n_y = 2 \dots 5$, nav lietojami absorberī ar mehāniskiem maisītājiem;

ja $n_y > 5$, nav lietojami cauruļu un plāksņu plānslāņa absorberī, absorberī ar stacionāru un suspendētu pildījuma slāni, ar mehāniskiem maisītājiem un izsmidzināšanu.

2. Atkarībā no tilpumu attiecības starp šķidro fāzi Q_x un gāzes fāzi Q_y nav lietojami šādi absorberī:

ja $Q_x/Q_y < 0,001$, nav lietojami cauruļu un plāksņu plānslāņa absorberī, absorberī ar stacionāru un suspendētu pildījuma slāni, ar mehānisku maisītāju un ar izsmidzināšanu pa sprauslām;

ja $Q_x/Q_y = 0,001 \dots 0,005$, nav izmantojami plānslāņa absorberī ar kāpjošu slāni, ar mehāniskiem maisītājiem un ar izsmidzināšanu pa sprauslām;

ja $Q_x/Q_y = 0,005 \dots 0,02$, nav izmantojami plānslāņa absorberī ar kāpjošu slāni un ar mehāniskiem maisītājiem;

ja $Q_x/Q_y > 0,02$, nav lietojami visi plānslāņa absorberī, barbotāžas absorberī ar zvanu šķīvjiem un ar suspendētu pildījumu.

3. Nevar nodrošināt siltuma novadišanu pašā absorberā: plāksņu absorberī, absorberī ar stacionāru un suspendētu slāni, nepārtrauktu barbotāžu un izsmidzināšanu.

4. Ja nepieciešams zems hidrauliskais spiediens, tad nav lietojami plānslāņa absorberī ar kāpjošu slāni un visi barbotāžas absorberī.

5. Barbotāžas absorberos ar caurteces šķīvjiem nav iespējams plaši mainīt šķidrās fāzes un gāzveida fāzes slodzi.

6. Šķidrā fāze isu laiku uzturas šādos absorberos: plānslāņa, barbotāžas ar caurteces šķīvjiem, ar suspendētu pildījuma slāni un izsmidzināšanas absorberos.

7. Absorberī, kuros nevar lietot netiras vides, — ar kāpjošu absorbenta slāni, ar sabētu pildījuma slāni.

Plānslāņa absorberus lieto, ja absorbciju realizē retinājumā un ja ir jāapstrādā agresīvi un putojoši šķidrums. Ja absorbcijas laikā ir mainīga temperatūra, tad ieteicams lietot barbotāžas aparātus, bet nav ieteicami absorberī ar pildījumu, jo, kolonnai periodiski izplešoties un saraujoties, pildījums tiek bojāts.

Kontakta veida izvēles principi un optimālie darba režīmi. Kolonnas ar pildījumu lieto, ja nav vēlams liela iekārtas pretestība, ja apstrādā agresīvas un viskozas vides, putojošus šķidrumus.

Grūti šķīstošām gāzēm vai arī tad, ja ir liels pārnesto vienību skaits n_y vai teorētiskais šķīvju skaits, gāzu absorbcijai piemērotāki maza izmēra pildķermeņi. Izvēloties pildķermeņus, vadās arī no spiediena zudumiem, kādi rodas, pārvarot slāņa hidraulisko pretestību. Tam liela nozīme, ja absorbcija notiek atmosfēras spiedienā. Darbinot aparātu paaugstinātā spiedienā, slāņa hidrodinamiskā spiediena zudumam nav lielas nozīmes. Paaugstināta spiediena kolonnās lieto maza izmēra sabērtā pildījuma slāņi, it īpaši gredzenus. Viegli šķīstošām gāzēm izvēlas liela izmēra pildķermeņus, kas sakrauti regulāri. Tad var izmantot lielākus gāzes ātrumus. Šādi absorberi ir lētāki, jo samazinās to diametrs.

Metāla pildķermeņus lieto, ja iespējama nogulšņu veidošanās un nepieciešama bieža kolonnas tīrīšana; vakuuma kolonnās, jo metāla pildķermeņiem lielāks brīvais tilpums salīdzinājumā ar porcelāna un keramikas pildķermeņiem. Porcelāna un keramikas pildķermeņus lieto tad, ja nav bieži jātīra kolonna vai arī ja sadala maisījumus ar agresīvu iedarbību uz metāla pildķermeņiem. Dažādu polimēru un grafīta pildķermeņus lieto ļoti agresīvām vidēm.

Jāatceras, — jo lielāki pildķermeņu izmēri, jo lielāks kolonnas ražīgums, bet zemāka tās efektivitāte, hidrauliskā pretestība un kopējā kolonnas izmaksa.

Rūpniecībā plašāk lieto šķīvjveida kolonnas ar pārteces ietaisēm. Kolonnās, kas darbojas ar vidēju fāžu slodzi, ieteicams lietot barbotāžas šķīvjus (zvanu, sietu, vārstu, S veida elementu) un strūklas barbotāžas šķīvjus (zviņveida, kaskādveida, sietveida ar atsitiena vairogjiem). Kolonnās, kas darbojas ar lielu šķidrās fāzes un mazu gāzes (tvaika) slodzi, ieteicams lietot šķīvjus ar divām fāžu kontakta joslām.

Kaskādveida šķīvjus lieto tad, ja gāze (tvaiks) satur sīkas daļiņas (piemēram, katalizatora putekļus vai koksas daļiņas pēc katalītiskā krekinga), kā arī rektificējot tvaikus, kas daļējas destruktijas rezultātā veido cietas daļiņas.

Līdzīgi kā pildķermeņus, arī šķīvjveida kontakta konstrukcijas ieteicams izvēlēties, salīdzinot galvenos tos raksturojošos lielumus. Objektīvu kontakta konstrukcijas veida izvēli veic, izdarot tehniski ekonomisko izdevumu analīzi. Šo analīzi izdara, salīdzinot izdevumus atkarībā no ātruma faktora $f_a = w\sqrt{p}$, kuru aprēķina dažādām caurteces slodzēm. Optimālā konstrukcija atbilst minimālam ātruma faktoram.

11.6. ABSORBCIJAS IEKĀRTU TEHNOLOĢISKĀS SHĒMAS

11.27. attēlā *a* redzama vienpakāpes absorbcijas iekārtas shēma ar daļēju absorbāta recirkulāciju. Pēc šīs shēmas daļu no iegūtā absorbāta, kas plūst no absorbera *1* apakšas cauri dzesinātājam *2* aizvada atpakaļ uz absorberu, iepriekš samaisot ar svaigu absorbentu. Šāda shēma izdevīga, ja absorbcijas gaitā izdalās daudz siltuma un nav iespējams noorganizēt siltuma aizvadišanu tieši no

absorbera (absorberos ar pildījumu). Var arī paaugstināt aprašīšanas blīvumu; tas pozitīvi ietekmē masas apmaiņu.

Ja *recirkulācijas pakāpe* r (uz 1 masas daļu svaigā absorbenta ievada r masas daļas absorbāta), tad materiālo bilanci var rakstīt šādi (\bar{Y} un \bar{X} izteikti vienībā kg/kg):

$$G_y(\bar{Y}_s - \bar{Y}_b) = G_x(r+1)(\bar{X}_b - \bar{X}_m) = G_x(\bar{X}_b - \bar{X}_s).$$

No šā vienādojuma

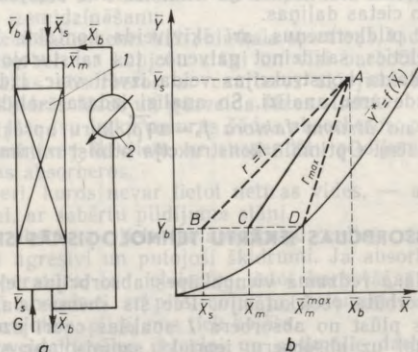
$$r = \frac{\bar{X}_m - \bar{X}_s}{\bar{X}_b - \bar{X}_m} \quad \text{un} \quad \bar{X}_m = \frac{\bar{X}_b r + \bar{X}_s}{r+1}.$$

Y - X diagrammā (11.27. att. *b*) līnija AB ir darba taisne absorberiem bez recirkulācijas, bet AC ir darba taisne absorberiem, ja recirkulācijas pakāpe ir r . Līnija AD ir darba taisne absorberiem, kas darbotos dotajās koncentrācijās ar maksimāli iespējamo recirkulācijas pakāpi $r_{\max} = \frac{\bar{X}_m - \bar{X}_s}{\bar{X}_b - \bar{X}_m^{\max}}$.

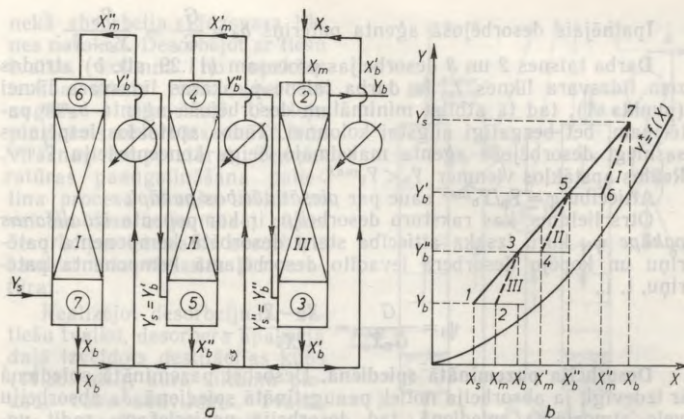
Ja recirkulācijas pakāpe ir r_{\max} , tad absorberā ievadāmā absorbenta koncentrācija \bar{X}_m^{\max} ir līdzsvarā ar aizplūstošās gāzes koncentrāciju \bar{Y}_b .

11.28. attēlā *a* redzama trīspakāpju absorbcijas iekārtas shēma ar daļēju absorbenta recirkulāciju, kura samērā plaši sastopama ķīmiskajā rūpniecībā. Y - X diagrammā (11.28. att. *b*) redzamas darba taisnes. Ja iekārta darbotos bez absorbenta recirkulācijas, tad darba taisne būtu $I-7$ un iekārta būtu līdzīga vienkāršajai absorbcijas iekārtai, kas sadalīta trīs pakāpēs $I-3$ (absorberam *III*), $3-5$ (absorberam *II*) un $5-7$ (absorberam *I*).

Ievērojot recirkulāciju, darba taisne absorberam *III* ir $2-3$; absorberam *II* — $4-5$ un absorberam *I* — $6-7$. Ja recirkulācijas pakāpe



11.27. att. Vienpakāpes absorbcijas iekārtas ar daļēju absorbenta recirkulāciju shēma.



11.28. att. Trispakāpju absorbcijas iekārtas ar daļēju absorbenta recirkulāciju shēma.

absorberos ir vienāda, tad darba taisnes ir paralēlas. Y - X diagrammā punktus 1, 2, 3... iegūst atkarībā no fāžu koncentrācijām absorberos. Aplūkotajā absorbcijas iekārtā, tāpat kā iepriekšējā shēmā, iespējams labi atdesēt absorbentu un paaugstināt aprasīnāšanas blīvumu.

Iekārtas ar absorbenta recirkulāciju ieteicamas tad, ja absorbējamais komponents vāji difundē šķidrā fāzē (mazs β_x).

Absorbcijai ar recirkulāciju ir arī trūkumi — palielinās celtniecības un ekspluatācijas izdevumi.

11.7. DESORBCIJA UN TĀS REALIZĀCIJAS VEIDI

Desorbcija ir absorbcijai pretējs process. To lieto absorbenta regenerēšanai vai absorbētā komponenta izdalīšanai no absorbāta. Desorbciju realizē desorberos, kas ir pretplūsmas kolonnas ar pildījumu vai šķīvjiem un kas analogi absorberiem. Desorbciju panāk, pazeminot spiedienu vai lietojot desorbējošus aģentus — ūdens tvaiku vai inertas gāzes.

Pieņemot, ka desorberā no augšas ievada absorbātu G_x (11.29. att. a) ar sākuma koncentrāciju \bar{X}_s , no desorbera aizplūst regenerētais absorbents ar koncentrāciju \bar{X}_b un no apakšas desorberā ievada desorbējošo aģentu G_y (parasti gaisu vai ūdens tvaiku) ar sākuma koncentrāciju $\bar{Y}_s = 0$ un beigu koncentrāciju \bar{Y}_b , tad materiālā bilance desorberam attiecībā uz desorbējamo komponentu ir šāda:

$$G_y \bar{Y}_b = G_x (\bar{X}_s - \bar{X}_b) = G,$$

kur G — desorbētā komponenta masa sekundē, kg/s.

$$\text{Ipatnējais desorbējošā aģenta patēriņš } b_d = \frac{G_y}{G_x} = \frac{Y_b}{X_s - X_b}.$$

Darba taisnes 2 un 3 desorbcijas procesam (11.29. att. b) atrodas zem līdzsvara liknes 1. Ja darba taisne pieskaras līdzsvara liknei (punkts A), tad tā atbilst minimālam desorbējošā aģenta b_d^{\min} patēriņam, bet bezgalīgi augstai kolonnai. Tādos apstākļos iespējams sasniegt desorbējošā aģenta maksimālo beigu koncentrāciju Y_b^{\max} . Reālos apstākļos vienmēr $Y_b < Y_b^{\max}$.

Attiecību $\varphi = Y_b / Y_b^{\max}$ sauc par *piesātinātības pakāpi*.

Otrs lielums, kas raksturo desorbciju, ir komponenta *izdališanas pakāpe* ψ_1 , kuru izsaka attiecība starp desorbētā komponenta patēriņu un kopējo desorberā ievadīto desorbējamā komponenta patēriņu, t. i.,

$$\psi_1 = \frac{G}{G_x X_s} = \frac{X_s - X_b}{X_s}.$$

Desorbcija pazeminātā spiedienā. Desorbēt pazeminātā spiedienā ir izdevīgi, ja absorbcija notiek paaugstinātā spiedienā. Ja absorbciju veic atmosfēras spiedienā, tad desorbcijā nepieciešams radīt vakuumu.

Ja uz desorbciju pazeminātā spiedienā aizvada absorbātu G_x ar sākuma koncentrāciju X_s un beigu koncentrāciju X_b , tad materiālās bilances vienādojums attiecībā uz desorbējamā komponentu ir

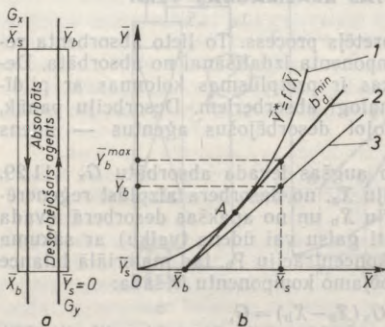
$$G_x X_s = G_A + (G_x - G_A) X_b.$$

Desorbētā komponenta patēriņš

$$G_A = \frac{G_x (X_s - X_b)}{1 - X_b}.$$

Komponenta izdališanas pakāpe

$$\psi_1 = \frac{G_A}{G_x X_s} = \frac{X_s - X_b}{(1 - X_b) X_s} = \frac{1 - X_b / X_s}{1 - X_b}.$$



11.29. att. Desorbcijas procesa shēma.

Lielumi G_A un ψ_1 sasniedz maksimālās vērtības, ja X sasniedz līdzsvara koncentrāciju.

Desorbciju ar siltuma pievadīšanu veic, sildot absorbentu ar tiešu vai ar netiešu tvaiku. Sildot ar tiešu tvaiku, šķīdumā komponenta tvaika parciālais spiediens ir augstāks par līdzsvara spiedienu desorbējošā aģentā, tādēļ komponents pārvietojas no šķīduma uz tvaiku (gāzi). Desorbējot ar tvaiku, process notiek augstākā temperatūrā

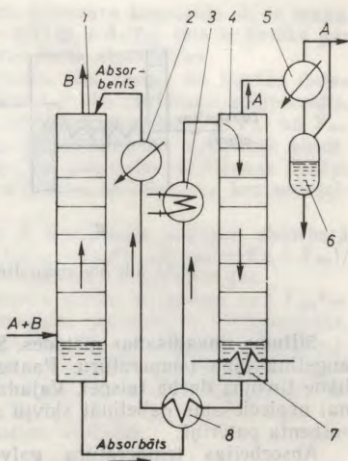
nekā absorbcija. Līdzsvara liknes nesakrīt. Desorbējot ar tiešu tvaiku, kolonnā no apakšas ievada ūdens tvaiku, bet no augšas — absorbātu. Uz leju plūstošais absorbāts sasilst līdz viršanas temperatūrai. Temperatūras paaugstināšana palieлина procesa virzošo spēku un veicina desorbciju, tādēļ pirms desorbcijas ieteicams absorbātu sasildīt līdz viršanas temperatūrai.

Realizējot desorbciju ar netiešu tvaiku, desorbēra apakšējā daļā izveidots destilācijas kubs (11.30. att.), kurā siltumu pievada caur sildvirsmu. Tvaiki, kas rodas no kubā esošā šķidruma, desorbcijas kolonnā ceļas uz augšu preti plūstošajam šķidrumam un izdala desorbējamo komponentu. Process notiek analogiski desorbcijai ar tiešu ūdens tvaiku.

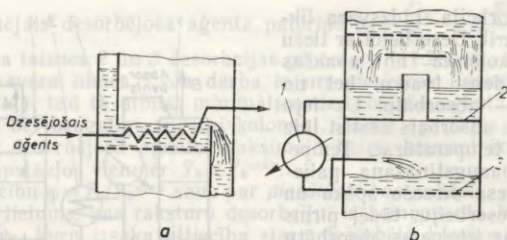
Desorbējot ar netiešu ūdens tvaiku, no desorbēra augšas aizplūst absorbenta tvaiks kopā ar desorbēto komponentu. Komponenta atdalīšanai tvaiku kondensē deflegmatorā, bet iegūto kondensātu aizvada atpakaļ kolonnas aprīsināšanai. Šādu desorbciju sauc par *desorbciju ar deflegmāciju*.

Desorbciju realizē arī ar inertām gāzēm. Parasti lieto gaisu. Desorbcijā ar gaisu ir liels gaisa patēriņš, līdz ar to niecīga komponenta koncentrācija aizplūstošajā gaisā.

11.30. attēlā redzama absorbcijas—desorbcijas iekārtas shēma ar absorbenta recirkulāciju. No absorbera 1 izplūstošo absorbātu sūknis (shēmā nav parādīts) pārvieto uz siltumapmainītāju 8. Siltumapmainītājā absorbātu silda reģenerētais absorbents, kas ar viršanas temperatūru izplūst no desorbēra 4. Pirms sasildīta absorbāta ievadīšanas desorbērā to siltumapmainītājā 3 uzsilda līdz viršanas temperatūrai un ievada desorbērā no augšas. Absorbāts, plūstot uz leju, saskaras ar tvaiku, kas ceļas no destilācijas kuba 7 uz augšu, un atbrīvojas no absorbētā komponenta A. Desorbētais komponents A kopā ar tvaiku aizplūst uz kondensatoru 5. Kondensāts saplūst tvertnē 6, bet komponentu A aizvada no iekārtas. Šajā gadījumā desorbcija notiek ar netiešu tvaiku. Desorbcijas pamatā ir absorbenta sildīšana desorbēra kubā. Reģenerēto absorbentu, kas plūst no desorbēra kuba, ievada siltumapmainītājā 8 un pirms aizvadīšanas uz absorberu dzesē dzesinātājā 2.



11.30. att. Absorbcijas—desorbcijas iekārta ar absorbenta recirkulāciju.



11.31. att. Adsorberu dzesēšanas veidu shēmas.

Siltuma novadīšanas metodes. Siltuma uzkrāšanās adsorberā paaugstina fāžu temperatūru. Paaugstinoties temperatūrai, līdzsvara likne tuvojas darba taisnei. Vajadzīgā adsorbcijas efekta sasniegšanai nepieciešams palielināt šķīvju skaitu aparātā. Palielinās arī adsorbenta patēriņš.

Absorbcijas temperatūra galvenokārt atkarīga no dzesējošā aģenta. Adsorbcijas procesos dzesēšanai izdevīgi lietot pat aukstumnesējus: amonjaku, propānu u. c.

Atkarībā no adsorbera veida dzesēšanu veic tieši adsorberā (11.31. att. *a*), dzesējošos elementus novietojot uz šķīvja vai izvietojot vienā vai divos adsorbera līmeņos siltuma novadīšanai aklos šķīvjus (11.31. att. *b*). No aklā šķīvja 2 karstais adsorbents aizplūst uz dzesinātāju 1. Atdzisušo adsorbentu aizvada uz šķīvi 3, no kura tas plūst pa adsorberu uz leju.

Vēl var minēt šādas dzesēšanas metodes: daļēja adsorbāta recirkulācija (sk. 11.27. att. *a*) vai vairākpakāpju adsorbcijas iekārtās dzesēšana starp pakāpēm (sk. 11.28. att. *a*).

11.8. DAUDZKOMPONENTU GĀZU MAISĪJUMU ADSORBCIJA

Līdz šim aprakstīta gāzveida maisījumu adsorbcija, ja tie sastāv no diviem komponentiem *A* un *B*. Komponentis *B* veido maisījuma inerto daļu.

Tālāk aplūkoti gāzveida maisījumi, kas sastāv no vairākiem komponentiem un inertas daļas, piemēram, komponenti *A*, *B*, ... un inerta daļa. Šādu gāzu maisījumus pakļauj adsorbcijai, lai iegūtu vienu (*selektīvā adsorbcija*) vai vairākus komponentus.

Selektīvā adsorbcija paredz no gāzu maisījuma saistīt tikai vienu komponentu. Selektivitāti adsorbcijā panāk, meklējot piemērotu adsorbentu un radot nepieciešamos adsorbcijas apstākļus (temperatūru, spiedienu, fāžu kontakta ilgumu).

Absorbējamam komponentam fāžu līdzsvara konstantei A_1 jābūt mazākai par citu komponentu līdzsvara konstantēm.

Ja absorbējamam komponentam līdzsvara konstante A_1 ir maza, tad masas pārejas koeficients $k_y = 1/(1/\beta_y + A_1/\beta_x)$ tam ir lielāks par k_y nekā citiem komponentiem, un tas ātrāk absorbēsies.

Ievadot absorberā gāzu maisījumu, kas sastāv no inertās daļas un komponentiem A un B , no kuriem A ir absorbējama komponents, un ja komponentu koncentrācijas, ieplūstot absorberā, ir Y_{A1} un Y_{B1} , bet izplūstot attiecīgi Y_{A2} un Y_{B2} , bet pretplūsmā ieplūstošā absorbenta koncentrācijas ir X_{A1} un X_{B1} , tad augstāko saistīšanas pakāpi absorberā sasniegs, ja absorbētais aizplūdis ar līdzsvara koncentrācijām X_{A2}^* un X_{B2}^* .

Teorētiskās komponentu A un B saistīšanas pakāpes absorberā izsakāmas šādi: $\varphi_A = (Y_{A1} - Y_{A2}) / (Y_{A1} - Y_{A2}^*)$ un $\varphi_B = (Y_{B1} - Y_{B2}) / (Y_{B1} - Y_{B2}^*)$, kur Y_{A2}^* un Y_{B2}^* — līdzsvara koncentrācijas.

Ja komponentiem A un B līdzsvara līnijas ir taisnes, tad $Y_{A2}^* = A_A X_{A1}$ un $Y_{B2}^* = A_B X_{B1}$, vai, ievērojot iepriekšējos vienādojumus, iegūst $Y_{A1} - Y_{A2} = \varphi_A (Y_{A1} - A_A X_{A1})$ un $Y_{B1} - Y_{B2} = \varphi_B (Y_{B1} - A_B X_{B1})$.

Absorbētā komponentu A un B masa pret absorberā ievadītām masām izsakāma šādi: $\beta_A = (Y_{A1} - Y_{A2}) / Y_{A1} = \varphi_A (1 - A_A X_{A1} / Y_{A1})$ un $\beta_B = (Y_{B1} - Y_{B2}) / Y_{B1} = \varphi_B (1 - A_B X_{B1} / Y_{B1})$.

Absorbcijas selektivitāti β_S raksturo attiecība

$$\beta_S = \beta_A / \beta_B = \varphi_A / \varphi_B \frac{1 - (A_A X_{A1}) / Y_{A1}}{1 - (A_B X_{B1}) / Y_{B1}}.$$

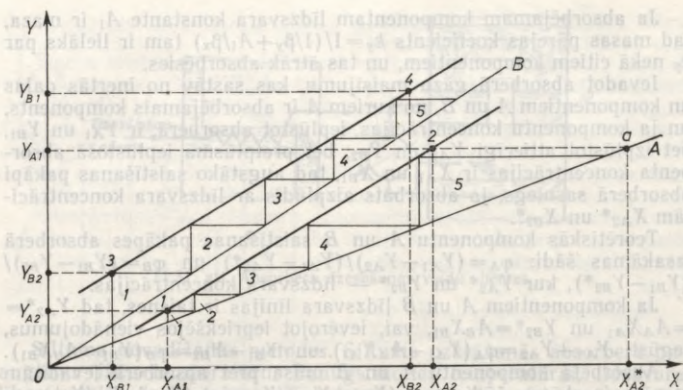
Absorbcijas process ir selektīvs, ja $\beta_S > 1$. Selektivitāte uzlabojas, jo lielāks β_S .

Vairāku komponentu absorbcija no gāzu maisījumiem ir sarežģītāka. Maisījumā esošie komponenti savstarpēji ietekmē difūzijas ātrumu un līdzsvaru. Atšķaidītiem gāzu maisījumiem komponentu savstarpējā ietekme ir niecīga un to var neievērot.

Gāzu maisījumam, kas sastāv no inertās daļas un absorbējamiem komponentiem A un B ar sākuma koncentrācijām Y_{A1} un Y_{B1} , absorbcijas procesa norise uzskatāmi attēlojama Y - X diagrammā. Y - X diagrammā (11.32. att.) komponentiem A un B konstruē līdzsvara līknes (OA un OB). Diagrammā atliek attiecīgās gāzes fāzes koncentrācijas Y_{A1} , Y_{B1} un Y_{A2} . Absorbenta sākuma koncentrācijas X_{A1} un X_{B1} ir zināmas.

Ja koncentrācijas Y_{A2} un X_{A1} ir zināmas, iegūst punktu I , kas ir komponenta A darba taisnes sākumpunkts. Otro punktu iegūst, nosakot maksimālo iespējamo absorbēto koncentrāciju komponentam A . No koncentrācijas Y_{A1} velk horizontālu līniju, līdz tā krusto komponenta A līdzsvara līniju. Iegūst punktu a , pēc kura var noteikt līdzsvara koncentrāciju X_{A2}^* . Faktiskā beigu koncentrācija absorbētā X_{A2} vienmēr mazāka par līdzsvara koncentrāciju, t. i., $X_{A2} < X_{A2}^*$. Izvēlas koncentrāciju X_{A2} un iegūst punktu 2 . Taisne, kas vilkta caur punktiem 1 un 2 , ir darba taisne komponentam A . Starp koncentrācijām Y_{A1} un Y_{A2} konstruē teorētiskos šķīvjus.

Abu fāžu plūsmas absorberā ir nemainīgas, tādēļ komponenta B darba taisnei jābūt paralēlai komponenta A darba taisnei. Uz koor-



11.32. att. Darba taisnes divkomponentu absorbcijai.

dinātas X_{B1} meklē tādu punkta 3 stāvokli, lai taisne, kas vilkta no šā punkta paralēli komponenta A darba taisnei 1-2, dotu tādu pašu teorētisko šķīvju skaitu, kāds noteikts komponentam A. Taisne 3-4 ir komponenta B darba taisne. Pēc punktiem 3 un 4 var noteikt koncentrācijas Y_{B2} un X_{B2} .

11.9. ABSORBCIJA ĶĪMISKU REAKCIJU REZULTĀTĀ (HEMOSORBCIJA)

Absorbcijas procesā ķīmiskās reakcijas notiek 1) šķidrā fāzē vai 2) gāzveida fāzē. Absorbcijai notiekot ķīmiskas reakcijas rezultātā, noteicošie ir reakcijas kinētikas likumi.

Ķīmiskām reakcijām notiekot šķidrā fāzē (CO_2 , SO_2 absorbcija ar sārmim, NH_3 absorbcija ar skābēm u. c.), absorbējamais komponents veido ķīmisku savienojumu, un tā koncentrācija absorbentā samazinās. Koncentrācijas gradients starp fāzēm pieaug. Tas veicina absorbciju. Ķīmijas tehnoloģijā to izmanto bieži, izvēloties atiecīgu absorbentu.

Ja reakcijas ātrums ir liels, tad šķidrās fāzes pretestība absorbcijai ir niecīga un var būt vienāda ar nulli. Ja reakcijas ātrums mazs, tad absorbciju var uzskatīt par fizikālo absorbciju.

Absorbcijas procesa paātrināšanos ķīmiskas reakcijas gadījumā izskaidro ar masas atdeves (vai pārejas) koeficienta β'_x palielināšanos salīdzinājumā ar fizikālo absorbciju, vai arī ar vidējās koncentrācijas pieaugumu ($\Delta\bar{X} + \delta$), ja nemaina masas atdeves koeficientu

12. ŠĶIDRUMU PĀRTVAICE

Rūpniecībā bieži iegūst divu vai vairāku šķidrumu šķidrumus, kuri tālākā tehnoloģijas gaitā jāsadala atsevišķos komponentos vai arī jāpaaugstina kāda komponenta koncentrācija šķīdumā.

Šķidrumu šķīdumu un sašķidrinātu gāzu šķīdumu sadalīšanai plaši lieto pārtvaici, kas iedalāma 1) *destilācijā* un 2) *rektifikācijā*.

Pārtvaices pamatā ir parādība, ka tvaiks virs šķidrumu šķīdumiem ir bagātāks ar zemākā temperatūrā virstošo komponentu nekā šķīdums. Kondensējot šādu tvaiku, iegūst *kondensātu* (*destilātu* vai *rektifikātu*), kurā salīdzinājumā ar sākuma šķīdumu ir augstāka vieglāk gaistošā komponenta koncentrācija. Ja ar vienreizēju iztvaicēšanu un kondensāciju nav iegūta kondensāta vēlāmā koncentrācija, tad, atkārtojot iztvaicēšanu un kondensāciju, iespējams sasniegt vajadzīgo destilāta (rektifikāta) koncentrāciju.

Pārtvaice līdzīga ietvaicei. Atšķirība starp tām tikai tāda, ka pārtvaicē šķidrumu šķīdumus, bet ietvaicē cieta vielu šķīdumus. Pārtvaices rezultātā *iegūst destilātu* (*rektifikātu*) un *kuba atlikumu*, bet ietvaices gaitā rodas sekundārais tvaiks un koncentrētais šķīdums.

12.1. ŠĶIDRO SISTĒMU FĀZU LĪDZSVARS

Tehnikā lietojamās šķidrās sistēmas ir individuālas vielas vai to šķīdumi. Šķīdumus, kas sastāv no diviem komponentiem A un B , sauc par *bināriem šķīdumiem*. Vairāku komponentu $A+B+C+\text{utt.}$ šķīdumus var salīdzināt ar bināriem šķīdumiem (pseudobināri šķīdumi), jo parasti no pārējiem atdala vienu komponentu A . Aprēķinus tad izdara kā binārām sistēmām, pieņemot par otro komponentu pārējo komponentu $B+C+\text{utt.}$ summu.

Pēc šķidrumu molekulāri kinētiskās teorijas šķidrumu šķīdība atkarīga no starpmolekulāro spēku darbības starp viendabīgām un nevienābīgām molekulām. No starpmolekulāriem spēkiem atkarīgs, vai šķīdumi šķīst jebkurās attiecībās, vai arī noteiktā koncentrācijā rodas fāžu robežvirsmas. Šķidrumu savstarpējā šķīdība ir jo labāka, jo vielas ķīmiskā ziņā ir līdzīgākas (piemēram, ja tās pieder pie vienas homologu rindas, kā benzols, toluols u. c.). Šķidrumu savstarpējā šķīdība palielinās, paaugstinoties temperatūrai.

Divu komponentu savstarpējā šķīdība mainās no tāda stāvokļa, ka šie komponenti gandrīz nemaz nešķīst viens otrā, līdz pilnīgi savstarpējai šķīdībai (jāatceras, ka pilnīgi nešķīstošu vielu nav).

Divu vai vairāku šķīdumu šķīdumi atkarībā no to savstarpējās šķīdības iedalāmi trīs grupās.

1. Šķīdumi, kas šķīst viens otrā jebkurās attiecībās. Šie šķīdumi savukārt iedalās

a) šķīdumos, kuros starpmolekulārie spēki starp neviendabīgām molekulām (a_{12}) ir tādi paši kā starp viendabīgām molekulām (a_{11} , a_{22}), t. i.,

$$a_{12} = a_{11} \text{ un } a_{12} = a_{22}.$$

Pie šīs grupas pieder *ideālie šķīdumi*, kuri pakļaujas Raula likumam;

b) šķīdumos, kuros starpmolekulārie spēki starp neviendabīgām molekulām ir lielāki nekā spēki starp viendabīgām molekulām, t. i.,

$$a_{12} > a_{11} \text{ un } a_{12} > a_{22}.$$

Šeit paredzama *azeotropā šķīduma veidošanās, kuram ir maksimālā viršanas temperatūra*;

c) šķīdumos, kuros starpmolekulārie spēki starp neviendabīgām molekulām ir mazāki nekā spēki starp viendabīgām molekulām, t. i.,

$$a_{12} < a_{11} \text{ un } a_{12} < a_{22}.$$

Šeit paredzama *azeotropā šķīduma veidošanās, kuram ir minimālā viršanas temperatūra*.

2. Šķīdumi, kas nešķīst viens otrā.

3. Šķīdumi, kas daļēji šķīst viens otrā.

Šķīdumi, kas šķīst viens otrā jebkurās attiecībās. Ideālie šķīdumi. Raula likums. Franču ķīmiķis F. Rauls atklāja (1887) šādu likumu:

$$p_A = x_A P_A, \quad (12.1)$$

t. i., *komponenta A tvaika parciālais spiediens p_A virs šķīdumu šķīduma proporcionāls komponenta koncentrācijai šķīdumā x_A un tīra komponenta A tvaika spiedienam P_A dotajā temperatūrā (x_A izteikts moldaļās).*

Raula likumam pakļaujas ideālie šķīdumi.

Binārie šķīdumi. Ja sistēma sastāv no diviem komponentiem A un B, tad, pamatojoties uz Raula likumu, pirmajam komponentam tvaika parciālo spiedienu izsaka ar vienādojumu (12.1), bet komponentam B lieto šādu vienādojumu:

$$p_B = x_B P_B = (1 - x_A) P_B. \quad (12.2)$$

Pēc Daltona likuma sistēmas kopējais tvaika spiediens

$$p = p_A + p_B = x_A P_A + x_B P_B = x_A P_A + (1 - x_A) P_B \text{ jeb} \quad (12.3)$$

$$p = x_A (P_A - P_B) + P_B. \quad (12.4)$$

No vienādojuma (12.4) redzams, ka binārās sistēmas kopējais tvaika spiediens p ideāliem šķīdumiem atkarībā no šķīdrās fāzes sastāva izsakāms ar īstaisni.

Pēc Daltona likuma tvaika parciālos spiedienus var izteikt šādi:

$$p_A = y_A p \quad \text{un} \quad (12.5)$$

$$p_B = y_B p = (1 - y_A) p, \quad (12.6)$$

kur y_A un y_B — komponentu A un B molfrakcijas tvaika fāzē.

No vienādojumiem (12.1), (12.2), (12.5) un (12.6) izriet, ka

$$y_A p = x_A P_A, \quad (12.7)$$

$$y_B p = x_B P_B. \quad (12.8)$$

Dalot šos vienādojumus, iegūst *relatīvo gaistamības koeficientu* jeb *sadales koeficientu* α — attiecību starp sadalāmo komponentu tvaika spiedieniem:

$$\frac{y_A x_B}{y_B x_A} = \frac{y_A (1 - x_A)}{x_A (1 - y_A)} = \frac{P_A}{P_B} = \alpha. \quad (12.9)$$

Relatīvais gaistamības koeficients α ideāliem šķīdumiem ir nemainīgs lielums un nav atkarīgs no šķīduma sastāva.

Binārām sistēmām, kas daļēji pakļaujas Raula likumam, relatīvo gaistamības koeficientu aprēķina šādi: $\alpha = \gamma_A P_A / (\gamma_B P_B)$, kur γ_A , γ_B — *aktivitātes koeficienti*. Aktivitātes koeficients γ raksturo dotā šķīduma atšķirību no ideālā šķīduma un ir atkarīgs no šķīduma sastāva, temperatūras un spiediena sistēmā; to aprēķina pēc empiriskām formulām.

No vienādojumiem (12.4), (12.7) un (12.9) iegūst, ka

$$y_A = \frac{\alpha x_A}{1 + x_A(\alpha - 1)}. \quad (12.10)$$

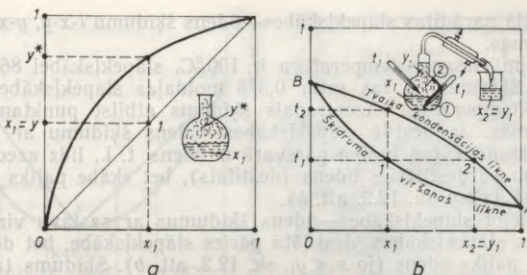
Tvaika sastāva y iegūšanai nosaka vieglāk gaistošā komponenta tvaika parciālo spiedienu p_A viršanas temperatūrā, jo no vienādojuma (12.5)

$$y_A = \frac{p_A}{p}. \quad (12.11)$$

Vienādojuma (12.10) grafiskā sakarība redzama 12.1. attēlā *a*. Ja šķidrā fāzē vieglāk gaistošā komponenta saturs x_1 , tad tvaika fāzē līdzsvara gadījumā vieglāk gaistošā komponenta saturs ir y^* . Punkts *I* uz diagonāles atbilst vienādam tvaika un šķidrās fāzes sastāvam ($x_1 = y$).

Izobārā procesā ($p = \text{const}$) sakarību starp tvaika fāzi un šķidro fāzi parāda 12.1. attēlā *b* dotās liknes, kuras iegūst, atliekot uz abscisu ass sastāvu x , bet uz ordinātu ass — attiecīgo viršanas temperatūru t . Šim nolūkam lieto 12.1. attēla *a* datus. 12.1. attēlā *b* redzama t - x - y diagramma. Augšējā likne attēlo tvaika kondensāciju, bet apakšējā likne — šķīduma viršanu.

Ja vieglāk gaistošā komponenta koncentrācija šķīdumā ir x_1 , tad starp punktiem x_1 un *I* ir tikai šķidrā fāze. Temperatūrā t_1 (punkts *I*) šķīdums virst. Virs šķīduma esošā tvaika temperatūra vienāda ar



12.1. att. Līdzsvara likne.

šķidruma viršanas temperatūru t_1 , tādēļ, kondensējot šādu tvaiku, iegūst kondensātu ar sastāvu x_2 , kas vienāds ar tvaika sastāvu virs virstošā šķidruma, t. i., $x_2 = y_1$ (punkts 2). No tā izriet, ka vieglāk gaistošā komponenta saturs tvaikā lielāks nekā šķidrumā, t. i., tvaiks bagātināts ar vieglāk gaistošo komponentu.

Tas atbilst pirmajam Konovalova likumam. Tvaiks bagātināts ar to komponentu, kura pievadišana šķidrajai fāzei paaugstina tvaika spiedienu virs šķidruma jeb pazemina šķiduma viršanas temperatūru.

Temperatūrās no t_1 līdz t_2 pastāv šķidrā fāze un tvaika fāze, bet temperatūrās, kas augstākas par t_2 , ir tikai tvaika fāze (sastāvam x_1). No tā izriet, ka zem šķidruma viršanas liknes pastāv tikai šķidrā fāze, starp abām līknēm šķidrā fāze un tvaika fāze, bet virs tvaika kondensācijas līknes — tikai tvaika fāze.

No 12.1. attēla *b* redzams, ka šķidruma viršanas temperatūra zemāka par grūtāk gaistošā komponenta viršanas temperatūru (punkts *B*, $x=0$), bet augstāka par vieglāk gaistošā komponenta viršanas temperatūru (punkts *A*, $x=1$).

Reālie šķīdumi. Reālie šķīdumi sastāv no dažādām vielām un vairāk vai mazāk atšķiras no ideāliem šķīdumiem. Reālie šķīdumi nepakļaujas Raula likumam.

Šķīdumi ar maksimālo viršanas temperatūru. Ja šķīdumi šķīst viens otrā jebkurās attiecībās un veido šķīdumus, kuru noteiktam sastāvam ir nemainīga viršanas temperatūra, t. i., šķīdumus, kuriem $a_{12} > a_{11}$ un $a_{12} > a_{22}$, tad šādus šķīdumus sauc par šķīdumiem ar maksimālo viršanas temperatūru.

Šķīdumu, kas virst noteiktā temperatūrā, sauc par azeotropo šķīdumu. Azeotropiem šķīdumiem ir vienāds tvaika un šķidrās fāzes sastāvs. Šādi šķīdumi virst noteiktā temperatūrā, sastāvam nemainoties.

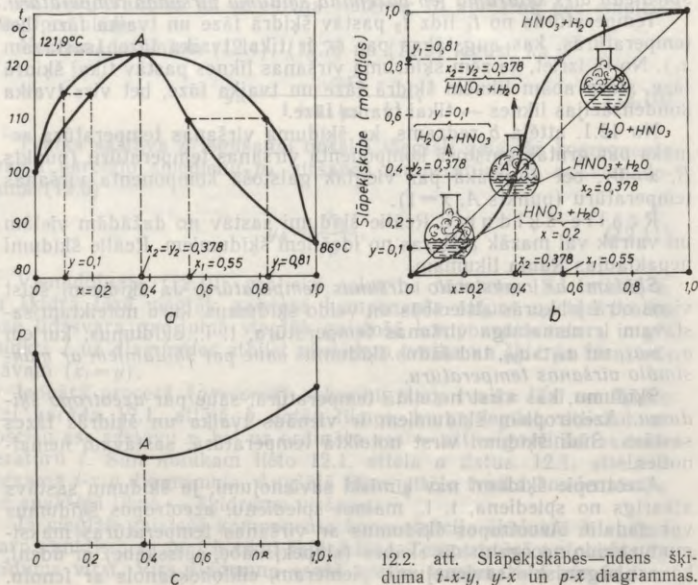
Azeotropie šķīdumi nav ķīmiski savienojumi, jo šķīdumu sastāvs atkarīgs no spiediena, t. i., mainot spiedienu, azeotropos šķīdumus var sadalīt. Azeotropos šķīdumus ar viršanas temperatūras maksimumu veido neorganiskās skābes (slāpekļskābe, sālsskābe) ar ūdeni, kā arī organiskie savienojumi, piemēram, cikloheksanols ar fenolu.

12.2. attēlā parādītas slāpekļskābes—ūdens šķīdumu t - x - y , y - x un p - x diagrammas.

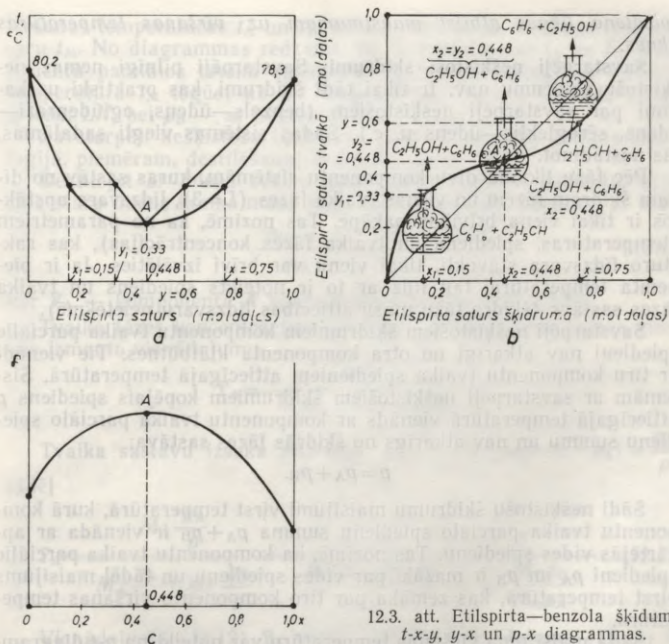
Ūdenim viršanas temperatūra ir 100°C , slāpekļskābei 86°C , bet šo vielu šķīdums, ja tas satur 0,378 moldaļas slāpekļskābes, virst $121,9^{\circ}\text{C}$ temperatūrā. Azeotropais šķīdums atbilst punktam A uz diagrammas. Ja destilē slāpekļskābes—ūdens šķīdumu ar sastāvu līdz punktam A , tad tvaikā pārsvarā ir ūdens, t. i., līdz azeotropam šķīdumam pārdestilēsies ūdens (destilāts), bet skābe paliks destilācijas kubā ($x > y$, sk. 12.2. att. b).

Destilējot slāpekļskābes—ūdens šķīdumus ar sastāvu virs 0,378 moldaļām slāpekļskābes, destilātā pāries slāpekļskābe, bet destilācijas kubā paliks ūdens (jo $x_1 < y_1$, sk. 12.2. att. b). Šķīdums (azeotropais), kas atbilst punktam A uz diagrammas, satur $x_2 = 0,378$ moldaļas slāpekļskābes. Punkts A ir līdzsvara līknes un diagrammas diagonāles krustpunkts, tādēļ tvaika sastāvs vienāds ar šķidrās fāzes sastāvu, t. i., $x_2 = y_2 = 0,378$. Destilātam ir tāds pats sastāvs, kāds ir šķīdumam kubā.

Šķīdumi ar minimālo viršanas temperatūru. Ja šķīdumi šķīst viens otrā jebkurās attiecībās un veido šķīdumus, kuru noteiktam sastāvam ir nemainīga viršanas temperatūra, t. i., šķīdumus, kuriem $a_{12} < a_{11}$ un $a_{12} < a_{22}$, tad tos sauc par šķīdumiem ar minimālo virša-



12.2. att. Slāpekļskābes—ūdens šķīduma t - x - y , y - x un p - x diagrammas.



12.3. att. Etilspirta—benzola šķīduma t - x - y , y - x un p - x diagrammas.

nas temperatūru. Pie šādiem šķīdumiem pieder etilspirts—ūdens, etilspirts—benzols, sērogleklis—acetons, etiķskābe— n -oktāns u. c.

Etilspirtam viršanas temperatūra ir $78,3^\circ\text{C}$, bet ūdenim 100°C . Ja šķīdumā ir $0,106$ moldaļas ūdens, tad tas virst $78,15^\circ\text{C}$ temperatūrā. Benzols virst $80,2^\circ\text{C}$ temperatūrā. Ja šķīdumā ir $0,448$ moldaļas etilspirta, tad šāds šķīdums virst $60,24^\circ\text{C}$ temperatūrā.

12.3. attēlā redzamas etilspirta—benzola šķīdumu t - x - y , y - x un p - x diagrammas. Punkts A uz šīm diagrammām norāda azeotropā šķīduma sastāvu un pārtvaices temperatūru. Destilējot etilspirta—benzola šķīdumu, kurā etilspirta saturs ir līdz $0,448$ moldaļām, destilātā pārsvarā iegūst vieglāk gaistošo komponentu C_2H_5OH , bet atlikumā — grūtāk gaistošo komponentu C_6H_6 . Šķīdumos, kur etilspirta saturs lielāks nekā $0,448$ moldaļas, destilātā pārsvarā iegūst grūtāk gaistošo komponentu C_6H_6 , bet atlikumā — vieglāk gaistošo komponentu C_2H_5OH .

Šķīdumi, kuriem ir minimālā vai maksimālā viršanas temperatūra, pakļauti otrajam Konovalova likumam. Maksimums uz tvaika spiediena līknes (p - x diagrammā) atbilst minimumam uz viršanas temperatūras līknes (t - x - y diagrammā), bet minimums uz tvaika

spiediena līknes atbilst maksimumam uz viršanas temperatūras līknes.

Savstarpēji nešķīstoši šķidrumi. Savstarpēji pilnīgi nemaz nešķīstošu šķidrumu nav. Ir tikai tādi šķidrumi, kas praktiski uzskatāmi par savstarpēji nešķīstošiem (benzols—ūdens, ogļūdeņraži—ūdens, sērogleklis—ūdens u. c.). Šādas sistēmas viegli sadalāmas, tās nostādinaot.

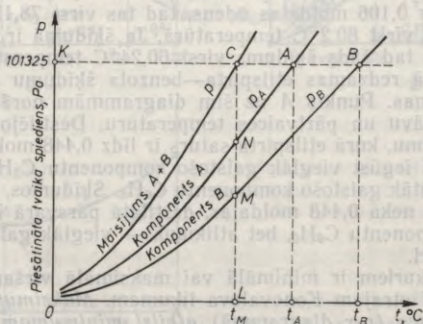
Pēc fāžu likuma divu komponentu sistēmām, kuras sastāv no divām šķidrām fāzēm un vienas tvaika fāzes ($L=3$), līdzsvara apstākļos ir tikai viena brīvības pakāpe. Tas nozīmē, ka no parametriem (temperatūras, spiediena un tvaika fāzes koncentrācijas), kas raksturo līdzsvara stāvokli, tikai vienu var brīvi izvēlēties. Ja ir pieņemta temperatūra, tad līdz ar to ir noteikts spiediens un tvaika fāzes sastāvs (šķidro fāžu masu attiecības līdzsvaru neietekmē).

Savstarpēji nešķīstošiem šķidrumiem komponentu tvaika daļējie spiedieni nav atkarīgi no otra komponenta klātbūtnes. Tie vienādi ar tīru komponentu tvaika spiedieniem attiecīgajā temperatūrā. Sistēmām ar savstarpēji nešķīstošiem šķidrumiem kopējais spiediens p attiecīgajā temperatūrā vienāds ar komponentu tvaika daļējo spiedienu summu un nav atkarīgs no šķidrās fāzes sastāva:

$$p = p_A + p_B.$$

Šādi nešķīstošu šķidrumu maisījumi virst temperatūrā, kurā komponentu tvaika daļējo spiedienu summa $p_A + p_B$ ir vienāda ar apkārtējās vides spiedienu. Tas nozīmē, ka komponentu tvaika daļējie spiedieni p_A un p_B ir mazāki par vides spiedienu un tādēļ maisījums virst temperatūrā, kas zemāka par tīro komponentu viršanas temperatūru.

Šāda maisījuma viršanas temperatūru var noteikt no p - t diagrammas (12.4. att.). Nosakot viršanas temperatūru spiedienam 101 325 Pa (760 mm Hg), no punkta K velk horizontālu līniju un iegūst punktus C , A un B , pēc kuriem uz abscisu ass var nolasīt tīro komponentu



12.4. att. Savstarpēji nešķīstošu šķidrumu piesātināta tvaika spiediena līknes.

viršanas temperatūras t_A un t_B , kā arī maisījuma viršanas temperatūru t_M . No diagrammas redzams, ka t_M zemāka par t_A un t_B . Komponentu parciālos tvaika spiedienus p_A un p_B maisījuma viršanas temperatūrā t_M iegūst no p - t diagrammas, kur p_A vienāds ar nogriezni LN , bet p_B — ar nogriezni LM .

Savstarpēji nešķīstošu šķidrumu īpašības izmanto ķīmijas tehnoloģijā, piemēram, destilēšanai ar ūdens tvaiku.

Destilējot ar ūdens tvaiku ūdenī nešķīstošu komponentu, attiecība starp ūdens tvaika masu m_{H_2O} un komponenta masu m_A ir šāda:

$$\frac{m_{H_2O}}{m_A} = \frac{1 - \bar{Y}_A}{\bar{Y}_A}, \quad (12.12)$$

kur \bar{Y}_A — komponenta A koncentrācija tvaika fāzē, kg/kg.

Tvaika fāzes koncentrācijas moldaļu pārrēķināšanai masas vienībās izmanto vienādojumu

$$\bar{Y}_A = \frac{M_A y_A}{M_A y_A + (1 - y_A) M_B}$$

Tvaika sastāvu izsaka attiecības $y_A = \frac{p_A}{p}$ un $y_B = (1 - y_A) = \frac{p_B}{p}$, tādēļ

$$\bar{Y}_A = \frac{M_A \frac{p_A}{p}}{M_A \frac{p_A}{p} + M_B \frac{p_B}{p}} = \frac{M_A p_A}{M_A p_A + M_B p_B} = \frac{1}{1 + \frac{M_B p_B}{M_A p_A}}. \quad (12.13)$$

Vienādojumā (12.12) \bar{Y}_A vietā ievietojot vienādojuma (12.13) izteiksmi, iegūst

$$\frac{m_{H_2O}}{m_A} = \frac{M_B p_B}{M_A p_A}, \quad (12.14)$$

kur M_A, M_B — komponentu A un B molmasas.

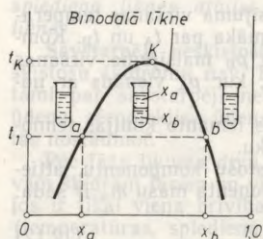
Reālos apstākļos jāievēro, ka ūdens tvaiks, kas izplūst no sistēmas, nepiesātinās ar komponentu A , tādēļ vienādojums (12.14) pārveidojams šādi:

$$m_{H_2O} = m_A \frac{M_B p_B}{M_A p_A \varphi}, \quad (12.15)$$

kur φ — piesātinātības koeficients, tehniskos aprēķinos pieņem, ka $\varphi = 0,2 \dots 0,8$.

Šķidrums, kas daļēji šķīst viens otrā. Sistēma, ko veido šķidrums, kas daļēji šķīst viens otrā, atkarībā no sastāva un temperatūras var būt viendabīga vai neviendabīga.

Daļēji šķīstošu šķidrums līdzsvara likne parādīta 12.5. attēlā. Temperatūrā t_1 , ja šķīdumā $A+B$ komponenta A koncentrācija ir no 0 līdz x_a , pastāv viendabīgs šķīdums. Viendabīgs šķīdums ir arī tad,



12.5. att. Daļēji šķīstošu šķīdumu binodālā līkne.

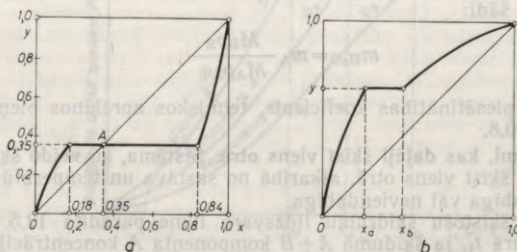
ja komponenta A koncentrācija ir no x_b līdz 1 . Koncentrāciju robežās no x_a līdz x_b sistēma ir neviendabīga un sastāv no diviem slāņiem ar koncentrāciju x_a vienā slānī un koncentrāciju x_b otrā slānī. Viens slānis ir komponenta A šķīdums komponentā B , bet otrs slānis — komponenta B šķīdums komponentā A .

Mainot sākuma maisījuma sastāvu no x_a līdz x_b , mainās tikai fāžu masas, bet slāņu sastāvi nemainās. Mainot sistēmas temperatūru, mainās arī slāņu sastāvi (*binodālā līkne*). Virs kritiskās temperatūras t_K (punkts K) rodas viendabīgs šķīdums ar jebkuru komponenta A koncentrāciju.

Koncentrāciju robežās no x_a līdz x_b ir divas šķidrās fāzes un tvaika fāze, kura atrodas līdzsvarā ar tām un kuras sastāvs nemainās. Maisījumu sastāviem no 0 līdz x_a un no x_b līdz 1 , nemainot temperatūru, sistēmā ir viena šķidrā fāze un viena tvaika fāze. Tvaika fāzes sastāvs, kas atrodas līdzsvarā ar šķidro fāzi, mainīsies līdz ar šķidrās fāzes koncentrācijas maiņu.

Tvaiks, kas ir līdzsvarā ar divām šķidrajām fāzēm, dažiem šķīdumiem ir ar koncentrāciju starp x_a un x_b , citiem — ar koncentrāciju, kas mazāka par x_a vai lielāka par x_b . Ja tvaika koncentrācija atrodas robežās starp x_a un x_b , tad šķīdumus raksturo *pirmā veida šķīšanas līknes*. Ja tvaika koncentrācija mazāka par x_a vai lielāka par x_b , tad šķīdumus raksturo *otrā veida šķīšanas līknes*.

Pirmā veida šķīšanas līknes veido furfurols un ūdens. No furfurola un ūdens līdzsvara diagrammas (12.6. att. a) redzams, ka, furfurola koncentrācijai šķidrājā fāzē mainoties no 0 līdz $0,18$, tvaika fāze ir bagātāka ar furfurolu nekā šķidrā fāze, t. i., šajās koncentrācijās furfurols izturas kā vieglāk gaistošs komponents, bet ūdens — kā grūtāk gaistošs komponents. Furfurola koncentrācijai šķidrājā fāzē mainoties no $0,35$ līdz $1,00$, līdzsvarā esošais tvaiks satur ma-



12.6. att. Daļēji šķīstošu šķīdumu līdzsvara līkne.

zāk furfurola nekā šķidrā fāzē, t. i., furfurols izturas kā grūtāk gaistošs komponents, bet ūdens — kā vieglāk gaistošs komponents. Punkts A uz diagrammas atbilst *azeotropam šķidumam*.

Otrā veida šķīšanas likne redzama 12.6. attēlā b . Mainot sākuma maisījuma sastāvu no x_a līdz x_b , veidojas no divām fāzēm sastāvošas sistēmas: viena fāze ar sastāvu x_a , otra — ar sastāvu x_b . Līdzsvarā esošā tvaika sastāvs šādām sistēmām ir nemainīgs un vienāds ar y , pie tam $y > x_b$. Koncentrāciju robežās no x_b līdz 1 līdzsvarā esoša tvaika sastāvs mainās no y līdz 1 . Šādām sistēmām tvaika koncentrācija augstāka par šķidrās fāzes koncentrāciju.

12.2. SILTUMA [ENTALPIJAS] DIAGRAMMA

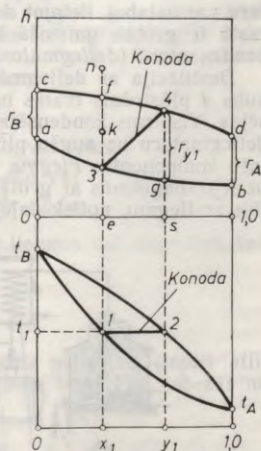
Pārtvaices iekārtu aprēķinos bez līdzsvara liknēm $y-x$ un temperatūras liknēm $t-x-y$ lieto arī siltuma diagrammas ($t-h-x$). Siltuma diagrammā šķidrās fāzes un tvaika fāzes sastāvs saistīts ar šo fāžu entalpiju (siltumsaturu).

Siltuma diagramma sastāv no $t-x-y$ diagrammas un virs tās novietotas $h-x-y$ diagrammas (12.7. att.). Augšējās diagrammas līknes $a3b$ un $c4d$ rāda virstoša šķidruma un piesātināta tvaika entalpiju atkarībā no koncentrācijas x un y . Pēc siltuma diagrammas šķidrā fāze ar sastāvu x_1 virst temperatūrā t_1 . Siltuma daudzums, kas nepieciešams šāda šķidruma uzsildīšanai no 0 līdz t_1 , izsakāms ar nogriezni $e3$.

Tvaiks, kas rodas no virstošā šķidruma ar sastāvu x_1 , ir ar tādu pašu temperatūru t_1 , tādēļ tā sastāvu nosaka punkts 2 . Attiecīgā tvaika entalpija vienāda ar nogriezni $s4$. Kondensējot tvaiku ar sastāvu y_1 , atbrīvosies kondensācijas siltums r_{y1} , kas vienāds ar nogriezni $g4$. Nogrieznis gs vienāds ar kondensāta entalpiju viršanas temperatūrā. Punkts n atbilst pārkarsētam tvaikam. Punkts k atrodas šķidruma un tvaika joslā.

Uz temperatūras liknēm līdzsvara koncentrāciju starp tvaiku un šķidrumu izsaka horizontāle $1-2$ (to sauc par *konodu*), bet uz entalpijas liknēm — slīpa līnija $3-4$ (to arī sauc par *konodu*).

Vertikāle $f3$ starp fāžu entalpiju liknēm atbilst vienāda sastāva šķidrās fāzes un tvaika fāzes iztvaikošanas jeb kondensācijas siltumam.



12.7. att. Siltuma diagramma ($t-h-x$ diagramma).

12.3. DESTILĀCIJA

Destilāciju lieto komponentiem ar stipri atšķirīgu viršanas temperatūru, lai nodalītu gaistošo daļu no negaistošās, kā arī ja destilātam neuzstāda augstas prasības. Naftas un citu dabas produktu pārstrādes rūpnīcās destilāciju lieto saliktu sistēmu iepriekšējai sadalīšanai.

Vienkāršā destilācija. Vienkāršās destilācijas iekārtas shēma redzama 12.8. attēlā. Destilācijas kubā 1 iepilda sākuma šķīdumu un kubu (katlu) apsilda. Tvaiks, kas pārsvarā satur vieglāk gaistošo komponentu, pārvietojas uz kondensatoru—dzesinātāju 3, kur tas kondensējas, un kondensāts atdziest līdz vajadzīgajai temperatūrai. Iegūto destilātu ievada tvertnē 4. Sajā laikā ventilis 5 atvērts. Kuba atlikumu pēc destilācijas aizvada pa cauruli 2.

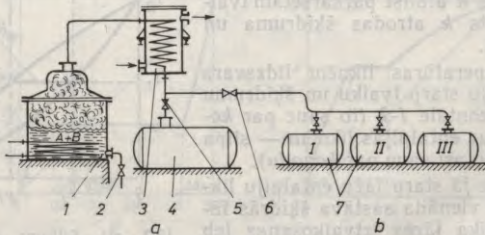
Pie vienkāršās destilācijas pieder arī *frakcionētā destilācija* un *destilācija ar deflegmāciju*. Izmantojot šos vienkāršās destilācijas veidus, var ievērojami uzlabot vienkāršās destilācijas rezultātā iegūta destilāta sastāvu.

Frakcionētā destilācija atšķiras no 12.8. attēlā *a* redzamās shēmas ar to, ka destilātu nesavāc vienā tvertnē, bet zināmā laika vai temperatūras intervālā to savāc vairākās tvertnēs (12.8. att. *b*). Ventilis 5 aizvērts, bet ventilis 6 atvērts.

Destilācijas sākumā tvaikā pārsvarā ir vieglāk gaistošais komponents, tādēļ tvertnē I iegūst destilātu, kas atšķiras no pārējā destilācijas laikā uztvertā destilāta (tvertnēs II un III).

Destilāta sastāvu attiecībā uz vieglāk gaistošā komponenta saturu var uzlabot, lietojot *destilāciju ar deflegmāciju*. Šīs metodes pamatā ir grūtāk gaistošā komponenta daļēja kondensācija *virsmas kondensatorā* (*deflegmatorā*).

Destilācija ar deflegmāciju shematiski parādīta 12.9. attēlā. No kuba 4 plūstošais tvaiks nokļūst deflegmatorā 1, kur daļēji kondensējas. Vispirms kondensējas grūtāk gaistošais komponents, tādēļ pa deflegmatoru uz augšu plūstošais tvaiks bagātinās ar vieglāk gaistošo komponentu. *Flegma* (kondensāts), kas plūst pa deflegmatoru uz leju, bagātinās ar grūtāk gaistošo komponentu. Tvaikam saskaroties ar flegmu, notiek daļēja tvaika kondensācija. Vispirms konden-



12.8. att. Vienkāršās destilācijas un frakcionētās destilācijas iekārtu shēmas.

sējas grūtāk gaistošais komponents. Kondensācijas rezultātā izdalās silums. Flegma sasilst, un no tās vairāk iztvaiko vieglāk gaistošais komponents. Tādēļ tvaikā pieaug vieglāk gaistošā komponenta koncentrācija. Tā tvaika daļa, kas izplūst cauri deflegmatoram, nokļūst kondensatorā—dzēsīnātājā 2. Iegūtais destilāts uzkrājas tvertnē 3.

Vienkāršo destilāciju kvantitatīvi raksturo *vienkāršās destilācijas pamatvienādojums*. Pamatvienādojumu iegūst no procesa materiālās bilances. Pieņem, ka atdestilētā šķidrums daļa tvaika veidā aizplūst no kuba un nesaskaras ar atlikušo šķidrums.

Destilācijas sākumā kubā esošā binārā šķidrums daudzums apzīmē ar n (moli) un vieglāk gaistošā komponenta koncentrāciju ar x (moldaļas). Vieglāk gaistošā komponenta koncentrāciju tvaika fāzē apzīmē ar y (moldaļas). Pēc bezgalīgi maza šķidrums daudzuma dn atdestilēšanas šķidrās fāzes koncentrācija izmainās par bezgalīgi mazu lielumu dx un kuba atlikums koncentrācija tad ir $x-dx$, bet kuba atlikums ir $n-dn$. Iegūtais destilāta daudzums dn ir ar vieglāk gaistošā komponenta koncentrāciju y .

Aplūkojamā gadījumā kubā ievadītais vieglāk gaistošās vielas daudzums procesa sākumā ir nx , bet no kuba aizvadītais vieglāk gaistošās vielas daudzums sastādās no vielas daudzuma, kas aizvadīts ar tvaiku (destilāts) ydn , un ar kuba atlikums

$$(n-dn)(x-dx).$$

Ievērojot matērijas nezūdamības likums, var rakstīt

$$nx = (n-dn)(x-dx) + ydn \text{ vai}$$

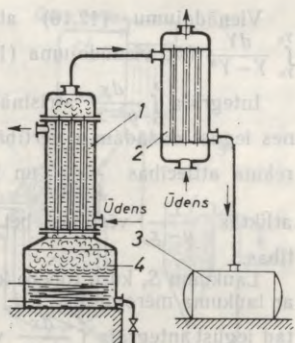
$$nx = nx - xdn - ndx + dndx + ydn.$$

Reizinājums $dn dx$ kā bezgalīgi mazu lielums var neievērot, tad iegūst

$$\frac{dn}{n} = \frac{dx}{y-x}.$$

Ja vienkāršās destilācijas rezultātā kubā paliek n_1 (moli) atlikums ar sastāvu x_1 , tad, pēdējo vienādojums integrējot robežās no n_1 un x_1 līdz n un x , iegūst

$$\int_{n_1}^n \frac{dn}{n} = \int_{x_1}^x \frac{dx}{y-x} \text{ vai } \ln \frac{n}{n_1} = \int_{x_1}^x \frac{dx}{y-x}. \quad (12.16)$$



12.9. att. Destilācija ar deflegmāciju.

Vienādojumu (12.16) atrisina grafiski līdzīgi kā integrāli $\int_{Y_b}^{Y_a} \frac{dY}{Y-Y^*}$ (sk. vienādojuma (10.50) atrisinājumu).

Integrāļa $\int_{x_1}^x \frac{dx}{y-x}$ atrisināšanai no binārā šķīduma līdzsvara līknes iegūst dažādām x vērtībām atbilstošās y vērtības. Pēc tam aprēķina attiecības $\frac{1}{y-x}$ un konstruē grafiku, kur uz ordinātu ass atliktas $\frac{1}{y-x}$ vērtības, bet uz abscisu ass — atbilstošās x vērtības.

Laukumu S , kuru robežo koncentrāciju x un x_1 vērtības, pareizina ar laukuma mērogu M_{xy} , t. i., ar laukuma vienības skaitlisko vērtību, tad iegūst integrāļa $\int_{x_1}^x \frac{dx}{y-x}$ vērtību, t. i.,

$$\int_{x_1}^x \frac{dx}{y-x} = SM_{xy} = \ln \frac{n}{n_1}. \quad (12.17)$$

Parasti sākuma šķīduma daudzums ir zināms, tādēļ no vienādojuma (12.17) var aprēķināt kuba atlikuma daudzumu n_1 . Iegūtais destilāta daudzums ir $n_2 = n - n_1$. Destilāta sastāvu x_2 (moldaļās) aprēķina no materiālās bilances vienādojuma:

$$nx = n_1x_1 + n_2x_2 \quad \text{un} \quad x_2 = \frac{nx - n_1x_1}{n_2}.$$

Destilācija ar ūdens tvaiku. Destilējot ar ūdens tvaiku, atdala terpentīnu, anilīnu, benzolu, toluolu, ēteri, sēroglekli, ēteriskās eļļas, taukskābes, glicerīnu, nitrobenzolu, darvas frakcijas u. c.

Destilāciju ar ūdens tvaiku lieto, lai no maisījuma vai šķīduma atdalītu komponentu (vai vairākus komponentus) ar augstu viršanas temperatūru vai termiski nezturīgus komponentus. Atdalāmais komponents nedrīkst šķīst ūdenī, lai to pēc destilācijas varētu viegli atdalīt nostādinot vai centrifugējot no ūdens tvaika kondensāta. Destilāciju ar ūdens tvaiku izdara atmosfēras spiedienā vai vakuumā. Destilācijai lieto piesātinātu vai arī pārkarsētu tvaiku.

Destilācijai ar ūdens tvaiku lieto periodiskas un nepārtrauktas darbības iekārtas.

Periodiskas darbības iekārta redzama 12.10. attēlā. Destilācijas kubā 3 ievada šķīdumu vai maisījumu $A+B$. Maisījumu uzsilda līdz viršanas temperatūrai, izmantojot tvaika apvalku 1. Sādi sildot, komponenti ar siltuma zudumu apkārtējā vidē. Pārtvaicē nepieciešamo tvaiku tieši ievada maisījumā caur barbotieri 2. Maisījumā (šķīdumā) ievadītais ūdens tvaiks kopā ar gaistošā komponenta A tvaiku aizplūst uz kondensatoru—dzēsina 4, kur tas kondensējas. Iegūtais kondensāts atdziest un tālāk nokļūst atdalītājā 5.

Komponents A ūdenī nešķīst, tādēļ atdalītājā izveidojas divi slāņi. Mazāk blīvā viela (komponents A) sakrājas atdalītāja augšējā daļā,

bet destilāta blīvākā daļa (ūdens) sakrājas atdalītāja apakšā. Katru iegūto komponentu aizvada atsevišķi.

Nepārtrauktas darbības iekārta destilācijai ar ūdens tvaiku ir kolonna ar pildījumu. Pildījumu aprasina sākuma maisījums $A+B$. Ūdens tvaiku kolonnā ievada no apakšas. No apakšas aizvada arī negaistošo daļu — komponentu B . Gaistošo sākuma maisījuma daļu kopā ar ūdens tvaiku no kolonnas augšas aizvada uz kondensatoru — dzesinātāju.

Nešķīstošu šķidrumu maisījumiem komponentu tvaika parciālie spiedieni nav atkarīgi no maisījuma sastāva, bet tikai no temperatūras, un teorētiski tie vienādi ar tīro komponentu tvaika spiedieniem dotajā temperatūrā. Šo tvaiku īpašību izmanto destilācijai ar ūdens tvaiku.

Ja šķīdram, kas nešķīst ūdenī, pievieno ūdeni, tad šāda maisījuma viršanas temperatūra ir zemāka par ūdens viršanas temperatūru attiecīgajā destilācijas spiedienā. Tvaika kopējais spiediens p virs destilējamā maisījuma (šķīduma) dotajā temperatūrā vienāds ar tīro komponentu parciālo spiedienu p_A un p_{H_2O} summu, t. i.,

$$p = p_A + p_{H_2O}.$$

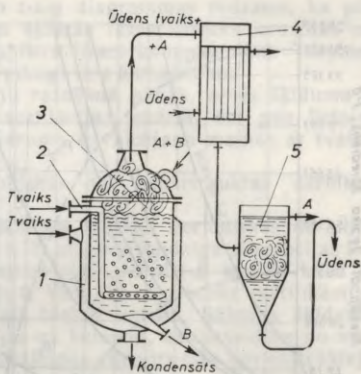
Ja $p = 101\,325$ Pa, tad

$$p_A + p_{H_2O} = 101\,325 \quad \text{un} \quad p_{H_2O} = 101\,325 - p_A < 101\,325.$$

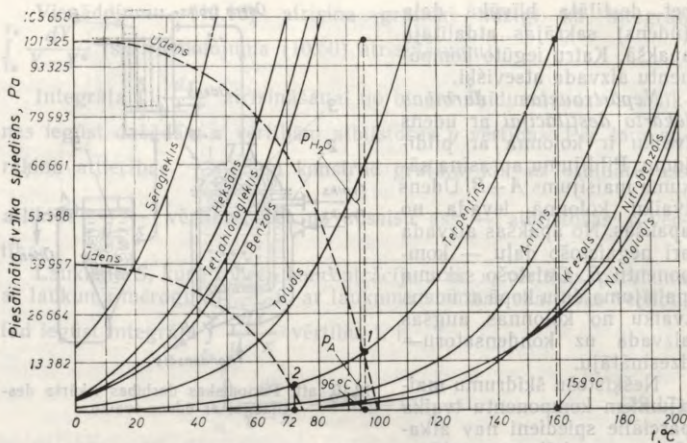
No vienādojuma redzams, ka destilācijā ar ūdens tvaiku tā spiediens p_{H_2O} virs pārtvaicējamā maisījuma mazāks par atmosfēras spiedienu. Tas nozīmē, ka destilācijā ar ūdens tvaiku pārtvaice notiks temperatūrā, kas zemāka par 100°C .

Destilācijā ar ūdens tvaiku maisījuma pārtvaices temperatūru ērti noteikt pēc $p-t$ diagrammas (12.11. att.). Maisījuma pārtvaices temperatūra atbilst tam stāvoklim uz diagrammas, kur ūdens tvaika un gaistošā komponenta tvaika spiedienu summa vienāda ar pārtvaices spiedienu. Uz $p-t$ diagrammas tas atbilst stāvoklim, kur ūdens tvaika spiediena līkne krustojas ar gaistošā komponenta (terpentīna) tvaika spiediena līkni (punkts 1).

Ūdens tvaika spiediena līknes 0 punkts $p-t$ diagrammā atrodas tur, kur pārējiem komponentiem ir $101\,325$ Pa. Ūdens tvaika spiediens $101\,325$ Pa sakrīt ar pārējo komponentu 0 punktu.



12.10. att. Periodiskas darbības iekārta destilācijai ar ūdens tvaiku.



12.11. att. $p-t$ diagramma destilācijai ar ūdens tvaiku.

Terpentīna viršanas temperatūra ir 159°C . Pēc $p-t$ diagrammas (punkts 1) redzams, ka ar ūdens tvaiku $101\,325\text{ Pa}$ spiedienā terpentīns pārtvaicēsies 96°C temperatūrā, bet $39\,997\text{ Pa}$ (300 mm Hg) spiedienā — 72°C temperatūrā (punkts 2).

Destilācijai ar ūdens tvaiku nepieciešamo tvaika masu, kuru ievada tieši kubā, aprēķina pēc vienādojuma (12.15).

Destilācija vakuumā. Šo metodi plaši lieto organisko savienojumu sadalīšanai. Daudzi organiskie savienojumi ir termiski neizturīgi. Destilējot vakuumā, pārtvaices temperatūra ievērojami pazeminās, un tādējādi novērš vielu termisko destrukciju. Destilāciju vakuumā lieto arī tad, ja jāsadala maisījumi, kuri satur grūti gaistošus komponentus.

Destilācija vakuumā notiek līdzīgi vienkāršajai destilācijai atmosfēras spiedienā, tikai tā notiek zemākā temperatūrā.

12.4. REKTIFIKĀCIJA

Destilācijā neiegūst augstas tīrības destilātu. Iztvaicēšanu vairākkārt atkārtojot un iegūto tvaiku kondensējot, iegūst tīrāku produktu. Aplūkojot atkārtotu vienkāršo destilāciju $t-x-y$ diagrammā (12.12. att.), iepriekš minētais ļoti redzams.

Sākuma šķīdums ar sastāvu x_1 virst temperatūrā t_1 (punkts 1) un veido tvaiku ar sastāvu y_1 . Tvaika temperatūra ir t_1 (punkts 2). Tvaiku kondensējot, iegūst kondensātu ar sastāvu $x_2 = y_1$ un viršanas temperatūru t_2 (punkts 3). Šis kondensāts savukārt veido tvaiku ar

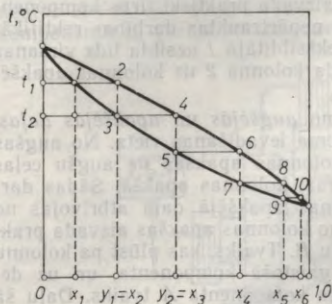
sastāvu y_2 (punkts 4) utt. No $t-x-y$ diagrammas redzams, ka pēc piecām atkārtotām destilācijām šķidrās fāzes sastāvs izmainās no x_1 līdz x_6 . Pēdējais sastāvs x_6 tuvs tīram komponentam. Turpinot destilāciju, teorētiski var iegūt pilnīgi tīru komponentu.

Sādu koncentrācijas izmaiņu ražošanā panāk, nevis šķīdumu n reižu pārtvaicējot vienkāršās destilācijas iekārtā, bet gan lietojot *rektifikācijas kolonnu*, kurā šķidruma iztvaicēšana mainās ar tvaika kondensāciju n reižu.

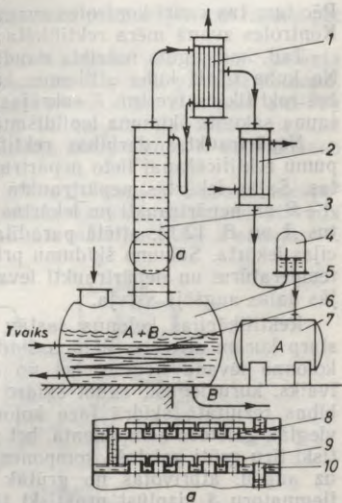
Rektifikāciju realizē periodiskas un nepārtrauktas darbības iekārtās.

Periodiskas darbības rektifikācijas iekārta. Periodiskas darbības rektifikācijas iekārta redzama 12.13. attēlā. Tā līdzīga absorbcijas kolonnai ar zvanu šķīvjiem. Sākuma šķīdumu $A+B$ iepilda kubā 5, kurā ievietots siltumapmaiņtājs 6. Virs kuba novietota rektifikācijas kolonna 3. Tā var atrasties arī blakus kubam. Sākuma šķīdumu kubā silda, un tvaiks pārvietojas uz kolonnu, kas izveidota no vertikāla cilindra, kurā noteiktos attālumos cits virs cita novietoti šķīvji. 12.13. attēlā a parādīts divu šķīvju griezumus.

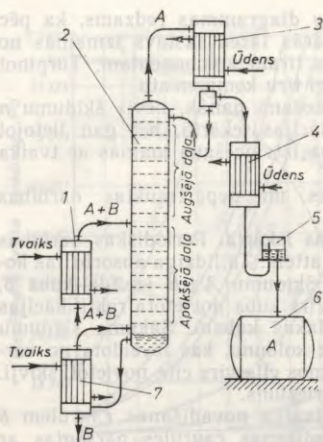
Tvaiks, kas plūst no kuba, pa tvaika novadīšanas caurulēm 8 pārvietojas uz augšu. Tvaika novadīšanas caurules pārsegta ar zvanu 9, bet tā robotās malas iegremdētas šķidrā fāzē, kuras līmenis atkarīgs no pārteces caurules 10 izvirzījuma augstuma virs šķīvja. Šāda šķīvja izveidojuma dēļ tvaiks burbuļo cauri hidrauliskajam slēgam un saskaras ar šķidro fāzi. Šķidrā fāze kolonnā rodas, no kolonnas aizplūstošo tvaiku daļēji kondensējot deflegmatorā 1. Iegūto flegmu no deflegmatora aizvada atpakaļ uz kolonnu. Šķidrā fāze rektifikācijas kolonnā nepārtraukti pārvietojas no augšējā šķīvja uz



12.12. att. Atkārtotas vienkāršās destilācijas attēlojums $t-x-y$ diagrammā.



12.13. att. Periodiskas darbības rektifikācijas iekārtas shēma.



12.14. att. Nepārtrauktas darbības rektifikācijas iekārtas shēma.

zemāk esošiem šķīvjjiem un tālāk uz kubu. Tvaika plūsmu rada siltumapmainītājs 6.

Tvaika un šķidrās fāzes saskares vietās tvaika burbuli atdziest (šķidrājai fāzei ir zemāka temperatūra), un daļa tvaika kondensējas. Vairāk kondensējas grūtāk gaistošais komponents, tādēļ tvaiks, plūzdams pa kolonnu uz augšu, kļūst bagātāks ar vieglāk gaistošo komponentu. Siltums, kas izdalās, tvaikam kondensējoties, veicina daļēju šķidrās fāzes iztvaikošanu. Tā rezultātā tvaikā pāriet galvenokārt vieglāk gaistošais komponents. Tādēļ šķidrā fāze, plūzdama uz leju, bagātinās ar grūtāk gaistošo komponentu.

Tvaiks, kas deflegmatorā nav kondensējies, aizplūst uz kondensatoru—dzesinātāju 2 un tur kondensējas. Iegūtais rektifikāts atdziest līdz noteiktai temperatūrai.

Pēc tam tas cauri kontroles zvanam 4 plūst uz rektifikāta tvertni 7. Kontroles zvanā mēra rektifikāta koncentrāciju vai blīvumu.

Tad, kad iegūts noteikts daudzums rektifikāta, procesu pārtrauc. No kuba izlaiž kuba atlikumu, kas ir praktiski tīrs komponents B, bet rektifikāta tvertnē 7 sakrājas praktiski tīrs komponents A. Pēc jauna sākuma šķīduma iepildīšanas kubā rektifikāciju atkārtō.

Nepārtrauktas darbības rektifikācijas iekārta. Lielu šķīdumu tilpumu rektificēšanai lieto nepārtrauktas darbības rektifikācijas iekārtas. Sajās iekārtās nepārtrauktā plūsmā pievada sākuma šķīdumu A+B un nepārtraukti no iekārtas aizvada praktiski tīrus komponentus A un B. 12.14. attēlā parādīta nepārtrauktas darbības rektifikācijas iekārta. Sākuma šķīdumu priekšsildītājā 1 uzsilda līdz viršanas temperatūrai un nepārtraukti ievada kolonnā 2 uz kolonnas apakšējās daļas augšējā šķīvjja.

Rektifikācijas kolonna sastāv no augšējās un apakšējās daļas, starp kurām atrodas sākuma šķīduma ievadišanas vieta. No augšas kolonnā ievada flegmu, bet no kolonnas apakšas uz augšu ceļas tvaiks, kuru iegūst, sildot šķidro fāzi kolonnas apakšā. Šādas darbības rezultātā šķidrā fāze kolonnas apakšējā daļā atbrivojas no vieglāk gaistošā komponenta, bet no kolonnas apakšas aizvada praktiski tīru grūti gaistošo komponentu B. Tvaiks, kas plūst pa kolonnu uz augšu, atbrivojas no grūtāk gaistošā komponenta, un uz deflegmatoru 3 aizplūst praktiski tīrs komponents A tvaiks. Daļu šā tvaika kondensē deflegmatorā flegmas iegūšanai, bet otru daļu aizvada uz kondensatoru—dzesinātāju 4. Cauri kontroles zvanam 5 rek-

tifikāts plūst uz tvertni 6. 12.14. attēlā redzamai rektifikācijas iekārtai siltumapmainītājs 7 novietots blakus kolonnai. Sākuma šķidumu iekārtai pievada nepārtraukti, tādēļ arī kuba atlikumu (komponents B) un rektifikātu (komponents A) no iekārtas aizvada nepārtraukti.

Nepārtrauktas darbības rektifikācijas iekārtās lieli siltuma daudzumi atbrīvojas deflegmatorā, kondensatorā—dzesinātājā un aizplūst ar kuba atlikumu. So siltumu iespējams izlietot sākuma šķiduma sildīšanai, kā arī citām vajadzībām.

Daudzkomponentu šķidumu sadalīšana rektificējot. Iepriekš aplūkotās rektifikācijas shēmas lietojamas bināru šķidumu $A+B$ vai daudzkomponentu sistēmu sadalīšanai, ja atdala vienu komponentu. Ja daudzkomponentu šķidums $A+B+C$ jāsadala pa atsevišķiem komponentiem A , B un C , tad līdzīgi kā bināro šķidumu sadalīšanā lieto periodisko vai nepārtraukto rektifikāciju.

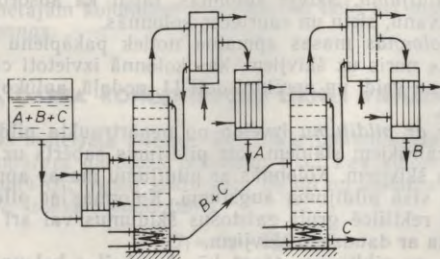
Daudzkomponentu šķidumu sadalot periodiski, to izdara vienā kolonnā, izmantojot 12.13. attēlā parādīto iekārtu. Dažādos laikos uz tverot dažādas frakcijas, iegūst tādas frakcijas, kas satur tirus komponentus, kā arī frakcijas, kas satur komponentu šķidumus. Frakcijas, kas satur komponentu šķidumus, pievieno sākuma šķidumam un destilē atkārtoti.

Nepārtrauktā daudzkomponentu šķiduma rektificēšanā kolonnu skaits iekārtā par vienu mazāks nekā komponentu skaits šķidumā. Trīskomponentu sistēmai vajadzīgas 2 kolonnas, četrkomponentu sistēmai — 3 kolonnas utt.

Daudzkomponentu šķidumu sadalīšanu rektificējot var izdarīt pēc diviem variantiem.

Sadalot trīskomponentu $A+B+C$ šķidumu pēc pirmā variantā (12.15. att.), vieglāk gaistošo komponentu A atdala pirmajā kolonnā. Komponentus $B+C$ no pirmās kolonnas kā kuba atlikumu aizvada uz otro kolonnu, kur komponents B kā vieglāk gaistošais aizplūst pa kolonnas augšu, bet grūtāk gaistošo komponentu C no kolonnas apakšas aizvada kā kuba atlikumu.

Pēc otrā variantā no pirmās kolonnas augšas aizvada komponentus $A+B$, bet no kolonnas apakšas kā kuba atlikumu aizvada komponentu C . Otrajā kolonnā ievadītais maisījums $A+B$ sadalās tā,



12.15. att. Rektifikācijas iekārtā trīskomponentu šķiduma sadalīšanai.

ka vieglāk gaistošais komponents *A* aizplūst pa kolonnas augšu uz deflegmatoru, bet grūtāk gaistošais komponents *B* aizplūst kā kuba atlikums no kolonnas apakšas.

Otrajā variantā tvaiku *A+B* dažreiz neaizvada tieši uz otro kolonnu, bet aiz deflegmatora novieto kondensatoru, kur tvaiku kondensē, un kondensātu aizvada uz otro kolonnu. Šajā gadījumā siltuma patēriņš ir lielāks.

12.5. PĀRTVAICES IEKĀRTU PAMATAPARATŪRA

Pārtvaices iekārtas galvenās daļas ir *pārtvaices kubs* un *rektifikācijas kolonna*.

Pārtvaices kubs. Pārtvaices kubs ir vertikāls vai horizontāls cilindrs. To novieto tieši zem rektifikācijas kolonnas (sk. 12.13. att.). Lielām iekārtām pārtvaices kubu novieto blakus rektifikācijas kolonnai (sk. 12.14. att.). Pārtvaices kubu veidi parādīti 12.16. attēlā.

Atkarībā no nepieciešamās pārtvaices temperatūras pārtvaices kubus apsilda ar dūmgāzēm vai ar tvaiku. Apsildot ar dūmgāzēm, sildvirsmas palielināšanai un cirkulācijas uzlabošanai kubus izveido ar izliektu vai ieliektu dibenu 1 (12.16. att.). Sākus kubus novieto virs kurtuves un apmūrē. Kubus konstruē tā, lai būtu intensīva iztvaikošana. To panāk, izveidojot cirkulācijas caurules 6 vai novietojot kalorizatorus ārpus kuba 7. Kubus ar nelielu sildvirsmu izveido ar tvaika apvalku 2 vai glodeni 3. Lielas sildvirsmas izveido no caurulēm 4, 5, 6 un 7.

Visu kuba tilpumu neaizpilda ar šķidrumu. Lietderīgi izmanto tikai 75% no visa tilpuma, bet putojošiem šķidrumiem — tikai 60%. Pārējā telpā notiek tvaika separācija. Kuba tilpums ir 1...25 m³.

Nepārtrauktas darbības rektifikācijas kolonnās, ja kubu veido kolonnas apakšējā daļa, tad tā tilpumam jābūt tādam, lai varētu izvietot siltumapmainītāju un nodrošināt tvaika separāciju.

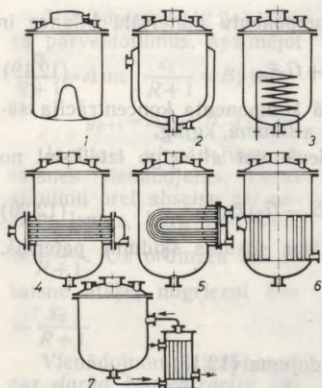
Rektifikācijas kolonnas. Rektifikācijas kolonnas iedala pēc kolonnu iekšējā izveidojuma, t. i., pēc kontakta veida starp fāzēm un pēc darba spiediena kolonnā.

Pēc kolonnu iekšējā izveidojuma izšķir *šķīvju kolonnas* un *kolonnas ar pildījumu*. Šķīvju kolonnas, tāpat kā absorbcijas kolonnas, iedala zvanu, sietu un caurteces kolonnās.

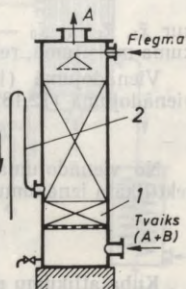
Šķīvju kolonnās masas apmaiņa notiek pakāpienu veidā, t. i., fāžu kontakts noris uz šķīvjiem, kas kolonnā izvietoti cits virs cita. Šķīvju kolonnu veidi un aprēķini doti 11. nodaļā, aplūkojot absorbcijas kolonnas.

Kolonnas ar pildījumu izveido no nepārtraukta pildījuma slāņa vai arī no vairākiem slāņiem, kur pildījums sabērts uz atsevišķiem caurumotiem šķīvjiem. Kolonnās ar pildījumu masas apmaiņa notiek nepārtraukti visā pildījuma augstumā. Kolonnas ar pildījumu lieto, ja vakuumā rektificē grūti gaistošus šķīdumus vai arī ja nepieciešama kolonna ar daudziem šķīvjiem.

Kolonnas ar pildījumu, tāpat kā absorbcijas kolonnas, var darboties plānslāņa vai barbotāžas režīmā. Maksimālo kolonnas efekti-



12.16. att. Pārtvaices kubu veidi.



12.17. att. Rektifikācijas kolonna ar pildījumu.

vitāti sasniedz, darbinot to barbotāžas režīmā. Barbotāžas režīma rašanos veicina tvaika fāzes plūsmas ātruma un pildījuma aprasiņāšanas blīvuma palielināšana (pievada vairāk flegmas).

12.17. attēlā redzama kolonna ar pildījumu, kas arī ar mazāku tvaika ātrumu darbosies barbotāžas režīmā. To panāk, novietojot uz režģa maza izmēra gredzenu slāni 1, kas novirza šķidrās fāzes plūsmu pa izliekto cauruli 2.

Atkarībā no spiediena, kādā kolonna darbojas rektifikācijas laikā, izšķiramas *vakuuma, normālās un spiediena kolonnas*.

Normālās kolonnas tvaika fāzes spiediens tuvs atmosfēras spiedienam un atkarīgs no kolonnas hidrauliskās pretestības. *Vakuuma un spiediena kolonnās* spiediena režīmu nosaka rektificējamā šķīduma termiskā izturība.

Bez minētajām kolonnām rektifikācijai lieto arī *plānslāņa un rotācijas kolonnas*.

12.6. DARBA KONCENTRĀCIJU LĪKNES VIENĀDOJUMI

Kolonnas materiālā bilance. Rektifikācijas kolonnas materiālo bilanci stacionāram darbības režīmam, t. i., kad kolonnā ievada sākuma šķīdumu G_1 , iegūst rektifikātu G_2 un no kolonnas izvada kuba atlikumu G_0 , izsaka vienādojums

$$G_1 = G_2 + G_0, \quad (12.18)$$

kur G_0 , G_1 un G_2 izteikti kilogramos sekundē (kg/s).

Attiecībā uz vieglāk gaistošo komponentu materiālā bilance ir šāda:

$$G_1\bar{x}_1 = G_2\bar{x}_2 + G_0\bar{x}_0, \quad (12.19)$$

kur \bar{x}_1 , \bar{x}_2 un \bar{x}_0 — vieglāk gaistošā komponenta koncentrācija sākuma maisījumā, rektifikātā un kuba atlikumā, kg/kg.

Vienādojumā (12.19) G_0 vietā ievietojot attiecīgo izteiksmi no vienādojuma (12.18), iegūst, ka

$$G_1\bar{x}_1 = G_2\bar{x}_2 + (G_1 - G_2)\bar{x}_0. \quad (12.20)$$

No vienādojuma (12.20), ja zināms sākuma šķīduma patēriņš, rektifikāta iznākumu aprēķina šādi:

$$G_2 = G_1 \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_0}{\bar{x}_2 - \bar{x}_0}.$$

Kuba atlikumu aprēķina no vienādojuma (12.18)

$$G_0 = G_1 - G_2.$$

Darba koncentrāciju liknes vienādojums kolonnas augšējai daļai. Vienādojumu, kas izsaka tvaika un šķidrās fāzes koncentrācijas maiņu kolonnā, sauc par *darba koncentrāciju liknes vienādojumu*. Darba koncentrāciju liknes vienādojuma iegūšanai pieņem, ka tvaiku patēriņš G_y , kuri ceļas pa kolonnu uz augšu, visos līmeņos ir vienāds. Uz leju plūstošās šķidrās fāzes patēriņš G_f kolonnas augšējās daļas robežās paliek nemainīgs. Materiālā bilance kolonnas augšējās daļas jebkuram šķēlumam izsakāma šādi:

$$G_y = G_f + G_2. \quad (12.21)$$

Attiecību $\frac{G_f}{G_2} = R$ sauc par *flegmas skaitli*. Flegmas skaitlis R rāda, cik kilogramu (vai molu) flegmas aizvada atpakaļ kolonnā uz 1 kg (vai 1 molu) iegūtā rektifikāta.

Ja pieņem, ka $G_2 = 1$, tad $G_f = R$, tad vienādojums (12.21) iegūst šādu izteiksmi ($G_y/G_2 = n_y$):

$$n_y = R + 1. \quad (12.22)$$

So materiālās bilances vienādojumu attiecinot uz vieglāk gaistošo komponentu n -tajam šķīvim (12.18. att.), iegūst

$$n_y y_{n+1} = R x_n + x_2, \quad (12.23)$$

kur n_y — tvaika fāze, kas plūst kolonnā uz augšu, mol (vai kg), y_{n+1} — uz n -tā šķīvja uzplūstošā tvaika koncentrācija, moldaļās (vai masas daļās); x_n — no n -tā šķīvja aizplūstošās šķidrās fāzes koncentrācija, moldaļās (vai masas daļās); x_2 — rektifikāta koncentrācija, moldaļās (vai masas daļās).

Dalot vienādojumu (12.23) ar vienādojumu (12.22), iegūst

$$y_{n+1} = \frac{R}{R+1} x_n + \frac{1}{R+1} x_2. \quad (12.24)$$

Vienādojumā (12.24) izdara pārveidojumus, apzīmējot

$$\frac{R}{R+1} = A \text{ un } \frac{x_2}{R+1} = B; \text{ tad}$$

$$y_{n+1} = Ax_n + B. \quad (12.25)$$

Iegūtais vienādojums ir taisnes vienādojums, kuras slīpumu pret abscisu asi nosaka leņķis, kura $\operatorname{tg} \alpha = A =$

$$= \frac{R}{R+1}. \text{ Uz ordinātu ass šī taisne atšķel nogriezni } B = \frac{x_2}{R+1}.$$

Vienādojumu (12.25) sauc par *darba koncentrāciju liknes vienādojumu* jeb *par darba taisnes vienādojumu kolonnas augšējai daļai*.

Darba koncentrāciju liknes vienādojums kolonnas apakšējai daļai. Kolonnas apakšējās daļas (12.18. att.) materiālo bilanci izsaka vienādojums

$$G' = G_y + G_0, \quad (12.26)$$

kur G' , G_y un G_0 — kopējā šķīdumu plūsma kolonnas apakšējā daļā, tvaika plūsma un kuba atlikums, mol/s (vai kg/s).

Ja pieņem, ka tvaika un šķidrās fāzes plūsmas kolonnas apakšējā daļā jebkuros līmeņos ir vienādas, tad materiālā bilancē attiecībā uz m -to šķīvi un vieglāk gaistošo komponentu ir

$$G'x_m = G_y y_{m+1} + G_0 x_0. \quad (12.27)$$

Šķidrās fāzes patēriņš, kas plūst cauri kolonnas apakšējās daļas jebkuram šķēlumam, ir

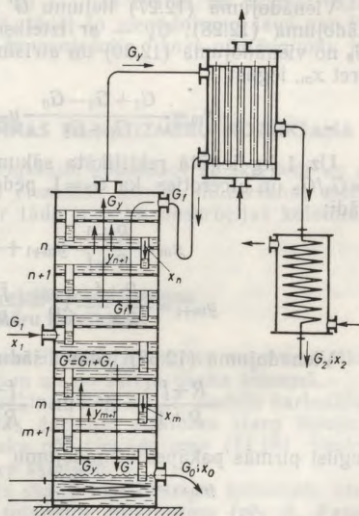
$$G' = G_1 + G_t. \quad (12.28)$$

No vienādojumiem (12.26) un (12.28) iegūst

$$G_y + G_0 = G_t + G_1. \quad (12.29)$$

No iepriekšējā zināms, ka $G_y = G_t + G_2 = G_2(R+1)$, bet $G_t = RG_2$, tad vienādojums (12.29) pārveidojams (attiecinot uz 1 mol vai 1 kg rektifikāta, t. i., $G_2 = 1$)

$$G_1 = G_0 + 1. \quad (12.30)$$



12.18. att. Plūsmu un koncentrāciju apzīmējumi kolonnā.

Vienādojumā (12.27) lielumu G' aizvietojo ar izteiksmi no vienādojuma (12.28), G_y — ar izteiksmi no vienādojuma (12.26) un G_0 no vienādojuma (12.30) un atrisinot iegūto vienādojumu attiecībā pret x_m , iegūst

$$x_m = \frac{G_1 + G_1 - G_0}{G_1 + G_1} y_{m+1} + \frac{G_1 - 1}{G_1 + G_1} x_0.$$

Uz 1 kg iegūtā rektifikāta sākuma maisījumu apzīmējot ar $f = G_1/G_2$ un atceroties, ka $G_2 = 1$, pēdējais vienādojums pārveidojams šādi:

$$x_m = \frac{R+1}{R+f} y_{m+1} + \frac{f-1}{R+f} x_0 \quad \text{vai} \quad (12.31)$$

$$y_{m+1} = \frac{R+f}{R+1} x_m - \frac{f-1}{R+1} x_0. \quad (12.32)$$

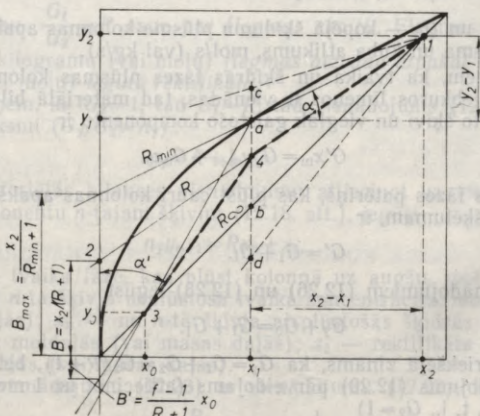
Vienādojumā (12.32) izdarot šādus apzīmējumus:

$$\frac{R+f}{R+1} = A' \quad \text{un} \quad \frac{f-1}{R+1} x_0 = B',$$

iegūst pirmās pakāpes vienādojumu

$$y_{m+1} = A' x_m - B'. \quad (12.33)$$

Tas ir taisnes vienādojums, kuras slīpumu pret abscisu asi nosaka leņķis, kura tangenss A' . Uz ordinātu ass šī taisne atšķel nogriezni B' (12.19. att.).



12.19. att. Darba taisnes konstruēšana kolonnas augšējai un apakšējai daļai.

Vienādojums (12.33) rāda, kā mainās tvaika un šķidrās fāzes sastāvs kolonnas apakšējā daļā, tādēļ šo vienādojumu sauc par *kolonnas apakšējās daļas darba koncentrāciju liknes vienādojumu* jeb *darba taisnes vienādojumu*.

12.7. REKTIFIKĀCIJAS KOLONNAS PAMATIZMĒRU NOTEIKŠANA

Aplūkosim pamatizmēru noteikšanu kolonnām ar šķīvjjiem un ar pildījumu. Šķīvju konstruktīvo elementu izmēru noteikšanas metodika rektifikācijas kolonnām ir tāda pati kā absorbcijas kolonnām (sk. 11. nodaļu).

12.7.1. Šķīvju rektifikācijas kolonnu pamatizmēru noteikšana

Šķīvju kolonnas augstuma noteikšana. Kolonnas augstums atkarīgs no attāluma starp šķīvjjiem un no šķīvju skaita kolonnā.

Attālumu starp šķīvjjiem aprēķina tāpat kā 11. nodaļā barbotāžas absorberiem. Normālai kolonnas darbībai attālumu starp šķīvjjiem H_{sk} ar pārteces caurulēm nosaka pēc vienādojuma (11.18). Praksē cenšas samazināt attālumu starp šķīvjjiem.

Faktisko nepieciešamo šķīvju skaitu rektifikācijas kolonnām ieteicams noteikt grafiski, lietojot *līdzsvara diagrammu* (pēc A. Kasatkina, A. Planovska un O. Čehova metodes) vai entalpijas *t-h-x* diagrammu (pēc N. Alavdina metodes).

Darba taisnes konstruēšana. Vienādojums (12.25) izsaka matemātisko sakarību starp kolonnas augšējā daļā plūstošām šķidrās fāzes un tvaika fāzes koncentrācijām. Šo sakarību grafiski attēlo līdzsvara diagrammā. Tad rodas iespēja grafiski noteikt koncentrācijas maiņas pakāpienus, kas nepieciešami sākuma šķīduma sadalīšanai vajadzīgās koncentrācijas robežās.

Pieņem, ka no kolonnas augšas aizplūstošā tvaika sastāvs vienāds ar flegmas sastāvu, t. i., $y_2 = x_2$. Tad darba taisnes viens punkts *y-x* diagrammā (12.19. att.) ir punkts 1 uz diagrammas diagonāles ($x = y$). Otru darba taisnes punktu 2 iegūst, uz ordinātu ass atliekot nogriezni *B*. Savienojot punktus 1 un 2, iegūst kolonnas augšējās daļas darba taisni jeb periodiskās rektifikācijas kolonnas darba taisni.

Nepārtrauktas darbības rektifikācijas kolonnas apakšējai daļai darba taisni, kuru raksturo vienādojums (12.32), konstruē līdzīgi, nosakot divus šīs taisnes punktus. Šo punktu iegūšanai pieņem, ka kuba atlikuma koncentrācija šķidrā fāzē un tvaika fāzē ir vienādas, t. i., $y_0 = x_0$. Tā iegūst punktu 3 (uz diagonāles). Kolonnas apakšējās daļas un augšējās daļas sākumā ievada sākuma šķīdumu ar koncentrāciju x_1 , tādēļ tur, kur kolonnas augšējās daļas darba taisne krusto perpendikulu ar abscisu x_1 , iegūst punktu 4, kas kopējs abām kolonnas daļām. Savienojot punktus 3 un 4, iegūst kolonnas apakšējās daļas darba taisni.

Minimālā flegmas skaitļa un darba flegmas skaitļa noteikšana. Kolonnas augšējās daļas darba taisnes konstruēšanai jāzina nogriežņa B garums. Nogrieznis $B = \frac{x_2}{R+1}$, un tā aprēķināšanai jāzina flegmas skaitlis R .

Atkarībā no flegmas skaitļa vērtības punkts 4 (12.19. att.) pārvietosies pa līniju $x_1 a$ no stāvokļa b līdz stāvoklim a . Punkts 4 nevar atrasties ārpus līdzsvara līknes, piemēram, stāvoklī c , jo rektifikācija notiek tikai tad, ja $y^* > y$. Stāvoklī a punkts 4 atradīsies tad, ja kolonnai pievadīs minimālo flegmas daudzumu, t. i., tad, ja $R = R_{\min}$. Stāvoklī a $y^* = y_1$, tādēļ masas apmaiņai nepieciešama bezgalīgi liela fāžu saskares virsma (augsta kolonna). Nākamā galējība, — ja punkts 4 ieņem stāvokli b . Tas ir tad, ja $R = R_{\max} = \infty$. Praktiski tas iespējams, ja no kolonnas nenovada rektifikātu, bet visus tvaikus kondensē deflegmatorā un ievada atpakaļ kolonnā. Ja $R = \infty$, tad $B = \frac{x_2}{\infty + 1} = 0$, t. i., procesa darba taisne jebkurai x_2 vērtībai sakrīt ar $y-x$ diagrammas diagonāli. Punkts 4 nevar ieņemt stāvokli d (zem diagonāles), jo tad tvaika fāzē vieglāk gaistošā komponenta ir mazāk nekā šķidrajā fāzē; tas rektifikācijā nav iespējams.

Reālos apstākļos rektifikācijas kolonnas darbojas ar flegmas skaitli, kas 1,2...2,5 un pat vairāk reizi lielāks par R_{\min} , t. i.,

$$R = \varphi R_{\min} = (1,2 \dots 2,5) R_{\min}. \quad (12.34)$$

Pēc praktiskajiem novērojumiem R_{opt} visbiežāk ir par 20...35% lielāks nekā R_{\min} , t. i., $R_{\text{opt}} = (1,2 \dots 1,35) R_{\min}$.

Minimālo flegmas skaitli var noteikt, ja zināms sākuma šķīduma un rektifikāta sastāvs.

No 12.19. attēla redzams, ka kolonnas augšējās daļas darba taisnes slīpums izsakāms šādi:

$$\text{tg } \alpha = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}.$$

No vienādojuma (12.24), ja iekārta darbojas režīmā, kad flegmas skaitlis ir R_{\min} , tad $\text{tg } \alpha = A = \frac{R_{\min}}{R_{\min} + 1}$ un $\frac{R_{\min}}{R_{\min} + 1} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$. No šī vienādojuma, ievērojot, ka $x_2 = y_2$, iegūst

$$R_{\min} = \frac{x_2 - y_1}{y_1 - x_1}. \quad (12.35)$$

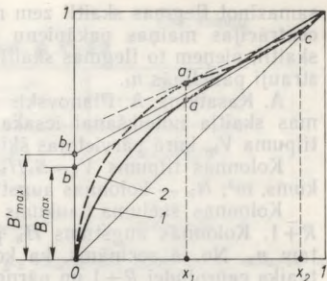
Ir arī grafiskā metode R_{\min} noteikšanai (12.20. att. līkne 1). Ja zināmas sākuma šķīduma un rektifikāta koncentrācijas (x_1 un x_2), no tām velk vertikāles, līdz vertikāle, kas vilkta no x_1 , krusto līdzsvara līkni (punkts a) un vertikāle, kas vilkta no x_2 , krusto diagonāli (punkts c). Savienojot punktus a un c , iegūst kolonnas darba taisni, ja flegmas skaitlis ir minimālais (R_{\min}). Nogrieznis Ob uz ordinātu ass ir maksimālais (B_{\max}) un atbilst gadījumam, ja koncentrācija kolonnā mainās no x_1 līdz x_2 .

No vienādojuma (12.25) iegūst, ka

$$B_{\max} = \frac{x_2}{R_{\min} + 1} \quad \text{un}$$

$$R_{\min} = \frac{x_2}{B_{\max}} - 1. \quad (12.36)$$

Ja līdzsvara likne ir ieliekta (12.20. att. likne 2) un caur punktiem c un a_1 vilktā taisne krusto līdzsvara likni, tad B_{\max} nosaka, velkot no punkta c pieskari līdzsvara liknei. Tur, kur šī pieskare krusto ordinātu asi, iegūst punktu b_1 , pēc kura var noteikt B'_{\max} .

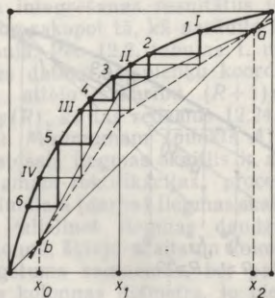


12.20. att. Minimālā flegmas skaitļa grafiskā noteikšana.

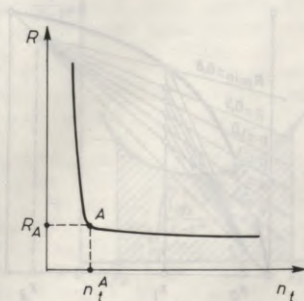
Darba flegmas skaitļa noteikšanai lieto dažādas metodes. Viena no metodēm parādīta 12.21. attēlā. Vispirms $y-x$ diagrammā zīmē rektifikācijas kolonnas darba taisnes, tad, sākot no punkta a , starp līdzsvara likni un darba taisnēm velk lauztu līniju, kas sastāv no horizontālām un vertikālām. Iegūtos pakāpienus sauc par *koncentrācijas maiņas pakāpieniem* (sk. 426. lpp.). No attēla redzams, — ja sākuma maisījuma sastāvs x_1 un vēlams iegūt rektifikātu ar sastāvu x_2 , bet kuba atlikumu ar sastāvu x_0 , tad nepieciešami 6 koncentrācijas maiņas pakāpieni. Sākuma maisījums jāpievada starp 2. un 3. pakāpienu.

Koncentrācijas maiņas pakāpienu skaits atkarīgs no flegmas skaitļa. Samazinot flegmas skaitli, pakāpienu skaits tam pašam rektifikācijas procesam pieaug, bet, palielinot flegmas skaitli, pakāpienu skaits samazinās (12.21. att. *a, I, II, III, IV*).

Sakarība starp flegmas skaitli R un koncentrācijas maiņas pakāpienu skaitu n_t parādīta 12.21. attēlā *b*. No attēla redzams, ka,



a



b

12.21. att. Darba flegmas skaitļa noteikšana.

samazinot flegmas skaitli zem noteikta lieluma R_A , strauji aug koncentrācijas maiņas pakāpienu skaits n_t . Izvēloties darba flegmas skaitli, pieņem to flegmas skaitli R_A , kas atbilst punktam A , no kura strauji palielinās n_t .

A. Kasatkins, A. Planovskis un O. Čehovs darba (optimālā) flegmas skaitļa noteikšanai iesaka vadīties no rektifikācijas kolonnas tilpuma V_k , kurā pārvietojas šķidrā fāzē un tvaika fāzē.

Kolonnas tilpums $V_k = S_k H_k$, kur S_k — kolonnas šķēluma laukums, m^2 ; H_k — kolonnas augstums, m .

Kolonnas šķēluma laukums S_k proporcionāls tvaika caurplūdei $R+1$. Kolonnas augstums H_k proporcionāls pārnesto vienību skaitam n_x . No tā secināms, ka kolonnas tilpums V_k ir proporcionāls tvaika caurplūdei $R+1$ un pārnesto vienību skaitam n_x .

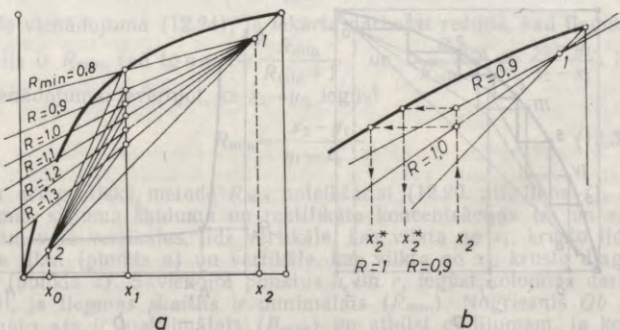
Kolonnas tilpumu ietekmē flegmas skaitlis, tādēļ darba flegmas skaitli ieteicams izvēlēties no sakarības

$$n_x(R+1) = \varphi(R).$$

Sā vienādojuma atrisināšanai nepieciešamo minimālo flegmas skaitli nosaka pēc vienādojuma (12.36).

No sakarības $B = \frac{x_2}{R+1}$ iegūst dažādas B vērtības brīvi izraudzītiem flegmas skaitļiem, kas lielāki par R_{\min} . Piemēram, ja $R_{\min} = 0,8$, tad pieņem flegmas skaitļus — 0,9, 1,0, 1,1, 1,2, 1,3 utt. un aprēķina B vērtības — $B_{0,9}$, $B_{1,0}$, $B_{1,1}$, $B_{1,2}$, $B_{1,3}$ utt. $y-x$ diagrammā (12.22. att. a) velk darba taisnes dažādām flegmas skaitļu vērtībām (0,8...1,3). Katram no šiem flegmas skaitļiem aprēķina pārnesto vienību skaitu

$$n_x = \int_{x_0}^{x_2} \frac{dx}{x-x^*}. \quad (12.37)$$



12.22. att. Pārnesto vienību skaita noteikšana dažādiem flegmas skaitļiem.

12.1. tabula

Dati n_x noteikšanai, ja $R=0,9$

x	x^*	$x-x^*$	$1/(x-x^*)$
1	2	3	4
x_0	x_0^*	$x_0-x_0^*$	$1/(x_0-x_0^*)$
·	·	·	·
·	·	·	·
x_2	x_2^*	$x_2-x_2^*$	$1/(x_2-x_2^*)$

Piezīme. Līdzsvara koncentrācijas x^* iegūst no $y-x$ diagrammas (12.22. att. b), atkarībā no R lieto attiecīgās darba taisnes.

12.2. tabula

Grafiskās integrēšanas rezultāti

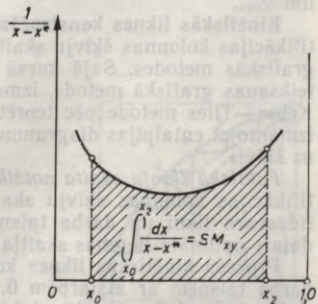
R	$R+1$	n_x	$(R+1)n_x$
1	2	3	4
0,9	1,9	$n_x^{0,9}$	$1,9n_x^{0,9}$
1,0	2,0	$n_x^{1,0}$	$2,0n_x^{1,0}$
1,1	2,1	$n_x^{1,1}$	$2,1n_x^{1,1}$
1,2	2,2	$n_x^{1,2}$	$2,2n_x^{1,2}$
1,3	2,3	$n_x^{1,3}$	$2,3n_x^{1,3}$

Pārnesto vienību skaita n_x aprēķināšanai ieteicams ievērot secību, kāda redzama 12.1. tabulā.

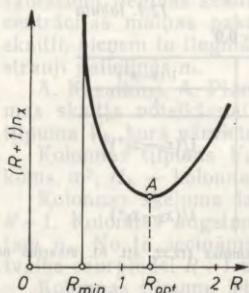
No 12.1. tabulas 1. un 4. ailes datiem katram flegmas skaitlim (0,9, 1,0, 1,1 utt.) iegūst grafisku sakarību $\frac{1}{x-x^*} = f(x)$, kas redzama 12.23. attēlā. No grafika var aprēķināt pārnesto vienību skaitu n_x dotajam flegmas skaitlim. Grafiskās integrēšanas rezultātus ieteicams sakopot tā, kā parādīts 12.2. tabulā. Pēc 12.2. tabulas 1. un 4. ailes datiem taisnleņķu koordinātās attēlo sakarību $(R+1)n_x = \varphi(R)$, kā tas redzams 12.24. attēlā. Minimamam (punkts A) atbilstošais flegmas skaitlis ir aplūkojamam rektifikācijas procesam optimālais (darba) flegmas skaitlis.

Palielinot flegmas daudzumu augstums samazinās, bet palielinās kolonnas diametrs, jo pieaug caurplūstošā tvaika daudzums.

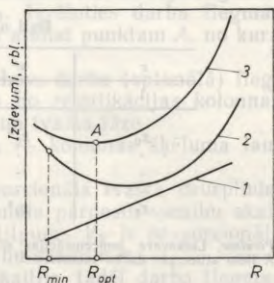
Optimālais flegmas skaitlis R_{opt} saistīts arī ar iekārtas ekonomis-



12.23. att. Sakarības $\frac{1}{x-x^*} = f(x)$ grafiskais attēlojums.



12.24. att. Optimālā flegmas skaitļa noteikšana.



12.25. att. Optimālā flegmas skaitļa noteikšana pēc ekonomiskajiem rādītājiem.

kajiem rādītājiem. Palielinot flegmas skaitli, kapitālieguldījumu (kolonnas izmaksu) likne ir ar minimumu, jo kolonnas augstums samazinās niecīgi, bet diametrs palielinās strauji (12.25. att. likne 2). Flegmas patēriņa palielināšana saistīta arī ar deflegmatora un siltumapmainītāja izmaksu palielināšanos.

Rektifikācijas iekārtas ekonomiskie rādītāji atkarīgi arī no ekspluatācijas izdevumiem. Siltuma patēriņš (tvaiks) un ūdens patēriņš (deflegmatorā) tieši proporcionāli flegmas skaitlim R (12.25. att. likne 1).

Kolonnas kopējo izmaksu likne (12.25. att. likne 3) arī virzīta cauri minimumam, kas nesakrīt ar kapitālieguldījumu liknes minimumu. Punkts A uz liknes 3 atbilst optimālajam flegmas skaitlim R_{opt} .

Kinētiskās liknes konstruēšana un šķīvju skaita noteikšana. Rektifikācijas kolonnas šķīvju skaita noteikšanai izmanto analītiskās un grafiskās metodes. Šajā kursā apskatīta faktiskā šķīvju skaita noteikšanas grafiskā metode, izmantojot kinētisko likni, klasiskā Mak-Kebes—Tiles metode pēc teorētiskā šķīvju skaita, Alavdina metode, izmantojot entalpijas diagrammu, kā arī analītiskā metode «no šķīvja uz šķīvi».

Faktiskā šķīvju skaita noteikšana, izmantojot kinētisko likni. Rektifikācijas kolonnas šķīvju skaita noteikšanai $y-x$ diagrammā zīmē līdzsvara likni un darba taisnes (kolonnas augšējai un apakšējai daļai) optimālā flegmas skaitļa gadījumam (12.26. att.).

Procesa kinētiskās liknes konstruēšanai starp līdzsvara likni un darba taisnēm ar atstarpēm 0,1 (izvēlas brīvi) velk vertikāles AC , A_1C_1 , A_2C_2 , A_3C_3 utt. (tāpat kā absorbcijai, sk. 11.23. attēlu). Kinētiskās liknes punktu B , B_1 , B_2 , B_3 utt. iegūšanai no sakarības $BC = E_y AC$ aprēķina nogriežņus BC , B_1C_1 , B_2C_2 utt. Nogriežņus AC , A_1C_1 , A_2C_2 utt. izmēra milimetros, bet lielumu E_y aprēķina pēc vie-

nādojuma (10.71). Tālākie aprēķini aplūkoti 459. lappusē, apskatot absorbcijas barbotāžas iekārtas.

Uz $y-x$ diagrammas (12.26. att.) no līdzsvara līknes punktiem C, C_1, C_2, C_3 utt. atliek aprēķinātos nogriežņus $BC, B_1C_1, B_2C_2, B_3C_3$ utt. Savienojot iegūtos punktus B, B_1, B_2, B_3 utt., iegūst procesa kinētisko līkni. Starp iegūto kinētisko līkni un darba taisnēm koncentrāciju robežās no x_2 līdz x_0 velk lauztu pakāpienu līniju. Lauztās līnijas pakāpienu skaits norāda šķīvju skaitu: augšējai kolonnas daļai ir 6, apakšējai — 8 šķīvji.

Teorētiskā šķīvju skaita noteikšana. Rektifikācijas kolonnai nepieciešamo šķīvju skaitu var noteikt arī pēc koncentrācijas maiņas pakāpienu skaita jeb teorētiskā šķīvju skaita (Mak-Kebes—Tiles metode).

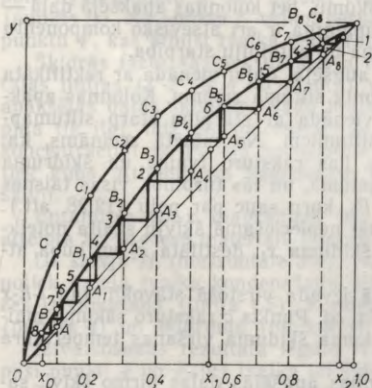
Līdzsvara diagrammā, kurā konstruētas kolonnas darba taisnes (12.27. att.), no punkta a velk koncentrācijas maiņas pakāpienus. Teorētiskais šķīvju skaits atbilst koncentrācijas maiņas pakāpienu skaitam. Aplūkojamam gadījumam teorētiskais šķīvju skaits kā kolonnas augšējā daļā, tā arī apakšējā daļā ir 3.

Faktisko šķīvju skaitu n_f nosaka pēc šādas izteiksmes:

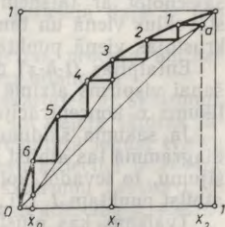
$$n_f = \varepsilon n_t,$$

kur $\varepsilon = 1/\eta$ — faktiskais šķīvju skaits, kas atbilst vienam koncentrācijas maiņas pakāpienam; η — šķīvju lietderības koeficients, kas atkarīgs no šķīvja konstrukcijas, hidrodinamiskiem faktoriem u. c. Aptuveniem aprēķiniem pieņem, ka $\eta = 0,5 \dots 0,8$.

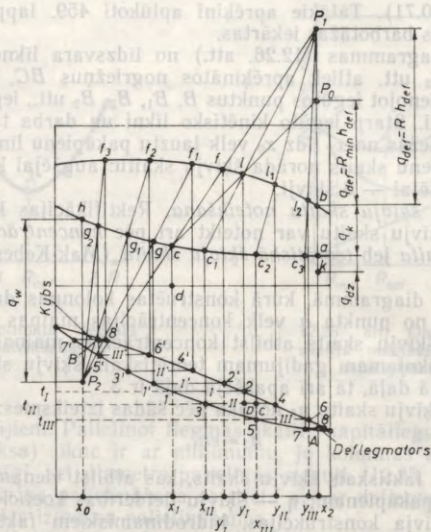
Šķīvju skaita aprēķināšana, lietojot entalpijas ($t-h-x$) diagrammu. Nepārtrauktas darbības kolonnas jebkuram šķēlumam starpība starp



12.26. att. Kinētiskās līknes konstruēšana un šķīvju skaita noteikšana.



12.27. att. Šķīvju skaita noteikšana pēc koncentrācijas maiņas pakāpienu skaita.



12.28. att. Šķīvju skaita noteikšana, izmantojot t - h - x diagrammu.

tvaika masu un šķidrums masu ir nemainīga un kolonnas augšējā daļā tā vienāda ar destilāta iznākumu, bet kolonnas apakšējā daļā — ar kuba atlikuma iznākumu. Nemainīga ir arī atsevišķo komponentu masu starpība tvaikā un šķīdumā un entalpiju starpība.

Entalpiju starpība kolonnas augšējai daļai vienāda ar rektifikāta entalpijas un deflegmatorā atņemtā siltuma summu. Kolonnas apakšējai daļai entalpiju starpība vienāda ar starpību starp siltumapmainītāja un kuba atlikuma siltumiem. No minētā secināms, ka, savienojot ar taisnēm punktus, kas raksturo tvaika un šķidrums stāvokļus vienā un tanī pašā šķēlumā, un tās turpinot, visas taisnes krustojas vienā punktā P_1 vai P_2 , kuru sauc par polu (12.28. att.).

Entalpijas (t - h - x) diagrammā¹ nepieciešamā šķīvju skaita noteikšanai vispirms atzīmē sākuma šķīduma x_1 , destilāta x_2 un kuba atlikuma x_0 koncentrācijas.

Ja sākuma šķīdumu kolonnā ievada virstošā stāvoklī, tad t - h - x diagrammā tas atbilst nogrieznim cd . Punkts c raksturo sākuma maisījumu, to ievadot kolonnā. Sākuma šķīduma viršanas temperatūra atbilst punktam I , t. i., t_1 .

Tvaikam, kas plūst uz kolonnas augšējās daļas pirmo šķīvi, sastāvs ir y_1 (punkts 2). Entalpija tvaikam ar sastāvu y_1 atbilst pun-

¹ Par diagrammas uzbūvi sk. 12.7. attēlu.

ktam l . Savienojot punktus c un l un turpinot taisni, līdz tā krusto perpendikulu ar koordinātu x_2 , iegūst polu P_0 , kas atbilst kolonnas darbībai ar minimālo flegmas skaitli R_{\min} . Kolonna darbojas ar flegmas skaitli $R > R_{\min}$, tādēļ uz perpendikula ar koordinātu x_2 virs punkta P_0 attiecīgā mērogā atkarībā no R_1 atzīmē darba polu P_1 . Novelkot taisni no P_1 caur punktu c , līdz tā krusto perpendikulu ar abscisu x_0 , iegūst otru kolonnas polu P_2 .

No pola P_1 velkot taisni caur punktu l , iegūst punktu c_1 , kas atbilst šķidrās fāzes sastāvam x_{II} , kura plūst no šķīvja II uz šķīvi I . Šķidrās fāzes temperatūra atbilst punktam 3 , t. i., t_{II} . Tvaika fāzes sastāvs y_{II} , kas pārvietojas uz šķīvi III , atbilst punktam 4 . Uz šķīvi III plūstošā tvaika entalpiju nosaka punkts l_1 . Staru no P_1 velkot caur l_1 , līdz tas krusto šķidrās fāzes entalpijas likni, iegūst punktu c_2 . Izmantojot punktu c_2 , var noteikt šķidrās fāzes sastāvu x_{III} , kura plūst no šķīvja III uz šķīvi II . Šķidrās fāzes temperatūra t_{III} atbilst punktam 5 utt. Sādu horizontālu līniju ($1-2, 3-4, 5-6$ utt.) konstruēšanu turpina līdz nepieciešamajai rektifikāta koncentrācijai.

12.28. attēlā dotajā gadījumā, lai izmainītu šķidrās fāzes sastāvu no x_1 līdz x_2 , nepieciešami trīs šķīvji. Horizontāle $7-8$ raksturo procesu, kas notiek deflegmatorā.

Līdzīgi šķīvju skaitu nosaka arī kolonnas apakšējai daļai. Tvaika entalpiju, kurš no šķīvja I' ceļas uz augšu uz šķīvi I , raksturo punkts f . Šā tvaika sastāvs ir y'_1 .

Ja no punkta $2'$ velk horizontāli, līdz tā krusto šķidrās fāzes temperatūras līniju, iegūst punktu I' , kas atbilst šķidrās fāzes sastāvam uz šķīvja I' . No punkta I' velkot perpendikulu, līdz tas krusto šķidrās fāzes entalpijas likni, iegūst punktu g . Pēc taisnes, kas savieno polu P_2 ar punktu g , var noteikt tvaika fāzes sastāvu uz šķīvja II' (punkts f_1). No punkta f_1 velkot perpendikulu pret abscisu asi, iegūst punktu $4'$, kas atbilst tvaika temperatūrai uz šķīvja II' .

Šķidrās fāzes sastāvs uz šķīvja II' atbilst punktam $3'$. Horizontālās līnijas ($1'-2', 3'-4', 5'-6'$ utt.) virs līnijas $1-2$ atbilst kolonnas apakšējās daļas šķīvjiem. Sādu horizontālu līniju konstruēšanu turpina tik ilgi, līdz no koncentrācijas x_1 nokļūst līdz kuba atlikuma koncentrācijai x_0 . Pēdējā horizontāle $7'-8'$ raksturo procesu, kas notiek kubā. Attēlotajam gadījumam kolonnas apakšējā daļā ir trīs šķīvji.

Entalpijas $t-h-x$ diagrammā bez rektifikācijas procesa būtības attēlota arī procesa materiālā bilance un siltuma bilance.

Uz šķīvja II (horizontāle $3-4$), tvaikam saskaroties ar šķidrumu, notiek daļēja tvaika kondensācija (līnija $D2$) un daļēja šķidrās fāzes iztvaikošana (līnija $C5$). Kondensācijas rezultātā iegūst tvaiku (punkts 4) un šķidrumu (punkts 3), kuru masu attiecība ir $3C/4C$.

Iztvaikošanas rezultātā iegūto tvaiku un šķidrumu raksturo tie paši punkti 4 un 3 , bet tvaika un šķidrums masu attiecība ir $4D/3D$.

Tvaika masa (punkts 2) proporcionāla nogriežņa c_1P_1 garumam, bet rektifikāta masa — nogriežņa c_1l garumam. Šķidrums masa (punkts 5) ekvivalenta nogriežnim c_2P_1 , flegmas masa — nogriežnim l_1P_1 , bet rektifikāta masa — nogriežnim c_2l_1 .

Līdzīgi attēlojami procesi, kas notiek kubā (kolonnas apakšā) un deflegmatorā. Kuba atlikuma masa proporcionāla nogrieznim $8'B$, bet tvaika masa, kas ceļas no kuba uz augšu, proporcionāla nogrieznim $7'B$. Flegmas masa proporcionāla nogrieznim $8A$, bet rektifikāta masa — nogrieznim $7A$.

Īpatnējais siltuma daudzums deflegmatorā q_{def} ekvivalents nogrieznim bP_1 . Īpatnējais siltuma daudzums kubā ekvivalents nogrieznim q_w . Nogrieznis ab ekvivalents īpatnējam siltuma daudzumam q_k , kuru aizvada kondensatora—dzesinātāja kondensācijas daļā. Nogrieznis ak ekvivalents īpatnējam siltuma daudzumam q_{dz} , kuru atņem kondensatora—dzesinātāja dzesēšanas daļā.

Tad iegūst, ka 1) kubā pievadāmā siltuma plūsma ir G_0q_w ; 2) no deflegmatora aizvadāmā siltuma plūsma RG_2q_{def} ; 3) no kondensatora—dzesinātāja aizvadāmā siltuma plūsma: a) kondensācijas daļā G_2q_k un b) dzesēšanas daļā G_2q_{dz} , kur G_0 , G_2 — kuba atlikuma un rektifikāta patēriņš, kg/s; R — flegmas skaitlis.

Teorētiskā šķīvju skaita noteikšana pēc metodes «no šķīvja uz šķīvi». Pēc šīs metodes var analītiski aprēķināt rektifikācijas kolonnai nepieciešamo šķīvju skaitu, izmantojot elektroniskās skaitļošanas mašīnas un standarta programmas. Metodes pamatā ir fāžu līdzsvara vienādojums, materiālā bilance un siltuma bilance katram kolonnas šķīvim. Risinājuma vienkāršošanai var pieņemt, ka flegmas patēriņš pa kolonnas augstumu nemainās. Tādēļ var atteikties no siltuma bilances sastādīšanas.

Vispirms pieņem flegmas temperatūru t_A . Rektifikāts ir praktiski tīrs vieglāk gaistošais komponents, tādēļ pieņem, ka t_A vienāda ar tīra vieglāk gaistošā komponenta viršanas temperatūru. Ja t_A ir zināma, pēc p - t diagrammas (12.29. att. c) iegūst komponentu tvaika parciālos spiedienus p_A^t un p_B^t . Aprēķina relatīvo gaistamības koeficientu flegmai (sk. vienādojumu (12.9)):

$$\alpha_t = p_A^t / p_B^t.$$

Lietojot fāžu līdzsvara vienādojumu (12.10), aprēķina flegmas sastāvu

$$x_t = \frac{y_2}{\alpha_t - y_2(\alpha_t - 1)},$$

kur y_2 — no augšējā kolonnas šķīvja aizplūstošā tvaika koncentrācija (pieņem, ka tā vienāda ar rektifikāta koncentrāciju), moldaļās.

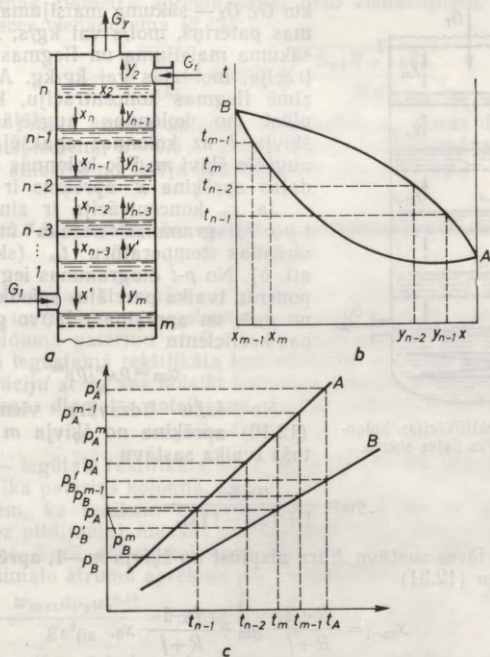
Pēc rektifikācijas kolonnas augšējās daļas darba taisnes vienādojuma (12.24) aprēķina uz šķīvja n uzplūstošā tvaika koncentrāciju (12.29. att. a):

$$y_{n-1} = \frac{R}{R+1} x_t + \frac{x_2}{R+1}.$$

Pēc vienādojuma (12.9) aprēķina relatīvo gaistamības koeficientu šķīvim $n-1$

$$\alpha_{n-1} = p_A / p_B.$$

Vispirms, zinot tvaika koncentrāciju y_{n-1} , no t - y - x diagrammas (12.29. att. b) nosaka tvaika temperatūru t_{n-1} . Pēc šīs temperatūras



12.29. att. Šķīvjū skaita noteikšana pēc metodes «no šķīvjā uz šķīvi».

no $p-t$ diagrammas (12.29. att. c) iegūst komponentu tvaika parciālos spiedienus p_A un p_B .

Pēc fāžu līdzsvara vienādojuma (12.10) aprēķina no šķīvjā $n-1$ noplūstošās šķidrās fāzes koncentrāciju

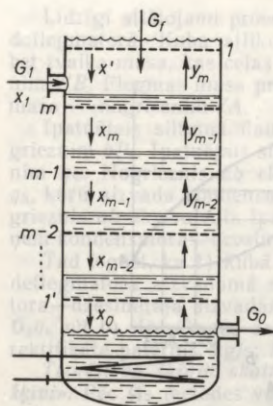
$$x_{n-1} = \frac{y_{n-1}}{\alpha_{n-1} - y_{n-1}(\alpha_{n-1} - 1)}$$

Analoģisku aprēķinu izdara šķīvim $n-2$.

Aprēķinus no šķīvjā uz šķīvi turpina, līdz sasniedz tvaika koncentrāciju y_m , kurš ceļas uz augšu no kolonnas apakšējās daļas augšējā šķīvjā m .

Analoģiski aprēķina šķīvjū skaitu kolonnas apakšējai daļai. Šķidrās fāzes koncentrācija x_m uz šķīvjā m (12.30. att.) ir

$$x_m = \frac{G_1 x_1 + G_t x'}{G_1 + G_t}$$



12.30. att. Rektifikācijas kolonnas apakšējās daļas shēma.

kur G_l, G_t — sākuma maisījuma un flegmas patēriņš, mol/s vai kg/s; x_1, x' — sākuma maisījuma un flegmas koncentrācija, moldaļās vai kg/kg. Ar x' apzīmē flegmas koncentrāciju, kura noplūst no kolonnas augšējās daļas šķīvja 1 uz kolonnas apakšējās daļas augšējo šķīvi m . Pēc kolonnas augšējās daļas aprēķina x' aprēķins ir zināms.

Ja x_m koncentrācija ir zināma, no $t-y-x$ diagrammas nosaka maisījuma viršanas temperatūru t_m (sk. 12.29. att. b). No $p-t$ diagrammas iegūst komponentu tvaika parciālos spiedienus p_A^m un p_B^m , un aprēķina relatīvo gaistāmības koeficientu

$$\alpha_m = p_A^m / p_B^m.$$

No fāžu līdzsvara vienādojuma (12.10) aprēķina no šķīvja m aizplūstošā tvaika sastāvu

$$y_m = \frac{\alpha_m x_m}{1 + (\alpha_m - 1) x_m}.$$

Šķidrās fāzes sastāvu, kura aizplūst no šķīvja $m-1$, aprēķina pēc vienādojuma (12.31)

$$x_{m-1} = \frac{R+1}{R+f} y_m + \frac{f-1}{R+f} x_0.$$

Tvaika sastāvu, kurš aizplūst uz šķīvi m , aprēķina pēc formulas

$$y_{m-1} = \frac{\alpha_{m-1} x_{m-1}}{1 + (\alpha_{m-1} - 1) x_{m-1}}.$$

Aprēķinus šādā secībā turpina no šķīvja uz šķīvi, līdz no apakšējā šķīvja 1' noplūstošais šķidrums sasniedz doto koncentrāciju x_0 .

Kolonnas diametra noteikšana. Rektifikācijas kolonnas diametrs atkarīgs no tvaika caurteces, kurš plūst kolonnā uz augšu, un no tvaika plūsmas ātruma.

Ja laika vienībā iegūtais rektifikāta patēriņš ir G_2 un flegmas skaitlis R , tad tvaika caurtece Q kolonnā aprēķināma šādi:

$$Q = \frac{G_2(R+1)22,4T}{273M} = 8,2 \cdot 10^{-2} \frac{G_2(R+1)T}{M},$$

kur Q — tvaika caurtece, m^3/s ; G_2 — rektifikāta patēriņš, kg/s; R — optimālais flegmas skaitlis; T — tvaika vidējā temperatūra, K; M — tvaika molmasa, kg/mol.

Kolonnas diametra aprēķināšanai lieto vienādojumu, kas iegūts no caurteces vienādojuma (2.12):

$$d_k = \sqrt{\frac{4Q}{\pi\omega}} = 0,3232 \sqrt{\frac{G_2(R+1)T}{M\omega}}$$

kur ω — tvaika ātrums kolonnā, m/s; kolonnās, kuras darbojas atmosfēras spiedienā, $\omega = 0,5 \dots 2$ m/s. Šķīvju kolonnām tvaika ātrumu aprēķina atkarībā no šķīvja konstrukcijas (sk. 459. lpp.).

12.7.2. Pamatizmēru noteikšana rektifikācijas kolonnām ar pildījumu

Rektifikācijas kolonnām ar pildījumu pamatzmēri ir kolonnas diametrs un pildījuma augstums. Apzīmējot kolonnai pievadāmā sākuma šķiduma patēriņu ar G_1 un koncentrāciju ar \bar{x}_1 , rektifikācijas rezultātā iegūstamā rektifikāta koncentrāciju ar \bar{x}_2 un kuba atlikuma koncentrāciju ar \bar{x}_0 , var noteikt kolonnas pamatzmērus.

Kolonnas diametra noteikšana. Tvaika patēriņš kolonnā

$$G = G_2(R+1),$$

kur G_2 — iegūtais rektifikāts, kg/s; R — optimālais flegmas skaitlis; G — tvaika patēriņš kolonnā, kg/s.

Pieņem, ka tvaikam kolonnā fiktīvais ātrums ω (ātrums kolonnā bez pildījuma) mazāks par maksimāli pieļaujamo ātrumu (robežātrumu, kurā notiek kolonnas aizrišanās): $\omega = (0,7 \dots 0,8) \omega_{\max}$.

Maksimālo ātrumu aprēķina pēc vienādojuma

$$\frac{\omega_{\max} a \rho_y \mu_x^{0,16}}{g \varepsilon^3 \rho_x} = 1,2 \exp \left[-4 \left(\frac{G_f}{G} \right)^{0,25} \left(\frac{\rho_y}{\rho_x} \right)^{0,125} \right],$$

kur μ_x — dinamiskais viskozitātes koeficients, mPa·s; g — brīvās krišanas paātrinājums, m/s²; pārējo fizikālo lielumu apzīmējumi doti pildījuma augstuma aprēķinā (sk. 443. lpp.).

Ja zināms tvaika patēriņš un tvaika plūsmas ātrums, kolonnas diametru d_k aprēķina pēc formulas

$$d_k = 1,13 \sqrt{\frac{G}{\omega \rho_y}}$$

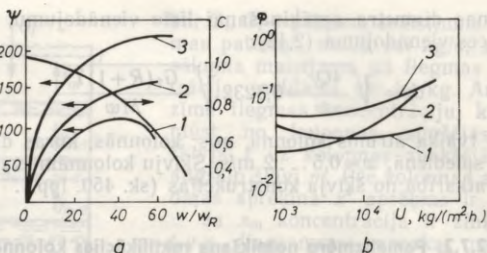
Pildījuma augstuma noteikšana. Rektifikācijas kolonnām pildījuma augstuma noteikšanai izmanto vienādojumu (10.57):

$$H = n_x h_{0x}.$$

Kopējo pārnesto vienību skaitu n_x aprēķina pēc vienādojuma (12.37).

Kopējo pārnesto vienību augstumu aprēķina pēc vienādojuma (10.59) (jāievēro, ka $G_x = G_f$, bet $G_y = G$)

$$h_{0x} = h_x + \frac{A_2 G_f}{G} h_y.$$



12.31. att. Koeficientu Φ , C un ψ noteikšanas diagrammas:
 līknes 1, 2, 3 — dažāda lieluma keramiskiem Rašiga gredzeniem.

Periodiskas darbības kolonnai G_f ir šķidrās fāzes (flegmas) patēriņš (tā vietā var ņemt flegmas skaitli R); G — tvaika fāzes patēriņš (ja G_f vietā ir R , tad G vietā jābūt $R+1$).

Nepārtrauktas darbības kolonnai G_f vietā lietojams $R+f$. $f = G_1 M_A / (G_2 M_1)$, kur M_A — rektifikāta molmasa, kas praktiski vienāda ar vieglāk gaistošā komponenta molmasu, kg/mol ; M_1 — sākuma maisījuma molmasa, kg/mol ; A_2 — sadalījuma koeficients (sk. vienādojumus (10.4) un (10.5)); G — tāds pats kā periodiskas darbības kolonnai, $R+1$; G_1 , G_2 — sākuma maisījuma un rektifikāta patēriņš, kg/s .

Atsevišķo fāžu pārejas augstumu h_x un h_y aprēķināšanai rektifikācijas kolonnām iesaka šādas formulas:

$$h_x = 0,258 \Phi C Pr_x^{0,5} Z^{0,15},$$

kur Φ un C — koeficienti, kas nosakāmi no 12.31. attēla a un b ; $Pr_x = \mu_x / (\rho_x D_x)$ — Prantla kritērijs šķidrā fāzē; μ_x — šķidrās fāzes viskozitātes koeficients, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; ρ_x — šķidrās fāzes blīvums, kg/m^3 ; D_x — šķidrās fāzes difūzijas koeficients, m^2/s ; Z — vienas pildījuma sekcijas augstums, m ; parasti līdz 3 m .

Gāzveida fāzes pārejas augstums

$$h_y = \frac{0,0175 \psi Pr_y^{0,5} d_k^{1,24} Z^{0,33}}{(U f_1 f_2 f_3)^{0,6}},$$

kur ψ — koeficients, kas nosakāms no 12.31. attēla a ; $Pr_y = \mu_y / (\rho_y D_y)$ — Prantla kritērijs tvaikam; μ_y — tvaika fāzes dinamiskais viskozitātes koeficients, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; ρ_y — tvaika fāzes blīvums, kg/m^3 ; $U = G_f / S_k$ — aprasināšanas blīvums, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; G_f — flegmas patēriņš, kg/s ; S_k — kolonnas šķērsriezuma laukums, $S_k = 0,785 d_k^2$, m^2 ; d_k — kolonnas diametrs, m ; $f_1 = \mu_x^{0,16}$, kur μ_x — šķidrās fāzes dinamiskais viskozitātes koeficients, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; $f_2 = (1000/\rho_x)^{1,25}$; $f_3 = (72,8 \cdot 10^{-3}/\sigma)^{0,8}$, kur σ — šķidrās fāzes virsmas spraigums, N/m .

Difūzijas koeficients šķidrā fāzē 20 °C temperatūrā

$$D_x = \frac{10^{-6} \sqrt{1/M_A + 1/M_B}}{\beta \sqrt{\mu_x} (V_A^{1/3} + V_B^{1/3})^2},$$

kur β — koeficients, kas atkarīgs no šķidrās fāzes, $\beta_{H_2O}=4,7$, $\beta_{CH_3OH}=2$, $\beta_{C_2H_5OH}=2$, $\beta_{CH_3COCH_3}=1,15$; M_A un M_B — komponentu A un B molmasas, kg/mol; V_A un V_B — komponentu A un B moltilpumi šķidrā stāvoklī viršanas temperatūrā, cm^3/mol .

Difūzijas koeficients procesa norises vidējā temperatūrā t ir

$$D_x^t = D_x [1 + b(t + 20)],$$

$$\text{kur } b = 0,2 \sqrt{\mu_x} / \sqrt{\rho_x}.$$

Difūzijas koeficients tvaika fāzei

$$D_y = \frac{4,22 \cdot 10^{-2} T^{3/2} \sqrt{1/M_A + 1/M_B}}{P (V_A^{1/3} + V_B^{1/3})^2},$$

kur T — vidējā temperatūra kolonnā, K, $T = t + 273$; P — absolūtais spiediens kolonnā, Pa.

Nepārtrauktas darbības kolonnai pārnesto vienību augstumi h_{0x} un h_{0y} jāaprēķina atsevišķi kolonnas augšējai un apakšējai daļai.

Kopējais pildījuma augstums

$$H_{kop} = H_{aug} + H_{ap}.$$

Ja pildījuma vienas sekcijas augstums Z , tad sekciju skaits $n_s = H_{kop}/Z$.

Kopējais rektifikācijas kolonnas augstums

$$H_k = Zn_s + (n_s - 1)h_s + Z_{aug} + Z_{ap},$$

kur h_s — atstarpes augstums starp sekcijām, m; Z_{aug} un Z_{ap} — atbilstīgi separācijas telpas augstums virs augšējā pildījuma un telpas augstums starp kolonnas dibenu un pirmās sekcijas pildījumu, m; Z_{aug} un Z_{ap} izvēlas pēc kolonnas diametra:

Kolonnas diametrs, m	Z_{aug} , m	Z_{ap} , m
0,4...1,0	0,6	1,5
1,2...2,2	1,0	2,0
2,2 un augstāk	1,4	2,5

Pildījuma slāņa augstumu H iespējams aprēķināt, izmantojot vienādojumu

$$H = h_{ekv} n_t,$$

kur n_t — koncentrācijas maiņas pakāpienu skaits (teorētiskie šķīvji); h_{ekv} — pildījuma slāņa augstums, kas ekvalents vienam koncentrācijas maiņas pakāpienam.

Rektifikācijas kolonnām (arī absorberiem ar pildījumu) pildījuma slāņa ekvivalento augstumu, ja kolonna darbojas barbotāžas režīmā, iespējams aprēķināt šādi:

$$h_{ekv} = 8,4 d_{ekv} Re_y^{0,2} e^{-0,2} \left(\frac{G}{G_f} \right)^{0,342} \left(\frac{\rho_x}{\rho_y} \right)^{0,19} \times \left(\frac{\mu_y}{\mu_x} \right)^{0,038} \frac{\lg \frac{G_f}{AG}}{(1-A) \frac{G}{G_f}}, \quad (12.38)$$

kur $d_{ekv} = \frac{4\epsilon}{a}$ — pildījuma ekvivalentais diametrs, m; a — īpatnējā virsma, m^2/m^3 ; ϵ — īpatnējais brīvais tilpums, m^3/m^3 ; G — tvaika fāzes patēriņš, kg/s (G vietā var likt $R+1$); G_f — šķidrās fāzes (flegmas) patēriņš, kg/s (G_f vietā var ņemt arī R , ja G vietā lieto $R+1$); A — līdzsvara līnijas slīpuma leņķa tangenss; ρ_y, ρ_x — tvaika un šķidrās fāzes blīvumi, kg/m^3 .

12.8. REKTIKĀCIJAS KOLONNAS SILTUMA BILANCE

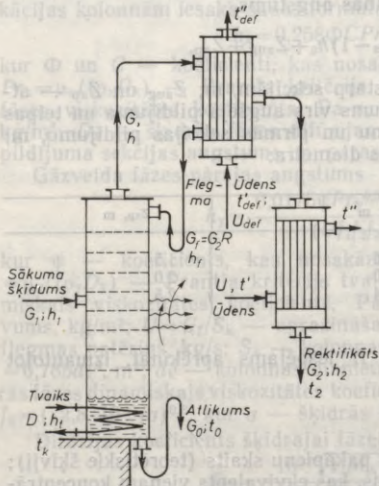
Nepārtrauktas darbības rektifikācijas iekārtas siltuma bilance, tāpat kā jebkuras iekārtas siltuma bilance, sastāv no divām daļām — iekārtā ievadītās siltuma plūsmas un no iekārtas aizvadītās siltuma plūsmas.

Siltuma bilances sastādīšanai izmanto 12.32. attēlā dotos apzīmējumus.

Kolonnā ievada šādu siltuma plūsmu: 1) ar tvaiku (vai citu siltumnesēju) $\Phi_1 = Dh_t$; 2) ar sākuma šķidrumu $\Phi_2 = G_1 h_1$; 3) ar flegmu $\Phi_3 = G_f h_f = RG_2 h_t$.

No kolonnas aizvada šādu siltuma plūsmu: 1) ar tvaiku, kas aizplūst no iekārtas, $\Phi_4 = Gh$; 2) ar kuba atlikumu $\Phi_5 = G_0 h_0$; 3) ar kondensātu $\Phi_6 = Dc_k t_k$; 4) apkārtējā vidē konvekcijas un starošanas rezultātā $\Phi_7 = \Sigma \beta (t_s - t_v) S$.

Pēc enerģijas nezūdamības likuma sistēmā ievadītajai siltumam jābūt vie-



12.32. att. Apzīmējumi siltuma bilancei.

nāda ar siltuma plūsmu, ko no sistēmas aizvada, t. i.,

$$Dh_t + G_1 h_1 + G_2 R h_t = Gh + G_0 h_0 + D c_k t_k + \Sigma \beta (t_s - t_v) S, \quad (12.39)$$

kur D — sildīšanai pievadītā tvaika patēriņš, kg/s, h_t, h_1, h_r, h_0, h — tvaika, sākuma šķīduma, flegmas, kuba atlikuma un no kolonnas augšas aizplūstošā tvaika entalpija, J/kg; G, G_0, G_1, G_2 — aizplūstošā tvaika, kuba atlikuma, sākuma šķīduma un rektifikāta patēriņš, kg/s; c_k — kondensāta īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K); β — kopējais siltumatdeves koeficients, W/(m²·K); t_s, t_v — kolonnas ārējās virsmas un apkārtējās vides temperatūra, °C; S — kolonnas ārējā virsma, m².

No siltuma bilances vienādojuma (12.39) rektifikācijai nepieciešamais tvaika patēriņš izsakāms šādi:

$$D = \frac{Gh + G_0 h_0 + \Sigma \beta (t_s - t_v) S - G_1 h_1 - G_2 R h_t}{h_t - c_k t_k}.$$

Sākuma šķīduma entalpiju h_1 aprēķina atkarībā no sastāva un temperatūras:

$$h_1 = [c_A \bar{x}_1 + c_B (1 - \bar{x}_1)] t_1,$$

kur h_1 — sākuma šķīduma entalpija, J/kg; c_A un c_B — komponentu A un B īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K); \bar{x}_1 — komponenta A masasdaļas sākuma šķīdumā; t_1 — sākuma šķīduma temperatūra, °C.

Analogi nosakāma entalpija flegmai un kuba atlikumam, izmantojot attiecīgās koncentrācijas (\bar{x}_2 vai \bar{x}_0) un temperatūras.

Sildīšanai ievadāmā tvaika entalpija h_t nosakāma atkarībā no tvaika spiediena pēc piesātināta ūdens tvaika tabulas. No kolonnas aizplūstošā tvaika entalpiju aprēķina, vadoties no tvaika sastāva un temperatūras:

$$h = r_A \bar{x}_2 + r_B (1 - \bar{x}_2) + ((c_A \bar{x}_2 + c_B (1 - \bar{x}_2)) t_2,$$

kur h — no kolonnas aizplūstošā tvaika entalpija, J/kg; r_A, r_B — komponentu A un B iztvaikošanas siltums, J/kg; \bar{x}_2 — rektifikāta sastāvs masasdaļās (pieņem, ka no kolonnas aizplūstošā tvaika sastāvs vienāds ar rektifikāta sastāvu); t_2 — rektifikāta viršanas temperatūra, °C.

Deflegmatorā iespējama pilnīga vai daļēja tvaika kondensācija.

Ja deflegmatorā tvaiku kondensē daļēji (tik, cik nepieciešams flegmas ieguvei), tad deflegmatorā atņemtā siltuma plūsma

$$\Phi_{\text{def}} = G_2 R r_2, \quad (12.40)$$

kur Φ_{def} — deflegmatorā atņemtā siltuma plūsma, W; r_2 — tvaika kondensācijas siltums, J/kg:

$$r_2 = r_A \bar{x}_2 + r_B (1 - \bar{x}_2).$$

Deflegmatorā tvaiku tikai kondensē, bet kondensātu neatdzesē. Siltuma plūsmu Φ_{def} uzņem deflegmatoram caurplūstošais šķidrums, tādēļ var rakstīt, ka

$$\Phi_{\text{def}} = U_{\text{def}} c_s (t''_{\text{def}} - t'_{\text{def}}), \quad (12.41)$$

kur c_s — šķidruma īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K); U_{def} — laika vienībā deflegmatoram caurplūstošais šķidrums, kg/s; t'_{def} , t''_{def} — deflegmatorā ieplūstošā un no deflegmatora izplūstošā šķidruma temperatūra, °C.

No vienādojuma (12.40) un (12.41) iegūst, ka

$$U_{\text{def}} c_s (t''_{\text{def}} - t'_{\text{def}}) = G_2 R r_2 \quad \text{vai}$$

$$U_{\text{def}} = \frac{G_2 R r_2}{c_s (t''_{\text{def}} - t'_{\text{def}})}.$$

Deflegmatorā tvaiku kondensējot pilnīgi, tā siltuma plūsma

$$\Phi'_{\text{def}} = G_2 (R + 1) r_2.$$

Kondensatorā—dzesinātājā atņemtā siltuma plūsma summējas no kondensācijas siltuma Φ_k un rektifikāta dzesēšanas siltuma Φ_{dz} , t. i.,

$$\Phi_{k-d} = \Phi_k + \Phi_{dz}, \quad \Phi_k = G_2 r_2 \quad \text{un} \quad (12.42)$$

$$\Phi_{dz} = G_2 c_2 (t_2 - t_r),$$

kur c_2 — rektifikāta īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K); t_r — rektifikāta beigu temperatūra, °C.

Vienādojumu (12.42) var pārrakstīt šādi:

$$\Phi_{k-d} = G_2 (r_2 + c_2 (t_2 - t_r)). \quad (12.43)$$

Kondensatorā—dzesinātājā izdalīto siltuma plūsmu uzņem dzešinātājā plūstošais šķidrums U , tādēļ var rakstīt, ka

$$Q_{k-d} = U c_s (t'' - t'), \quad (12.44)$$

kur U — dzesējošā šķidruma patēriņš, kg/s; t' , t'' — kondensatorā—dzesinātājā ieplūstošā un no tā izplūstošā šķidruma temperatūra, °C.

No vienādojumiem (12.43) un (12.44) iegūst, ka

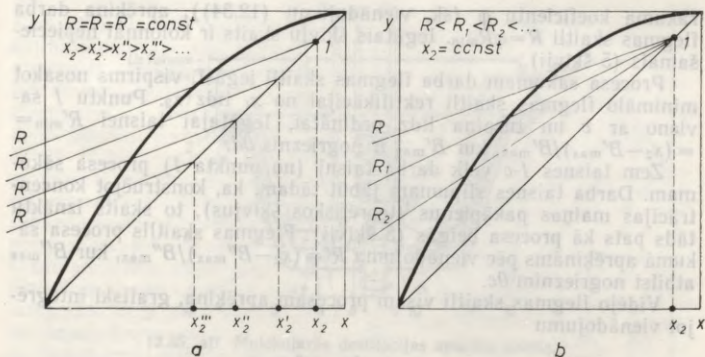
$$U c_s (t'' - t') = G_2 (r_2 + c_2 (t_2 - t_r))$$

vai dzesējošā šķidruma patēriņš

$$U = \frac{G_2 (r_2 + c_2 (t_2 - t_r))}{c_s (t'' - t')}.$$

12.9. BINĀRO MAISIJUMU PERIODISKĀ REKTIKĀCIJA

Periodiskas darbības rektifikācijas iekārtas īpatnība ir tā, ka nepārtraukti mainās kuba sastāvs — samazinās vieglāk gaistošā komponenta koncentrācija.



12.33. att. Periodiskās rektifikācijas darba taisnes.

Kolonnai darbojoties ar nemainīgu flegmas skaitli ($R = \text{const}$), samazinās vieglāk gaistošā komponenta saturs rektifikātā.

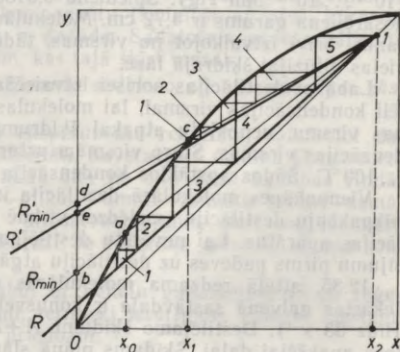
Līdzsvara diagrammā šāda koncentrāciju maiņa attēlojama ar darba taisnēm, kas līdz ar vieglāk gaistošā komponenta koncentrācijas samazināšanos kubā pārvietojas pa diagonāli uz leju (12.33. att. a), saglabājot vienu un to pašu slīpumu.

Darba taisnes vienādojumā (12.25) $A = \text{tg } \alpha = R/(R+1) = \text{const}$ paliek nemainīgs, mainās x_2, x_2', x_2'', x_2''' utt.

Ja rektifikāciju realizē ar $x_2 = \text{const}$, tad, kubā, samazinoties vieglāk gaistošajam komponentam, jāpalielina kolonnai pievadāmās flegmas patēriņš vai arī jāsamazina iegūstamais rektifikāts G_2 . Šādas rektifikācijas līdzsvara diagramma redzama 12.33. attēlā b.

Periodiskās rektifikācijas gadījumā, ja no sākuma maisījuma ar gaistošā komponenta saturu x_1 jāiegūst rektifikāts ar sastāvu x_2 un kuba atlikums ir x_0 , tad vispirms aprēķina $R_{\min} = (x_2 - B_{\max})/B_{\max}$ rektificēšanas beigu posmam, kad koncentrācija kolonnā mainās no x_0 līdz x_2 (12.34. att.). Caur punktiem 1 un a velkot taisni un turpinot to līdz ordinātai, iegūst B_{\max} (nogrīznis Ob).

Pieņemot flegmas pā-



12.34. att. Periodiskās rektifikācijas flegmas skaitļa noteikšana.

rākuma koeficientu φ (sk. vienādojumu (12.34)), aprēķina darba flegmas skaitli $R = \varphi R_{\min}$. Iegūtais šķīvju skaits ir kolonnai nepieciešamais (5 šķīvji).

Procesa sākumam darba flegmas skaitli iegūst, vispirms nosakot minimālo flegmas skaitli rektifikācijai no x_1 līdz x_2 . Punktu I savieno ar c un turpina līdz ordinātai. Iegūtajai taisnei $R'_{\min} = (x_2 - B'_{\max})/B'_{\max}$, kur B'_{\max} ir nogrieznis $0d$.

Zem taisnes $I-c$ velk darba taisni (no punkta I) procesa sākumam. Darba taisnes slīpumam jābūt tādā, ka, konstruējot koncentrācijas maiņas pakāpienus (teorētiskos šķīvjus), to skaits iznāktu tāds pats kā procesa beigās (5 šķīvji). Flegmas skaitlis procesa sākumā aprēķināms pēc vienādojuma $R' = (x_2 - B''_{\max})/B''_{\max}$, kur B''_{\max} atbilst nogrieznim $0e$.

Vidējo flegmas skaitli visam procesam aprēķina, grafiski integrējot vienādojumu

$$R_{\text{vid}} = \frac{1}{x_1 - x_0} \int_{x_0}^{x_1} R dx.$$

Integrāli risina grafiski pēc vienādojuma (12.16) parauga.

12.10. SPECIĀLĀS PĀRTVAICES METODES

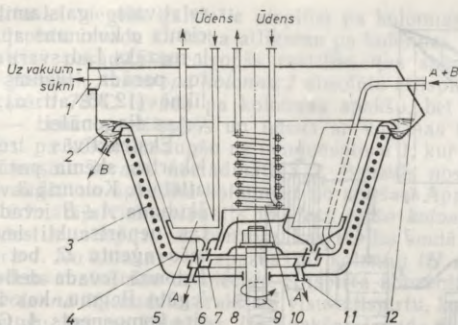
Pie speciālajām pārtvaices metodēm pieder *molekulārā destilācija, ekstraktīvā rektifikācija, azeotropā rektifikācija un rektifikācija neorganisko sāļu klātbūtnē*.

Molekulārā destilācija. Ja molekulu brīvā noskrējiena garums lielāks par attālumu starp iztvaicēšanas un kondensācijas virsmām, tad šādu destilāciju sauc par *molekulāro destilāciju*. Šāda stāvokļa sasniegšanai iekārtā uztur absolūto spiedienu 1,33...0,0133 Pa (10^{-2} ... 10^{-4} mm Hg). Spiedienā 0,0133 Pa molekulu vidējā brīvā noskrējiena garums ir 4,72 cm. Molekulārā destilācija notiek bez viršanas, brīvi iztvaikojot no virsmas, tādēļ liela nozīme ir gaistošās vielas difūzijai šķidrāajā fāzē.

Labākai destilācijas norisei iztvaicēšanas virsma jānovieto paralēli kondensācijas virsmai, lai molekulas, kas atstājušas iztvaicēšanas virsmu, nenokļūtu atpakaļ šķīdumā, bet kondensētos uz kondensācijas virsmas. Starp virsmām uztur temperatūru starpību 50...100 °C. Šādos apstākļos kondensācija notiek momentāni.

Vienpakāpes molekulārā destilācija ir neefektīva, tādēļ lieto vairākpakāpju destilāciju, saslēdzot virknē vairākus molekulārās destilācijas aparātus. Lai novērstu destilējamā šķidruma putošanu, maisījumu pirms padeves uz destilāciju atgāzē.

12.35. attēlā redzama molekulārās destilācijas aparāta shēma. Iekārtas galvenā sastāvdaļa ir konusveida rotors 4. Vārpsta 9 rotē (līdz 33 s⁻¹). Destilējamo šķīdumu $A+B$ pa cauruli 12 pievada rotora apakšējai daļai. Šķīdums plānā slānī pārvietojas pa rotora virsmu uz augšu, un komponents B nokļūst kolektorā 2. Plūstošais šķīdums iztvaiko, jo rotoru silda ar elektrisko sildītāju 3, kas novietots



12.35. att. Molekulārās destilācijas aparāta shēma.

gar rotora sānsienām. Tvaiks nokļūst uz plāksņu kondensatora 5. Tā tvaika daļa, kas izplūst cauri pirmajam kondensatoram, tālāk nokļūst uz otrā kondensatora 10. Kondensāts saplūst uztvērējos 6 un 8 un tālāk pa caurumiem rotora dibenā nokļūst kolektorā 7, no kurienes pa caurulēm 11 izplūst no iekārtas. Cauruli 1 pievieno vakuumiekārtai.

Ekstraktīvā rektifikācija. Iespēju sadalīt šķidumu, to rektificējot, raksturo relatīvais gaistamības koeficients $\alpha = p_A/p_B$ (sk. 478. lpp.). Jo α lielāks, jo vieglāk šķidumu sadalīt. Ja sadalāmo komponentu viršanas temperatūras ir tuvas, tad α maz atšķiras no viena (līdzsvara likne tuvu diagonālei), un šādu šķidumu grūti sadalīt.

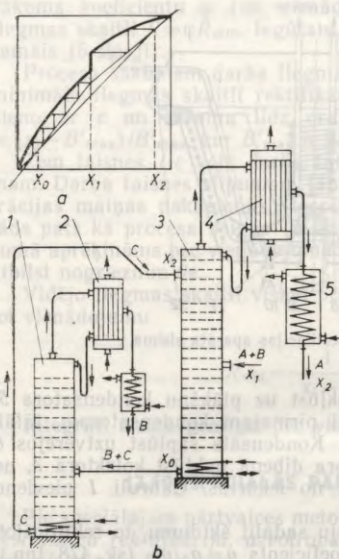
Relatīvo gaistamības koeficientu iespējams paaugstināt, izmainot spiedienu rektifikācijas kolonnā. Dažiem šķidumiem α paaugstināms, pievienojot šķidumam tādu komponentu (sadalošo aģentu), kurā sadalāmo komponentu šķīdība ir dažāda. Sadalošais aģents palielina gaistamību tam komponentam, kas tajā šķīst mazāk.

Tādu rektifikāciju, kurā izmanto sadalošo aģentu, sauc par *ekstraktīvo rektifikāciju*.

Sadalošo aģentu izvēlas eksperimentu rezultātā, salīdzinot dažādu šķidrumu darbības efektivitāti. Savstarpējā šķīdība šķidrumiem samazinās, ja tie atrodas tālāk cits no cita šādā šķīdības rindā: ūdens—zemākās taukskābes—glikoli—amīdi—zemākie ketoni—zemākie aldehīdi—ogļūdeņraži—nitroatvasinājumi—ēteri—ogļūdeņraži—halogēnatvasinājumi—ogļūdeņraži. Jo augstāka sadalošā aģenta koncentrācija, jo lielāks α .

Sadalošajam aģentam jābūt ar nelielu gaistamību, viegli reģenerējamam, pieejamam, lētam, termiski izturīgam, ķīmiski inertam, tam jāatbilst darba drošības prasībām.

Kolonnas apakšējā daļā sadalošā aģenta koncentrācija ir mazāka nekā augšējā daļā (sākuma maisījuma ievadīšanas dēļ). Tādēļ



12.36. att. Ekstraktīvās rektifikācijas shēma.

relatīvais gaistamības koeficients α kolonnas apakšējā daļā ir mazāks. Līdzsvara diagrammā to parāda lūzums līdzsvara liknē (12.36. att. *a*), un tā tuvojas diagonālei.

Ekstraktīvās rektifikācijas iekārtas shēma parādīta 12.36. attēlā *b*. Kolonnā 3 virs sākuma šķīduma $A+B$ ievadišanas vietas nepārtraukti ievada sadalošo aģentu C , bet no augšas kolonnā ievada deflegmatorā 4 iegūto flegmu, kas ir praktiski tīrs komponents A . Grūtāk gais-tošais komponents B kopā ar sadalošo aģentu C no kolonnas apakšas (tas raksturīgs ekstraktīvajai rektifikācijai) aizplūst uz reģenerācijas kolonnu 1. Sajā kolonnā kā kuba atlikumu iegūst komponentu C , kuru aizvada atpakaļ uz rektifikācijas kolonnu 3, bet iegūtais rektifikāts ir praktiski tīrs komponents B .

Azeotropā rektifikācija. Daudzi binārie šķīdumi veido azeotropos maisījumus (sk. 12.2. un 12.3. att.). Šādu maisījumu sadalīšanai var lietot divas metodes: 1) rektifikācija vakuumā, kurā uz līdzsvara liknes pārbīdās vai pilnīgi izzūd azeotropais punkts, vai 2) azeotropam maisījumam pievieno sadalošo aģentu (trešo komponentu C), kas veido ar vienu vai abiem maisījuma komponentiem jaunu azeotropo maisījumu, un rektificē atmosfēras spiedienā. Pirmajai metodei sakarā ar to, ka rektifikācija notiek vakuumā, nepieciešami zemas temperatūras dzesējošie maisījumi; tas ekonomiskā ziņā nav izdevīgi. Rūpniecībā azeotropo maisījumu sadalīšanai lieto otro metodi.

Sadalošo aģentu izvēlas mēģinājumu rezultātā. Sadalošais aģents azeotropā rektifikācijā ir ar lielāku gaistamību, tādēļ tas pāriet tvaika fāzē un no kolonnas to aizvada pa augšu (atšķirībā no ekstraktīvās rektifikācijas).

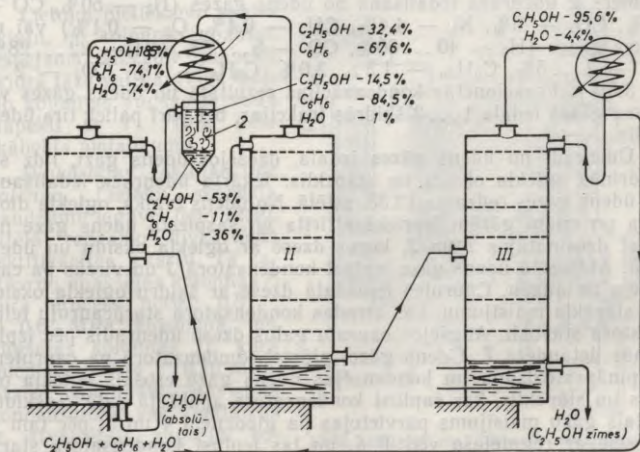
Kā azeotropās rektifikācijas piemēru aplūkosim absolūtā etilspirta iegūšanu. Etilspirts ar ūdeni veido azeotropo šķīdumu, kura viršanas temperatūra 78°C . Azeotropo šķīdumu ar zemāku viršanas temperatūru (65°C) veido ūdens, benzols un etilspirts. Etilspirta un ūdens azeotropo šķīdumu sadala azeotropajā rektifikācijā, pievienojot šķīdumam benzolu. Tādos apstākļos viss ūdens ar benzolu un

daļa etilspirta kā vieglāk gaistošie aizplūst pa kolonnas augšu, bet absolūto etilspirtu izvada kā kuba atlikumu pa kolonnas apakšu.

12.37. attēlā parādīta azeotropās rektifikācijas shēma absolūta etilspirta iegūšanai. *Azeotropā kolonna I* absolūto etilspirtu ar viršanas temperatūru 78°C izvada pa kolonnas apakšu, bet azeotropais maisījums — benzols, etilspirts un ūdens ar viršanas temperatūru 65°C aizplūst pa kolonnas augšu uz kondensatoru *I*, kur tvaiku kondensē. Kondensātu ievada nostādinātājā *2*. Benzols noslāņojas nostādinātāja augšā un aprasina kolonnu *I* no augšas. Apakšējais slānis no nostādinātāja tiek aizvadīts uz *destilējošo kolonnu II*. Šajā kolonnā nodestilē etilspirtu un benzolu, kas tvaika veidā aizplūst uz kondensatoru *I*. No kolonnas *II* apakšas uz kolonnu *III* aizvada etilspirtu un ūdens maisījumu ar niecīgu etilspirta koncentrāciju. *Koncentrējošā kolonnā III* nodala praktiski visu etilspirtu, ko aizvada pa kolonnas augšu, bet no kolonnas *III* apakšas izvada ūdeni ar etilspirta zīmēm.

Salīdzinot ekstraktīvo rektifikāciju ar azeotropo, jāatceras, ka ekstraktīvajā rektifikācijā temperatūra kolonnā ir augstāka nekā azeotropajā rektifikācijā. Siltuma patēriņš ir lielāks azeotropajā rektifikācijā, jo jāiztvaicē arī sadalošais aģents. Ekstraktīvajai rektifikācijai vieglāk izvēlēties sadalošo aģentu.

Rektifikācija neorganisko sāļu klātbūtnē. Šķidrumu šķīdumos komponentu tvaika parciālā spiediena izmaiņu vai arī azeotropā punkta pārbīdīšanu vai pilnīgu izzušanu var panākt, šķīdumā izšķīdinot neorganiskos sāļus. Tvaika parciālais spiediens samazinās tam komponentam, kurā sāls labāk šķīst. Piemēram, spirta, neorganisko skābju, organisko skābju un citu vielu ūdens šķīdumiem pievienojot



12.37. att. Azeotropās rektifikācijas shēma.

neorganiskos sāļus, pazeminās ūdens tvaika parciālais spiediens (viršanas temperatūra paaugstinās).

Tehnoloģiski izdevīgāk lietot tādus neorganiskos sāļus, kas labāk šķīst komponentā, kuram ir augstāka viršanas temperatūra. Piemēram, rektificējot maisījumu etilspirts—ūdens, uz rektifikācijas kolonnas šķīvjējiem panākot 2% CaCl_2 šķīduma koncentrāciju, var iegūt rektifikātu ar 99,97% etilspirta saturu. Šādi rektifikācijai lieto parastās kolonnas, kuras apgādātas ar sāls šķīdināšanas iekārtu. Sāli šķīdina flegmā vai sākuma maisījumā. Pēc tam sāli reģenerē, ietvai-
cējot kuba atlikumu.

12.11. GĀZU MAISIJUMU SADALIŠANA, LIETOJOT DZIĻO DZESĒŠANU

Tehnikā gāzu maisījumus sašķidrina, lai tos sadalītu atsevišķos komponentos, kā arī gāzu uzglabāšanai. Uzglabāšana šķidrā stāvoklī izmaksā lētāk nekā gāzu uzglabāšana gāzes krātuvēs — gāzveida fāzē.

Sadalot gāzu maisījumus, iespējami divi gadījumi: 1) vienu komponentu vai tā daļu kondensē, bet pārējā gāzu maisījuma daļa paliek gāzveida fāzē. Šo sadalīšanas veidu sauc par *frakcionēto kondensāciju*; 2) sašķidrina visu gāzu maisījumu un iegūto šķīdumu rektificē. Neatkarīgi no sadalīšanas veida gāzu maisījumus pakļauj dziļai dzesēšanai. Dziļo dzesēšanu realizē, lietojot aukstuma mašīnas.

Frakcionētā kondensācija. Raksturīgs frakcionētās kondensācijas piemērs ir ūdeņraža izdališana no ūdens gāzes (H_2 — 50%, CO — 40%, CO_2 — 5%, N_2 — 4,4%, CH_4 — 0,4%, O_2 — 0,1%) vai no koksa gāzes (H_2 — 40...60%, CO — 5...7%, CH_4 — 22...28%, N_2 — 2...5%, C_nH_{2n} — 1,3...3,0%, C_2H_6 — 1%, CO_2 — 2...3,5%). Frakcionētās kondensācijas rezultātā no ūdens gāzes vai koksa gāzes izdala 1...3 šķidrās frakcijas, bet pāri paliek tīrs ūdeņradis.

Ūdeņradi no ūdens gāzes izdala, dzesējot ūdens gāzi, līdz sašķidrinās oglekļa oksīds un slāpeklis. Iekārta ūdeņraža izdališanai no ūdens gāzes redzama 12.38. attēlā. No ūdens tvaika, oglekļa dioksīda un citām gāzēm iepriekš attīrīta un saspiesta ūdens gāze nokļūst dzesinātajos 1 un 2, kurus dzesē ar oglekļa oksīdu un ūdeņradi. Atdzesētā ūdens gāze ieplūst kondensatorā 3 un virzās pa caurulēm uz augšu. Caurules lejasdaļā dzesē ar šķidru oglekļa oksīda un slāpekļa maisījumu, kas atrodas kondensatora starpcauruļu telpā virstošā stāvoklī. Augšējos cauruļu galus dzesē ūdeņradis pēc izplešanās detanderā 7. Ūdens gāzei plūstot kondensatorā pa caurulēm, turpinās atdzišana un kondensējas ūdens gāzē esošais oglekļa oksīds un slāpeklis, kas saplūst kondensatora apakšējā daļā. Sašķidrinātais gāzu maisījums pārvietojas pa glodenēm 4 un 5, pēc tam to droselē ar regulējošo ventili 6, un tas ieplūst kondensatora starpcauruļu telpā (apakšējā).

Sašķidrīnātā gāze, iztvaikojot starpcauruļū telpā, dzesē pa cauruļēm plūstošo ūdens gāzi tā, ka nesašķidrīnāts paliek tikai ūdeņradis, kuru aizvada uz detanderu. Ūdeņradim detanderā izplešoties, pazeminās tā temperatūra un to ievada kondensatora augšējā starpcauruļū telpā kā aukstumnesēju. No kondensatora ūdeņradi aizvada uz dzesinātāja 2 starpcauruļū telpu, no kurienes kā tīru ūdeņradi to aizvada uz ražošanu. Oglekļa oksīds no kondensatora apakšējās starpcauruļū telpas aizplūst kā aukstumnesējs uz dzesinātāju 1.

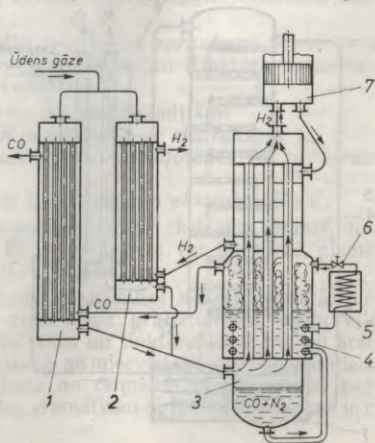
Rektifikācija. Gaisa sadalīšana skābeklī un slāpekli realizējama, rektificējot sašķidrīnātu gaisu. Nelielam ražīgumam ($5 \dots 15 \text{ m}^3/\text{h}$ skābekļa) lieto kolonnas ar vienkārtēju rektifikāciju. Lielam ražīgumam un tīru produktu iegūšanai piemērotas kolonnas ar divkārtēju rektifikāciju. Šo iekārtu izveidojuma un aprēķinu pamatā ir šajā nodaļā aprakstītā metodika.

Šķidrslāpekļi un skābekļi pilnīgi šķīst viens otrā un veido šķīdumus, kuriem nav noteiktas viršanas temperatūras (neveido azeotropus šķīdumus).

Vienkārtējas rektifikācijas kolonna. 12.39. attēlā redzama vienkārtējas rektifikācijas kolonnas shēma. Kolonnas apakšā atrodas kubs — iztvaicētājs 1, kas piepildīts ar šķidru skābekli. Iztvaicētāju apsilda ar glodeni 2, caur kuru plūst saspīests un dzesinātājā 6 iepriekš atdzesēts gaiss. Gaiss glodenē kondensējas. Virs iztvaicētāja novietota kolonna 4 ar šķīvjiem 5. Lieto arī kolonnas ar pildījumu. Glodenē sašķidrīnāto gaisu droselē ar ventili 3 un ievada kolonnā no augšas. Daļa gaisa iztvaiko, bet daļa plūst kolonnā uz leju un bagātinās ar skābekli. Tvaiks, kas pārvietojas kolonnā uz augšu, kļūst bagātāks ar slāpekli.

Lietojot pietiekamu skaitu šķīvju, no kolonnas apakšas iespējams aizvadīt skābekli šķidrā fāzē vai gāzveida fāzē. No kolonnas augšas aizvada slāpekli ar $7 \dots 10\%$ lielu skābekļa piejaukumu.

Divkārtējas rektifikācijas kolonna. Lielāku skābekļa daudzumu ieguvei lieto 12.40. attēlā redzamo divkārtējas rektifikācijas iekārtu. Tā sastāv no apakšējās kolonnas I, kurā process notiek $0,5 \dots 0,6 \text{ MPa}$ spiedienā, un augšējās kolonnas II, kurā spiediens ir $0,14 \dots 0,16 \text{ MPa}$. Starp kolonnām novietots kondensators, kas vienlaikus ir iztvaicētājs augšējai kolonnai.

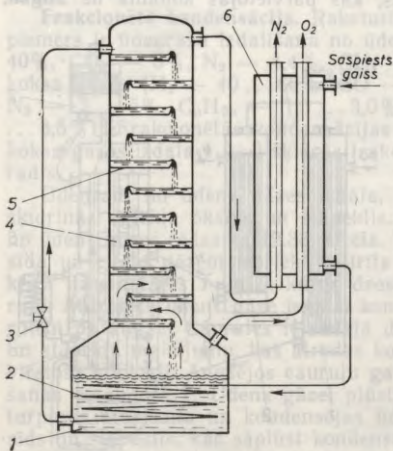


12.38. att. Iekārta ūdeņraža izdalīšanai no ūdens gāzes.

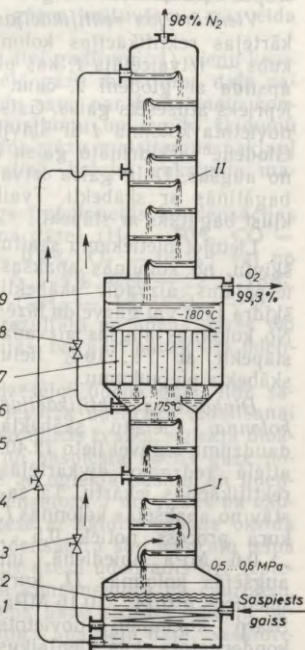
Augstspiediena gaisu ievada glodenē 1. Tas atdziestot iztvaicē iztvaicētājā 2 esošo šķidrumu, kurā ir 36...45% skābekļa. Atdzesēto gaisu droselē līdz 0,5 MPa spiedienam ar ventili 3 un ievada apakšējās kolonnas vidū. Gaisa, plūzdams kolonnā uz augšu, saskaras ar flegmu, kuru pievada no kondensatora 7. Apakšējās kolonnas augšgalā sakrājas slāpekļis (94...96%) un kondensējas kondensatorā. Uz slāpekļa kondensācijas rēķina augšējās kolonnas iztvaicētājā 9 iztvaiko šķidrās skābeklis (temperatūru starpība starp kondensējošos slāpekli un virstošo skābekli ir 3...5°C).

No kondensatora šķidrās slāpekļi plūst uz leju. Aptuveni pusi no tā daudzuma izmanto apakšējās kolonnas aprasināšanai, bet pārējais ieplūst slāpekļa kondensāta uztvērējā 5. No uztvērēja šķidro slāpekli pa cauruļvadu 6 aizvada uz augšējās kolonnas augšgalu kā flegmu, iepriekš droselējot ar ventili 8. Šķidrumu, kas bagātināts ar skābekli, no apakšējā iztvaicētāja pēc droselēšanas ar ventili 4 aizvada uz augšējās kolonnas vidusdaļu.

Tiru gāzveida skābekli ar koncentrāciju 99,3% aizvada no augšējā iztvaicētāja, bet slāpekli ar koncentrāciju 98% — no augšējās kolonnas augšas.



12.39. att. Vienkāršas rektifikācijas kolonnas shēma.



12.40. att. Divkāršas rektifikācijas kolonnas shēma.

13. EKSTRAKCIJA

13.1. PROCESA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS UN LIETOŠANA

Viena vai vairāku komponentu izdalīšanu no vielu maisījumiem, lietojot *selektīvu šķīdinātāju*¹ (*ekstrahentu*), sauc par *ekstrakciju*.

Ekstrakcijas procesus iedala 1) *šķīdumu ekstrakcijā* (divfāžu sistēma: šķīdums—šķīdums) un 2) *cieta vielu ekstrakcijā* (divfāžu sistēma: cieta viela—šķīdums).

Ekstrakcijas procesa pamatā ir šķīdumā esošo vielu dažāda šķīdība ekstrahētā. Tas realizējams, ja vielu šķīdums atrodas ciešā kontaktā ar šķīdinātāju. Ekstrahējot šķīdumus, ekstrahents nedrīkst šķīst ekstrahējamā šķīdumā. Tas nepieciešams, lai pēc ekstrakcijas ar vienkāršiem paņēmieniem (nostādināšanu vai centrifugēšanu) varētu sadalīt iegūto sistēmu. Šķīdumu ekstrakcijas rezultātā iegūst *rafinādi* (sākuma šķīdums bez ekstrahētā komponenta) un *ekstraktu*.

Par *ekstraktu* sauc ekstrakcijas procesā iegūto izvilkmu, ja šķīdinātājs ir ūdens. Ja ekstrakcijā par šķīdinātāju izmanto spirtu, iegūto izvilkmu sauc par *tinktūru*. Ekstrahējot augu eļļas no sēklām ar dažādiem organiskiem šķīdinātājiem, iegūto izvilkmu sauc par *miscellu*.

Ekstrahējot cietas vielas, atlikumā paliek *spraukumi* (cietā viela bez ekstrahētā komponenta) un iegūst ekstraktu (tinktūru, miscellu), t. i., šķīdinātāju ar ekstrahēto komponentu.

Ekstrakcijas process sastāv no vairākām stadijām:

- 1) *sākuma maisījuma A+B sajaukšana ar ekstrahentu C;*
- 2) *iegūtā ekstrakta B+C atdalīšana no rafinādes vai no spraukumiem A;*
- 3) *ekstrahētā komponenta B atdalīšana no ekstrakta B+C.*

Ekstrahēto vielu, ja tas nepieciešams, no ekstrakta atdala destilējot, kristalizējot vai citādi. Ekstrahētā viela var būt cieta, piemēram, cukurs, vai šķīdīga, piemēram, augu eļļas.

Ekstrakcijas process ir daudzu rūpniecības nozaru pamatā, piemēram, cukura iegūšana no cukurbiešu grauzījumiem, augu eļļu iegūšana no sēklām, dažādu ekstraktu un tinktūru iegūšana no ārstniecības augiem, miecvielu iegūšana no miecvielas saturošiem augiem, kolofonija un terpentīna iegūšana no celmiem, kā arī naftas pārstrādes rūpniecībā, dīzeļdegvielu, aromātisko ogļūdeņražu ieguvē u. c.

¹ Par selektīvu šķīdinātāju sauc tādu šķīdinātāju, kas šķīdina noteiktu maisījuma komponentu.

Ķīmiskajā rūpniecībā šķīdumu ekstrakciju plaši lieto, piemēram, penicilīna un citu antibiotiku izdalīšanā no tīrkultūras šķīdumiem; vitamīnu, hormonu un dažādu bioķīmisko produktu izdalīšanā; fenola iegūšanā no notekūdeņiem; sintētiskā kaučuka rūpniecībā divinila atdalīšanā no acetaldehīda un citiem piemaisījumiem u. c.

Ekstrakcija no neorganisko vielu šķīdumiem ļoti plaši attīstījās sakarā ar atomenerģijas izmantošanu. Piemēram, urāna ieguvē urānilnitrātu ekstrahē no ūdens šķīdumiem ar polāriem šķīdinātājiem; cirkoniju izdala, ekstrahējot cirkonija hafnija nitrāta šķīdumu. Šķīdumu ekstrakcijai liela nozīme arī izotopu atdalīšanā.

Ekstrakcija ir masas apmaiņas process. *Ekstrahējamā viela pārvietojas no fāzes ar augstāku koncentrāciju uz fāzi ar zemāku koncentrāciju*, t. i., *no vielu maisījuma uz šķīdinātāju*. Ekstrakcijas procesa virzošais spēks ir saskarē esošo fāžu koncentrāciju starpība attiecībā uz ekstrahējamo komponentu. Ekstrakcijas procesu teorija pamatojas uz likumiem, kas aplūko šķīšanas un difūzijas parādības, kā arī starpiāžu līdzsvaru.

Ekstrakcija bieži vien ir ekonomiskā ziņā izdevīgāka par destilāciju (it īpaši tad, ja izdalāmās vielas koncentrācija ir niecīga). Ar to arī izskaidrojama ekstrakcijas procesu arvien plašāka ieviešana ķīmijas tehnoloģijā.

13.2. ŠĶĪDUMU EKSTRAKCIJA

Šķīdumu ekstrakcijas un cieto vielu ekstrakcijas procesu aprēķini ir atšķirīgi. Šajā nodaļā aplūkota tikai šķīdumu ekstrakcija. Cieto vielu ekstrakcijai veltīta 17. nodaļa.

Ekstrakcijas teorētiskie pamati. Ekstrakciju no šķīdumiem rūpniecībā plaši izmanto tieši pēdējos gadu desmitos.

Ekstrakciju sistēmā šķidrums—šķidrums lieto atsevišķu komponentu (vienu vai vairāku) iegūšanai no šķīdumiem, kur tie var būt izšķīdušā vai neizšķīdušā (disperģētā) veidā; grūti sadalāmu vai vispār pārtvaices gaitā nesadalāmu maisījumu (komponentiem ļoti tuvas viršanas temperatūras, tie termiski neizturīgi, veido azeotropu maisījumu u. tml.) sadalīšanai.

Šķīdinātāja izvēle. Vielu $A + B$ šķīdumam pievienojot šķīdinātāju C , kas ar komponentu A nesajaucas un neveido šķīdumu, komponents B difūzijas rezultātā pārvietojas uz šķīdinātāju. Process nenoris līdz galam, jo komponenta B pāreja šķīdinātājā turpinās, līdz iestājas attiecīgajai temperatūrai atbilstošs līdzsvars starp vielas B koncentrāciju rafinādē C_R un ekstraktā C_E .

Pēc fāžu līdzsvara likuma attiecība starp fāzēs sadalītās vielas koncentrācijām līdzsvara stāvoklī noteiktā temperatūrā ir konstanta, t. i.,

$$\frac{C_{EB}}{C_{RB}} = k_B = \text{const},$$

kur k_B — *sadalījuma koeficients*, kas atkarīgs no komponenta B koncentrācijas un no temperatūras.

Sadalījuma koeficients attiecībā uz vielu A izsakāms tāpat, ņemot par pamatu komponenta A koncentrāciju rafinādē C_{RA} un ekstraktā C_{EA} :

$$\frac{C_{EA}}{C_{RA}} = k_A.$$

Vielu A un B koncentrācijas izsakāmas tādās vienībās (masas, tilpuma vienībās, molos utt.), kādās izdara pārējos aprēķinus.

Šķīdinātāja (ekstrahenta) selektivitāti raksturo attiecība starp sadalījuma koeficientiem. Šķīdinātājs ar augstu selektivitāti šķīdina praktiski visu komponentu B , un rafinādē paliek ļoti niecīga komponenta B daļa. Komponentu A tāds šķīdinātājs šķīdina ļoti maz.

Šķīdinātāja selektivitātes koeficients

$$\beta = k_B/k_A.$$

Ja $\beta = 1$, tad ekstrakcija nenotiek. Jo lielāka starpība $\beta - 1$, jo efektīvāk notiek ekstrakcija. Vienlaikus ar lielu β vērtību ekstrahentam jābūt ar lielu komponenta B šķīdināšanas spēju. Citādi ekstrakcija var izrādīties ekonomiskā ziņā neizdevīga to lielo izdevumu dēļ, kuri saistīti ar ekstrahenta cirkulācijas nodrošināšanu un reģenerāciju.

Izvēloties šķīdinātāju, jāatceras, ka šķīdumi ar atšķirīgu polaritāti slikti šķīst cits citā. Šķīdinātāja blīvumam jāatšķiras no sākuma maisījuma blīvuma, jo tad ekstrakta un rafinādes blīvumi atšķirsies un būs vieglāka ekstrakcijas produktu sadalīšana. Sadalīšanu ietekmē arī virsmas spraigums starp heterogēnām fāzēm. Ja ir mazs virsmas spraigums, veidojas stabila emulsijas. Šķīdinātājam jābūt ar mazu šķīdību rafinādē, jo tad pēc ekstrakcijas nav jāorganizē papildu operācijas.

Lai samazinātu ekstrakcijas iekārtu izmērus un taupītu siltuma enerģiju, šķīdinātājam jābūt ar augstu masas pārejas koeficientu, ar zemu ipatnējo siltumietilpību un iztvaikošanas siltumu, bet šķīdinātāja un ekstrahētā komponenta viršanas temperatūru starpībai jābūt iespējami lielākai. Lai taupītu pārsūkņēšanai un maisīšanai nepieciešamo enerģiju, kā arī veicinātu siltuma apmaiņas un masas apmaiņas procesus, ekstrahentam vēlams maza viskozitāte.

Šķīdinātājam jābūt ugunsdrošam, cilvēku veselībai nekaitīgam, tas nedrīkst izraisīt iekārtas koroziju, kā arī tam jābūt viegli iegūstamam un lētam.

Ķīmiska reakcija starp ekstrahentu un komponentiem sākuma maisījumā veicina sadalījuma koeficienta palielināšanos un ir pieļaujama, ja tajā nerodas nevēlami savienojumi, netiek apgrūtināta ekstrahenta reģenerācija un nav ievērojamu ekstrahenta zudumu.

Praksē biežāk lietojamie šķīdinātāji ir ūdens, etilspirts, acetons, benzīns, tetrahlorogleklis un dihloretāns, kuri gan pilnībā neatbilst visām uzstādītajām prasībām, bet to lietošanu nosaka šķīdinātāju augstā selektivitāte, pieejamība un lētums.

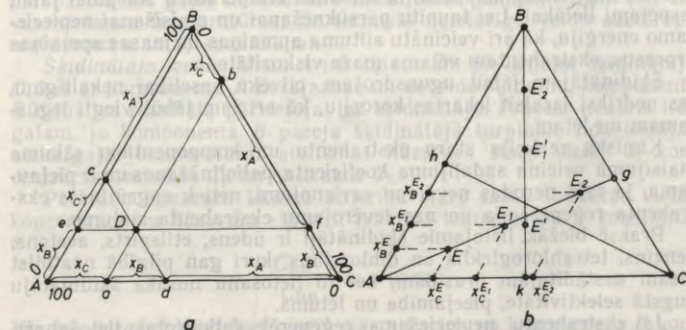
Ja ekstrahentu nepieciešams reģenerēt (atkārtotai lietošanai), tad to veic,

- 1) ekstraktu rektificējot atmosfēras spiedienā vai vakuumā. Ja ekstrakta komponenti nešķīst ūdenī, tad destilē ar ūdens tvaiku;
- 2) izsaldejojot, ja komponentu šķīdība ekstraktā ievērojami samazinās, pazeminot temperatūru;
- 3) ja jāiegūst jauni savienojumi, tad izmanto ķīmiskās reakcijas.

Fāžu līdzsvars. Ekstrahējot sistēmas šķidrums—šķidrums, šķīdinātājs (ekstrahents) daļēji šķīst sākuma maisījuma komponentā A un komponents A nedaudz šķīst šķīdinātājā. Tādēļ iegūtā rafināde satur gandrīz visu komponentu A un piemaisījumā nedaudz ekstrakta $B+C$. Ekstraktā daļēji pāriet arī komponents A . Abi šķīdumi ir piesātināti, un katrs sastāv no trim komponentiem. Šādas trīskomponentu sistēmas sastāvu ērti attēlot vienādmalu trijstūra diagrammā (13.1. att. *a*). Vienādmalu trijstūra diagrammas virsotnes atbilst tīriem komponentiem A , B un C . Trijstūra malas attēlo divkomponentu maisījumu $A+B$, $A+C$ un $B+C$ sastāvu. Trijstūra malas iedalītas moldaļās vai masas daļās. Trīskomponentu maisījumu raksturo punkts trijstūra laukumā.

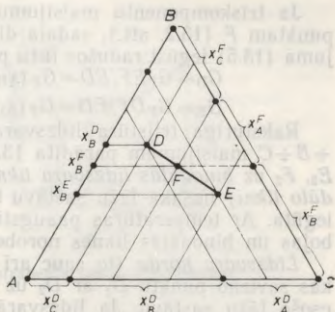
Ja trīskomponentu maisījumu $A+B+C$ trijstūra diagrammā raksturo punkts D , tad šī maisījuma sastāva noteikšanai caur punktu D velk trijstūra malām paralēlas līnijas. Maisījuma sastāvu var nolasīt uz jebkuras trijstūra malas, jo taisnēm ab , cd un ef visos punktos ir vienāds attiecīgais komponenta C , A un B saturs. Komponentu sastāvu nolasa no punkta, kur komponenta koncentrācija vienāda ar nulli.

No jebkuras trijstūra virsotnes viltkās taisnes Ag , Bk , Ch (13.1. att. *b*) raksturo maisījumus ar pastāvīgām divu komponentu koncentrāciju attiecībām x_B/x_C , x_A/x_C , x_A/x_B . Piemēram, ja uz taisnes Ag punkts E attēlo attiecīgā trīskomponentu maisījuma sastāvu, tad, mainot komponenta A masu, attiecība $x_B^E/x_C^E = x_B^{E_1}/x_C^{E_1} = x_B^{E_2}/x_C^{E_2} = \text{const.}$



13.1. att. Trijstūra diagramma.

Ja maisījumam $A+B+C$, kas diagrammā atbilst punktam E' , pievieno komponentu B , tad maisījuma sastāvs mainīsies pa taisni Bk virzienā uz punktu B . Pievienojot noteiktu komponenta B masu, maisījuma sastāvu raksturošs punkts E'_2 . Ja no maisījuma E'_2 ekstrahē komponentu B , tā sastāvs mainās punkta k virzienā un pēc zināmas komponenta B masas ekstrahēšanas sasniedz punktu E'_1, E' utt.



13.2. att. Šķidrumu maisījumu attēlojums trijstūra diagrammā.

Ja samaisa divus trīskomponentu šķidrumus, kuru sastāvi trijstūra diagrammā raksturoti ar punktiem D un E (13.2. att.), iegūst maisījumu, kas atbilst punktam F uz taisnes DE . Punkta F vieta uz taisnes atkarīga no sākumā ņemto šķidrumu G_D un G_E patēriņiem (vai masām).

Ievērojot masas nezūdamības likumu, iegūtā maisījuma patēriņš (vai masa)

$$G_F = G_D + G_E. \quad (13.1)$$

Zinot komponenta B sastāvu abās šķidrās fāzēs un iegūtajā maisījumā, x_B^D, x_B^E un x_B^F , tad attiecībā uz šo komponentu materiālā bilance ir šāda:

$$G_F x_B^F = G_D x_B^D + G_E x_B^E. \quad (13.2)$$

No vienādojumiem (13.1) un (13.2) iegūst, ka $(G_D + G_E) x_B^F = G_D x_B^D + G_E x_B^E$ vai $G_D/G_E = (x_B^F - x_B^E)/(x_B^D - x_B^F)$.

No 13.2. attēla redzams, ka $x_B^F - x_B^E$ un $x_B^D - x_B^F$ ir ekvivalenti nogriežņiem EF un DF , tādēļ var rakstīt, ka

$$G_D/EF = G_E/DF. \quad (13.3)$$

Līdzīgi iegūst, ka

$$G_F/DE = G_E/DF. \quad (13.4)$$

No vienādojumiem (13.3) un (13.4) var rakstīt, ka

$$G_D/EF = G_E/DF = G_F/DE. \quad (13.5)$$

Vienādojums (13.5) ir *sviras likuma matemātiskā izteiksme*. Saskaņā ar to var noteikt punkta F atrašanās vietu uz taisnes DE (13.2. att.).

No punkta D atliek nogriežni DF , kas aprēķināms pēc sviras likuma (vienādojums (13.5)) šādi:

$$DF = DE G_E/G_F = DE G_E/(G_D + G_E).$$

Ja trīskomponentu maisījumu, kas trijstūra diagrammā atbilst punktam F (13.2. att.), sadala divās fāzēs D un E , tad no vienādojuma (13.5) iegūst radušos fāžu patēriņu (vai masu):

$$G_D = G_F EF / ED = G_F (x_B^F - x_B^E) / (x_B^D - x_B^E) \quad \text{un}$$

$$G_E = G_F DF / ED = G_F (x_B^D - x_B^F) / (x_B^D - x_B^E).$$

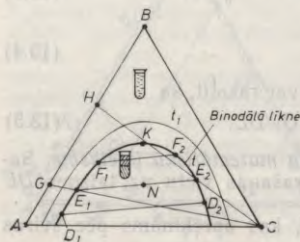
Raksturīga trijstūra līdzsvara diagramma trīskomponentu $A + B + C$ maisījumam parādīta 13.3. attēlā. Punkti D_1, E_1, F_1 un D_2, E_2, F_2 uz binodālās līdzsvara līknes (to sauc arī vienkārši par *binodālo līkni*) nosaka fāžu sastāvu temperatūrā t , kurai binodālā līkne iegūta. Ar temperatūras paaugstināšanos komponenta šķīdība uzlabojas un binodālās līknes norobežotais laukums samazinās ($t > t_1$).

Līdzsvara horda (to sauc arī par *konodomu, konodu* jeb *nodu*), kas savieno punktu D_1 ar D_2 uz binodālās līknes, norāda līdzsvarā esošo fāžu sastāvu. Ja līdzsvarā esošajām fāzēm, kas atbilst stāvoklim $D_1 D_2$, pievienotu komponentu B , tad līdzsvarā esošais fāžu sastāvs būtu izsakāms ar citu līdzsvara hordu ($E_1 E_2, F_1 F_2$ utt.). Palielinot komponenta B masu, abu fāžu sastāvs punktā K kļūst viendabīgs. So punktu sauc par *kritisko punktu*, kuru sasniedzot sistēma kļūst viendabīga. Trijstūra diagrammas laukumā ārpus līdzsvara līknes sistēma sastāv no vienas fāzes, bet laukumā zem līdzsvara līknes — no divām fāzēm.

Trijstūru diagrammās virsotne A atbilst nešķīstošam komponentam, virsotne B — ekstrahējamam komponentam un virsotne C — ekstrahentam (šķīdinātājam). Šādā virsotņu sadalījumā binodālās līknes daļa pa kreisi no punkta K uzrāda rafinādes sastāvu (augsts komponenta A saturs), bet līknes daļa pa labi no punkta K — atbilstošos ekstrakta sastāvus (augsts komponenta B saturs).

Maisījumam $A + B$ pievienojot šķīdinātāju C , iegūto maisījumu diagrammā raksturo punkts N , no kura secināms, ka iegūtais maisījums veido divas fāzes, jo punkts N atrodas laukumā zem binodālās līknes. Vienas fāzes sastāvu nosaka punkts E_1 , bet otras fāzes sastāvu — punkts E_2 .

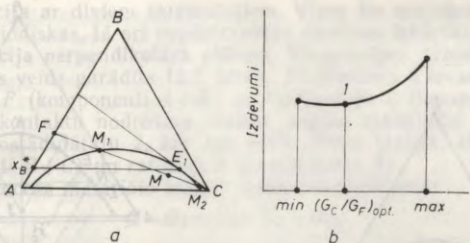
Ja no maisījuma $A + B + C$, kuru raksturo punkts E_1 , nodestilē šķīdinātāju C , tad attiecība $\frac{x_A}{x_B}$ paliek nemainīga, tādēļ taisne CE_1



13.3. att. Trīskomponentu maisījuma līdzsvara diagramma.

raksturo maisījuma sastāva maiņu, kas sākas punktā E_1 un turpinās pa taisni CE_1 punkta G virzienā (samazinās komponenta C saturs). Nodestilējot šķīdinātāju pilnīgi ($C = 0$), iegūta atlikuma (binārā maisījuma $A + B$) sastāvu raksturo punkts G . Analogi taisne CE_2 rāda fāzes E_2 maiņu, nodestilējot no tās šķīdinātāju, bet punkts H — atlikuma sastāvu. Jo lielāks attālums starp punktiem G un H , jo selektīvāks ekstrahents.

Ekstrakcijas procesā sākuma mai-



13.4. att. Optimālā īpatnējā ekstrahenta patēriņa noteikšana.

sijumam pievadītā ekstrahenta masa var būt dažāda. Ekstrahēšanu ieteicams realizēt ar optimālo ekstrahenta masu. Optimālo ekstrahenta masu nosaka, vadoties no binodālās liknes un sviras likuma.

Ja sākumā maisījuma patēriņš (vai masa) G_F , kuru uz trijstūra diagrammas (13.4. att. a) raksturo punkts F (sākuma maisījums $A+B$), pievieno ekstrahentu C (punkts C), tad iegūst sākuma maisījuma un ekstrahenta maisījumu, ko raksturo punkts M uz taisnes CF . Atkarībā no pievienotā ekstrahenta patēriņa (vai masas) punkts M uz taisnes CF var atrasties dažādās vietās. Punkta M galējās robežas uz taisnes CF ir punkti M_1 un M_2 . Punktam M tuvojoties punktam F , nogrieznis FM saīsinās — un otrādi, punktam M attālinoties no punkta F , nogrieznis FM pagarinās.

Ekstrahenta patēriņš (vai masa) pēc sviras likuma ir

$$G_C/FM = G_F/MC \quad \text{vai} \quad G_C = G_F FM/MC,$$

kur G_C , G_F — ekstrahenta, sākuma šķīduma patēriņš, kg/s (vai masa, kg); FM , MC — nogriežņu garumi (sk. 13.4. att.), mm.

Īpatnējais ekstrahenta patēriņš

$$(G_C/G_F) = FM/MC. \quad (13.6)$$

Teorētiski iespējamais minimālais īpatnējais ekstrahenta patēriņš būs, ja punkts M atradīsies punktā M_1 , t. i.,

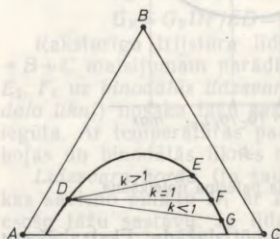
$$(G_C/G_F)_{\min} = FM_1/CM_1.$$

Teorētiski iespējamais maksimālais īpatnējais ekstrahenta patēriņš būs, ja punkts M atradīsies punktā M_2 , t. i.,

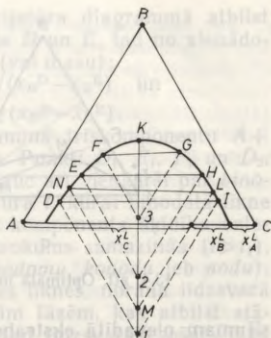
$$(G_C/G_F)_{\max} = FM_2/CM_2.$$

Optimālo īpatnējo ekstrahenta patēriņu (vai masu) nosaka, izdarot iekārtas un ekspluatācijas izdevumu aprēķinus robežās starp minimālo un maksimālo īpatnējo ekstrahenta patēriņu. Izdevumu līknes minimums punktā I (13.4. att. b) atbilst optimālam īpatnējam ekstrahenta patēriņam (vai masa).

Teorētiski iespējamais maksimālais komponenta B saturs ekstraktā nosakāms, velkot no punkta C (13.4. att. a) pieskari binodālai liknei. Punktā E_1 koncentrācija x_B^* ir maksimālā. Reālos apstākļos komponenta B koncentrācija ekstraktā vienmēr ir mazāka par x_B^* .



13.5. att. Līdzsvara hordu stāvokļi trijstūra diagrammā.



13.6. att. Kritiskā punkta K un līdzsvara hordas NL konstruēšana.

Līdzsvara hordu slīpums atkarīgs no komponentu īpašībām un no vielas sadalījuma koeficienta k (13.5. att.). Ja $k=1$, līdzsvara horda DF paralēla trijstūra malai AC ; ja $k>1$, horda DE novirzīta virs līnijas DF ; ja $k<1$, tad horda DG novirzīta zem līnijas DF .

Zinot vienas un otras fāzes sastāvu, iespējams konstruēt binodālo likni (13.6. att.), bet no binodālās liknes noteikt rafinādes sastāvu (punkti D , E un F) un ekstrakta sastāvu (punkti G , H un I). Savienojot punktus D ar I , E ar H un F ar G , attiecīgajām sistēmām iegūst līdzsvara hordas.

Kritiskā punkta noteikšanai no punktiem D , E un F velk trijstūra malai BC paralēlas taisnes (svītrlinijas), bet no punktiem G , H un I velk taisnes, kas paralēlas malai AB . Attiecīgo taisņu krustpunktos iegūst punktus 1 , 2 un 3 , kurus savienojot un taisni turpinot, līdz tā krusto binodālo likni, iegūst kritisko punktu K .

Maisījumam $A+B+C$ trijstūra diagrammā atbilst punkts N . Ja nepieciešams noteikt šim maisījumam līdzsvarā esošās otrās fāzes sastāvu, tad no punkta N jāvelk līdzsvara horda, līdz tā krusto binodālo likni (punkts L). Līdzsvara hordas nav paralēlas, tādēļ punkta L iegūšanai no punkta N velk taisni, kas paralēla malai BC , līdz tā krusto likni IK , un iegūst punktu M . No punkta M velk taisni, kas paralēla malai AB . Tur, kur tā krusto binodālo likni, iegūst punktu L , pēc kura var noteikt otrās fāzes sastāvu x_A^L , x_B^L un x_C^L . Taisne NL ir līdzsvara horda fāzēm N un L .

13.3. EKSTRAKCIJAS METODEDES

Atkarībā no šķīdinātāja un sākuma maisījuma plūsmu virzieniem un no šķīdinātāju skaita ekstrakciju realizē pēc šādām metodēm: 1) ekstrakcija perpendikulārā plūsmā; 2) ekstrakcija pretplūsmā;

3) ekstrakcija ar diviem šķīdinātājiem. Visas šīs metodes realizējamas kā periodiskas, tā arī nepārtrauktas darbības iekārtās.

Ekstrakcija perpendikulārā plūsmā. Vienpakāpes (vienkāršākais) ekstrakcijas veids parādīts 13.7. attēlā. Ekstraktorā 1 ievada sākuma maisījumu F (komponenti $A+B$) un šķīdinātāju S (komponentu C). Šķidrums kontaktu nodrošina maisot. Iegūto maisījumu $F+S$ aizvada uz nostādinātāju 2, kur tas veido divus slāņus: ekstraktu E (komponenti $B+C$) un rafinādi R (komponents A).

Šāda procesa materiālo bilanci izsaka vienādojums:

$$G = G_F + G_S = G_R + G_E,$$

kur G , G_F , G_S , G_R un G_E — šķidrums kopējais patēriņš (vai masa), sākuma maisījuma, šķīdinātāja, rafinādes un ekstrakta patēriņš vai masa, kg/s vai kg.

Materiālā balance attiecībā uz komponentu B ir

$$G\bar{x}_B = G_F\bar{x}_{FB} + G_S\bar{x}_{SB} = (G_F + G_S)\bar{x}_B \quad (13.7)$$

$$G\bar{x}_B = G_R\bar{x}_{RB} + G_E\bar{x}_{EB}, \quad (13.8)$$

kur \bar{x}_B — komponenta B koncentrācija masā G ; \bar{x}_{FB} un \bar{x}_{SB} — komponenta B koncentrācija sākuma maisījumā un šķīdinātājā.

No vienādojuma (13.7) var aprēķināt nepieciešamo šķīdinātāja patēriņu (vai masu):

$$G_S = G_F \frac{\bar{x}_{FB} - \bar{x}_B}{\bar{x}_B - \bar{x}_{SB}}$$

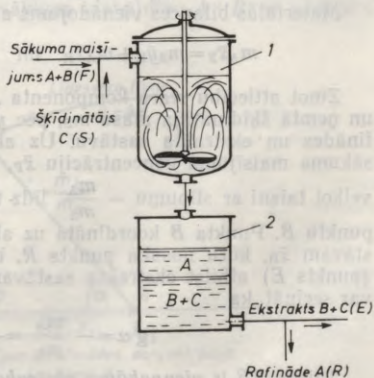
Rafinādes patēriņš (vai masa)

$$G_R = G - G_E.$$

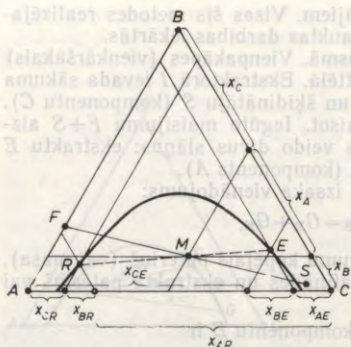
Vienādojumā (13.8) G_R vietā ievietojot lielumu $G - G_E$, var aprēķināt iegūtā ekstrakta patēriņu (vai masu):

$$G_E = G \frac{\bar{x}_B - \bar{x}_{RB}}{\bar{x}_{BE} - \bar{x}_{RB}}$$

Trijstūra diagrammā vienpakāpes ekstrakcijas process attēlots 13.8. attēlā. Punkts F atbilst sākuma maisījumam $A+B$, bet punkts S — ņemtajam šķīdinātājam (pieņem, ka šķīdinātājs satur niecīgu vielu A un B piemaisījumu). Samaisot šādus šķīdumus, iegūst maisījumu $F+S$, kura punkts M atrodas uz taisnes FS . Ja punkta M stāvoklis



13.7. att. Vienpakāpes ekstrakcija perpendikulārā plūsmā.



13.8. att. Vienpakāpes ekstrakcijas attēlojums trijstūra diagrammā.

grami komponenta B uz 1 kg komponenta A , tad kopējā komponenta B masa sākuma maisījumā ir $m_A \bar{x}_F$ kilogrami.

Komponenta B masa ekstraktā, ja ekstrakta koncentrācija ir \bar{y}_E kilogrami vielas B uz 1 kg šķīdinātāja C , ir $m_S \bar{y}_E$ kilogrami, kur m_S — šķīdinātāja C masa, kg.

Rafinādē komponenta A masa vienāda ar sākuma maisījumā esošā komponenta A masu m_A (pieņem, ka A nešķīst šķīdinātājā C). Komponenta B masa rafinādē ir $m_A \bar{x}_R$, kur \bar{x}_R — komponenta B koncentrācija rafinādē, $\frac{\text{kg komponenta } B}{\text{kg komponenta } A}$.

Materiālās bilances vienādojums attiecībā uz komponentu B ir

$$m_A \bar{x}_F = m_S \bar{y}_E + m_A \bar{x}_R \quad \text{un} \quad \frac{\bar{y}_E}{\bar{x}_R - \bar{x}_F} = - \frac{m_A}{m_S}.$$

Zinot attiecību starp komponenta A masu sākuma maisījumā m_A un ņemtā šķīdinātāja masu m_S , pēc $y-x$ diagrammas var noteikt rafinādes un ekstrakta sastāvu. Uz abscisu ass (13.9. att.) atliekot sākuma maisījuma koncentrāciju \bar{x}_F , iegūst punktu A . No punkta A velkot taisni ar slīpumu $-\frac{m_A}{m_S}$, līdz tā krusto līdzsvara līkni, iegūst punktu B . Punkta B koordināta uz abscisu ass atbilst rafinādes sastāvam \bar{x}_R , kuru nosaka punkts R , bet koordināta uz ordinātu ass (punkts E) atbilst ekstrakta sastāvam \bar{y}_E . Aplūkojot trijstūri ABR , var secināt, ka

$$\text{tg } \alpha = - \frac{m_A}{m_S} = \frac{\bar{y}_E}{\bar{x}_R - \bar{x}_F}.$$

Taisne AB ir vienpakāpes ekstrakcijas darba taisne. No diagrammas iespējams noteikt šķīdinātāja masu, kā arī rafinādes sastāva maiņu atkarībā no šķīdinātāja masas.

diagrammā atbilst iegūtajam maisījumam, tad, caur punktu M velkot līdzsvara hordu, iegūst punktus R un E , kas atbilst rafinādes un ekstrakta sastāvam.

Šķīdinātāja patēriņš vai masa atkarīga no punkta M atrašanās vietas uz taisnes, jo

$$\frac{G_S}{G_F} = \frac{FM}{MS}.$$

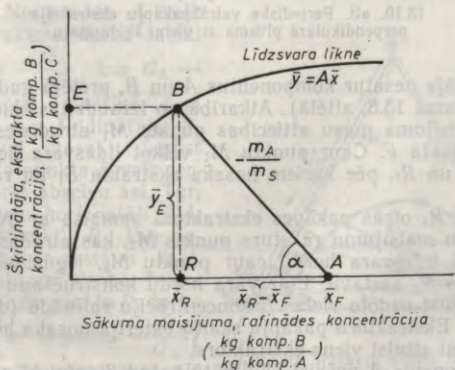
Ja komponents A nešķīst šķīdinātājā C , tad šādas sistēmas līdzsvaru var attēlot $y-x$ koordinātās, kā tas redzams 13.9. attēlā. Ja sākuma maisījumā komponenta A masa ir m_A kilogrami un tā koncentrācija ir \bar{x}_F kilo-

Vienpakāpes ekstrakcija realizējama periodiski un nepārtraukti. Neatkarīgi no iekārtas darbības veida iegūtā rafināde satur daudz ekstrahējamā komponenta B , tādēļ vienpakāpes ekstrakcija neapmierina rūpniecības prasības.

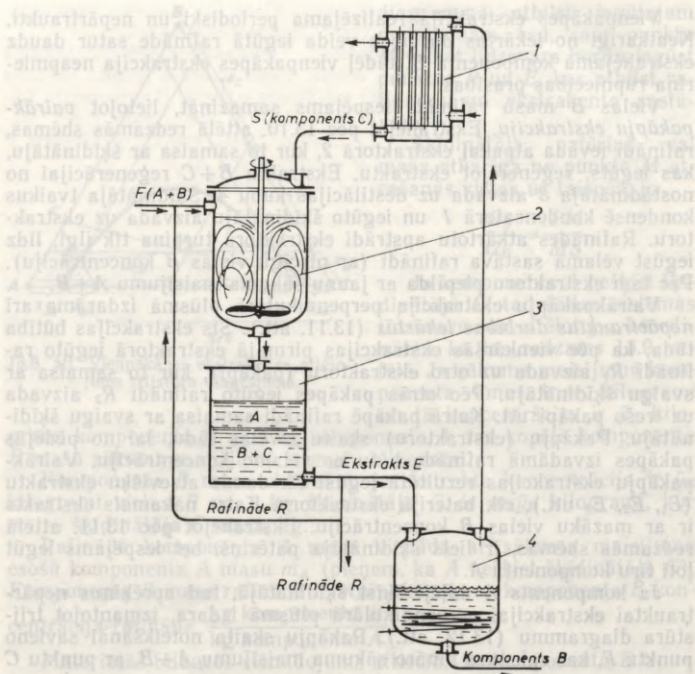
Vielas B masu rafinādē iespējams samazināt, lietojot *vairākpakāpju ekstrakciju*. Ekstrahējot pēc 13.10. attēlā redzamās shēmas, rafinādi ievada atpakaļ ekstraktorā 2, kur to samaisa ar šķīdinātāju, kas iegūts, reģenerējot ekstraktu. Ekstraktu $B+C$ reģenerācijai no nostādinātāja 3 aizvada uz destilācijas kubu 4. Šķīdinātāja tvaikus kondensē kondensatorā 1 un iegūto šķīdinātāju aizvada uz ekstraktoru. Rafinādes atkārtotu apstrādi ekstraktorā turpina tik ilgi, līdz iegūst vēlamo sastāva rafinādi (ar nēcīgu vielas B koncentrāciju). Pēc tam ekstraktoru piepilda ar jaunu sākuma maisījumu $A+B$.

Vairākpakāpju ekstrakcija perpendikulārā plūsmā izdarāma arī *nepārtrauktas darbības iekārtās* (13.11. att.). Šīs ekstrakcijas būtība tāda, ka pēc vienkāršās ekstrakcijas pirmajā ekstraktorā iegūto rafinādi R_1 aizvada uz otro ekstraktoru (pakāpi), kur to samaisa ar svaigu šķīdinātāju. Pēc otrās pakāpes iegūto rafinādi R_2 aizvada uz trešo pakāpi utt. Katrā pakāpē rafinādi samaisa ar svaigu šķīdinātāju. Pakāpju (ekstraktoru) skaitu izvēlas tādu, lai no pēdējās pakāpes izvadāmā rafinādē būtu ar vēlamo koncentrāciju. Vairākpakāpju ekstrakcijas rezultātā iegūst tik daudz atsevišķu ekstraktu (E_1, E_2, E_3 utt.), cik baterijā ekstraktoru. Katrs nākamais ekstrakts ir ar mazāku vielas B koncentrāciju. Ekstrahējot pēc 13.11. attēlā redzamās shēmas, ir liels šķīdinātāja patēriņš, bet iespējams iegūt ļoti tīru komponentu A .

Ja komponents A daļēji šķīst šķīdinātājā, tad aprēķinus nepārtrauktai ekstrakcijai perpendikulārā plūsmā izdara, izmantojot trijstūra diagrammu (13.12. att.). Pakāpju skaita noteikšanai savieno punktu F , kas raksturo bināro sākuma maisījumu $A+B$, ar punktu C



13.9. att. Vienkāršota vienpakāpes ekstrakcijas diagramma.

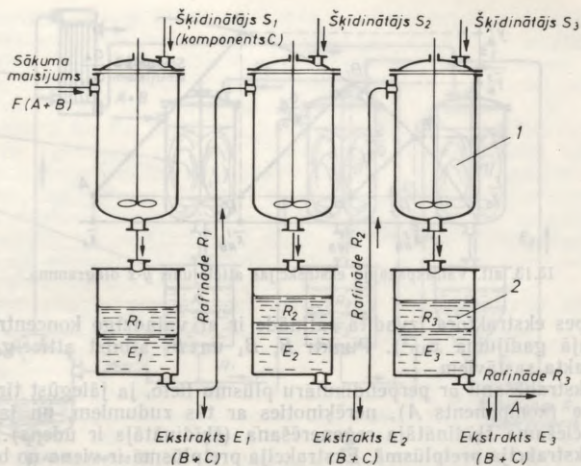


13.10. att. Periodiska vairāpkāpju ekstrakcija perpendikulārā plūsmā ar vienu šķīdinātāju.

(ja šķīdinātājs nesatur komponentus A un B , pretējā gadījumā rīkojas, kā redzams 13.8. attēlā). Atkarībā no izraudzītās šķīdinātāja un sākuma maisījuma masu attiecības punkts M_1 atradīsies tuvāk vai tālāk no punkta F . Caur punktu M_1 velkot līdzsvara hordu, iegūst punktus E_1 un R_1 , pēc kuriem nosaka ekstrakta E_1 un rafinādes R_1 sastāvu.

Rafinādi R_1 otrās pakāpes ekstraktorā samaisa ar svaigu šķīdinātāju. Šādu maisījumu raksturo punkts M_2 , kas atrodas uz taisnes R_1C . Velkot līdzsvara hordu caur punktu M_2 , iegūst ekstrakta E_2 un rafinādes R_2 sastāvu. Līdzsvara hordu konstruēšanu turpina tik ilgi, līdz iegūst uzdoto vielas B koncentrāciju rafinādē (dotajā gadījumā x_{RB}^3). Ekstraktoru pakāpju skaitu baterijā nosaka hordu skaits. Katrai hordai atbilst viens ekstraktors.

Ja komponents A nešķīst šķīdinātājā, tad, līdzīgi kā vienpakāpes ekstrakcijai, nepieciešamo pakāpju skaitu un attiecību starp kompo-



13.11. Nepārtraukta vairāpkāpju ekstrakcija perpendikulārā plūsmā.

nenta A un šķīdinātāja masu iespējams noteikt grafiski, izmantojot $y-x$ diagrammu (13.13. att.).

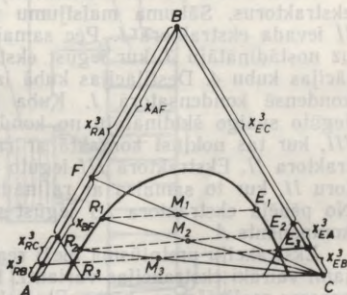
Uz abscisu ass atliek sākuma maisījuma koncentrāciju \bar{x}_F , bet uz ordinātu ass — šķīdinātāja koncentrāciju \bar{y}_S . Pieņem, ka šķīdinātājs, ievadot to ekstraktorā, satur nelielu vielas B koncentrāciju. No punkta \bar{y}_S velkot horizontāli līdz perpendikulam, kas vilkts no \bar{x}_F , iegūst punktu A . No punkta A velk pirmā ekstraktora darba taisni

(ar slīpumu $-\frac{G_A}{G_{S1}}$, kur G_A —

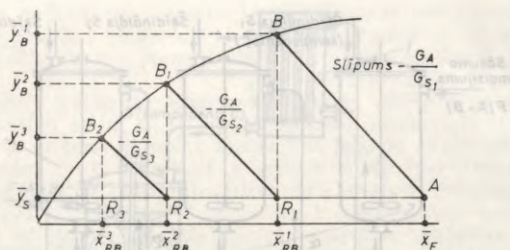
komponenta A patēriņš (vai masa); G_{S1} — šķīdinātāja S_1 patēriņš (vai masa)), iegūst punktu B . No punkta B velk perpendikulu pret abscisu asi. Tur, kur tas krusto horizontāli $\bar{y}_S A$, iegūst krustpunktu R_1 , kas parāda rafinādes sastāvu \bar{x}_{RB}^1 . Otrā ekstraktora darba taisni iegūst, velkot no punkta R_1 darba

taisni $R_1 B_1$ (ar slīpumu $-\frac{G_A}{G_{S2}}$)

utt. Darba taisņu konstruēšanu turpina tik ilgi, līdz no pēdējās



13.12. att. Pakāpju skaita noteikšana nepārtrauktai ekstrakcijai perpendikulārā plūsmā.



13.13. att. Vairāpkāpju ekstrakcijas attēlojums y - x diagrammā.

pakāpes ekstraktora izvadītā rafināde ir ar vajadzīgo koncentrāciju (dotajā gadījumā \bar{x}_{RB}^3). Punkti B , B_1 un B_2 atbilst attiecīgajiem ekstrakta sastāviem.

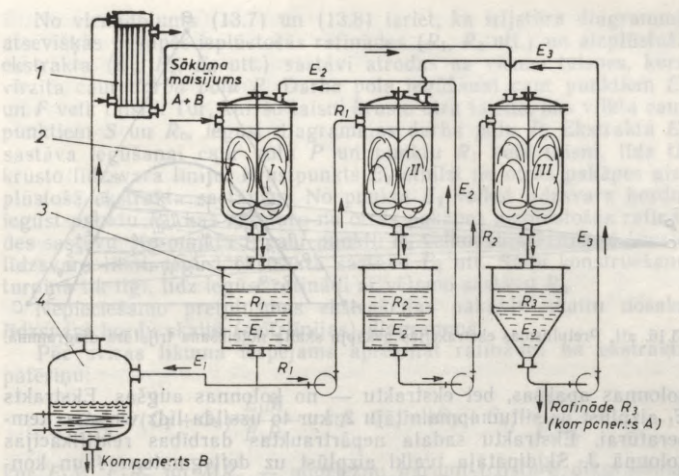
Ekstrahēšanu ar perpendikulāru plūsmu lieto, ja jāiegūst tīra rafināde (komponents A), nerēķinoties ar tās zudumiem, un ja nav nepieciešama šķīdinātāja regenerēšana (šķīdinātājs ir ūdens).

Ekstrakcija pretplūsmā. Ekstrakcija pretplūsmā ir viena no biežāk lietojamām ekstrakcijas metodēm. Procesu pēc šīs metodes var realizēt ar nelielu šķīdinātāja patēriņu un iegūt rafinādi un ekstraktu ar augstu vēlamā komponenta koncentrāciju. Šāda iekārta sastāv no vairākiem ekstraktoriem vai no ekstrakcijas kolonnas.

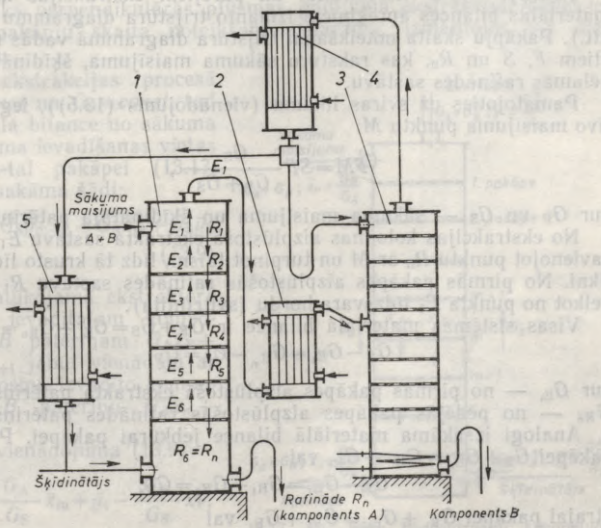
Sākuma maisījuma un ekstrahenta plūsmas virzieni ir pretēji, piemēram, sākuma maisījumu ievada pirmajā ekstraktori, bet ekstrahentu — pēdējā. Lietojot šādus plūsmu virzienus, svaigais sākuma maisījums nokļūst kontaktā ar daļēji piesātināto ekstrahentu (ekstraktu), bet ekstrahētais sākuma maisījums pēdējā ekstraktori saskaras ar svaigo ekstrahentu.

13.14. attēlā parādīta ekstrakcija pretplūsmā, lietojot atsevišķus ekstraktorus. Sākuma maisījumu un ekstraktu E_2 no ekstraktora II ievada ekstraktori I . Pēc samaisīšanas iegūto šķīdumu aizvada uz nostādinātāju 3 , kur iegūst ekstraktu E_1 , kuru aizvada uz destilācijas kubu 4 . Destilācijas kubā iztvaicē šķīdinātāju un tā tvaikus kondensē kondensatorā 1 . Kuba paliekās iegūst komponentu B . Iegūto svaigo šķīdinātāju no kondensatora aizvada uz ekstraktori III , kur tas nokļūst kontaktā ar rafinādi R_2 , kuru pievada no ekstraktora II . Ekstraktori III iegūto ekstraktu E_3 aizvada uz ekstraktori II , kur to samaisa ar rafinādi R_1 , kas plūst no ekstraktora I . No pēdējā ekstraktora III iegūst rafinādi R_3 , kas praktiski ir tīrs komponents A .

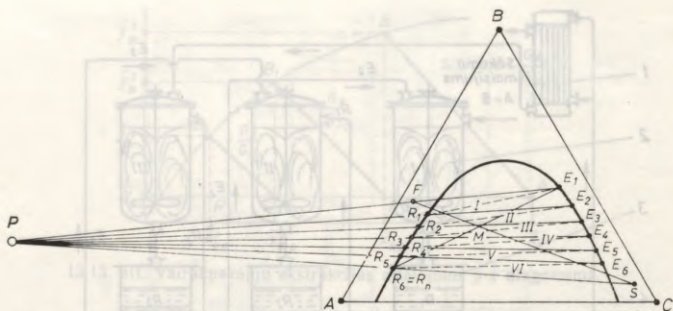
Ekstrakciju pretplūsmā bieži realizē kolonnu aparātos, kur iespējami vairāki ekstrakcijas varianti. 13.15. attēlā redzama vienkāršākā procesa realizēšanas shēma. Ekstrakcijas kolonnā 1 no augšas ievada sākuma maisījumu. Ievadišanas vieta atkarīga no sākuma maisījuma un šķīdinātāja blīvuma. Blīvāko vidi ievada no augšas. Shēmā dotajai ekstrakcijas kolonnai ir sešas pakāpes. Rafinādi R_n aizvada no



13.14. att. Pretplūsmas ekstrakcijas iekārtas shēma.



13.15. att. Pretplūsmas ekstrakcija kolonnu aparātā.



13.16. att. Pretplūsmas ekstrakcijas pakāpju skaita noteikšana trijstūra diagrammā.

kolonnas apakšas, bet ekstraktu — no kolonnas augšas. Ekstrakts E_1 aizplūst uz siltumapmainītāju 2, kur to uzsilda līdz viršanas temperatūrai. Ekstraktu sadala nepārtrauktas darbības rektifikācijas kolonnā 3. Šķīdinātāja tvaiki aizplūst uz deflegmatoru 4 un kondensatoru—dzesinātāju 5. Iegūto šķīdinātāju aizvada uz ekstrakcijas kolonnā. No rektifikācijas kolonnas apakšas aizvada komponentu B.

Pakāpju skaita noteikšanai un pārējiem ekstrakcijas kolonnas materiālās bilances aprēķiniem izmanto trijstūra diagrammu (13.16. att.). Pakāpju skaita noteikšanai trijstūra diagrammā vadās no punktiem F , S un R_n , kas raksturo sākuma maisījuma, šķīdinātāja un vēlamās rafinādes sastāvu.

Pamatojoties uz sviras likumu (vienādojums (13.5)), iegūst fik-tīvo maisījuma punktu M :

$$FM = SF \frac{G_S}{G_F + G_S},$$

kur G_F un G_S — sākuma maisījuma un šķīdinātāja patēriņš, kg/s.

No ekstrakcijas kolonnas aizplūstošā ekstrakta sastāvu E_1 iegūst, savienojot punktu R_n ar M un turpinot taisni, līdz tā krusto līdzsvara likni. No pirmās pakāpes aizplūstošās rafinādes sastāvu R_1 iegūst, velkot no punkta E_1 līdzsvara hordu (svītrlīnija).

Visas sistēmas materiālā bilance ir $G_F + G_S = G_{E_1} + G_{R_n} = G_M$ vai

$$G_F - G_{E_1} = G_{R_n} - G_S = G_P,$$

kur G_{E_1} — no pirmās pakāpes aizplūstošā ekstrakta patēriņš, kg/s;

G_{R_n} — no pēdējās pakāpes aizplūstošās rafinādes patēriņš, kg/s.

Analogi izsakāma materiālā bilance jebkurai pakāpei. Pirmajai pakāpei $G_F + G_{E_2} = G_{E_1} + G_{R_1}$ vai

$$G_F - G_{E_1} = G_{R_1} - G_{E_2} = G_P; \quad (13.7)$$

otrajai pakāpei $G_{R_1} + G_{E_3} = G_{R_2} + G_{E_2}$ vai

$$G_{R_1} - G_{E_2} = G_{R_2} - G_{E_3} = G_P \text{ utt.} \quad (13.8)$$

No vienādojuma (13.7) un (13.8) izriet, ka trijstūra diagrammā atsevišķās pakāpēs ieplūstošās rafinādes (R_1, R_2 utt.) un aizplūstošā ekstrakta (E_1, E_2, E_3 utt.) sastāvi atrodas uz vienas taisnes, kura virzīta caur darba polu P . Darba pola iegūšanai caur punktiem E_1 un F velk taisni. Tur, kur šo taisni krusto otra taisne, kas vilkta caur punktiem S un R_n , iegūst diagrammas darba polu P . Ekstrakta E_2 sastāva iegūšanai caur polu P un punktu R_1 velk taisni, līdz tā krusto līdzsvara līniju. Krustpunkts E_2 atbilst no otrās pakāpes aizplūstošā ekstrakta sastāvam. No punkta E_2 velkot līdzsvara hordu, iegūst punktu R_2 , kas raksturo no otrās pakāpes aizplūstošās rafinādes sastāvu. No punkta P caur punktu R_2 velkot taisni, līdz tā krusto līdzsvara līkni, iegūst ekstrakta sastāvu E_3 utt. Šādu konstruēšanu turpina tik ilgi, līdz iegūst rafinādi ar vēlamo sastāvu R_n .

Nepieciešamo pretplūsmas ekstrakcijas pakāpju skaitu nosaka līdzsvara hordu skaits (svītrlīnijas) diagrammā.

Pēc sviras likuma iespējams aprēķināt rafinādes un ekstrakta patēriņu:

$$G_{R_n} = (G_F + G_S) \frac{E_1 M}{E_1 R_n} \quad \text{un} \quad G_{E_1} = (G_F + G_S) \frac{M R_n}{E_1 R_n},$$

kur $E_1 M$, $E_1 R_n$ un $M R_n$ — nogriežņu garumi trijstūra diagrammā, mm.

Ja šķīdinātais un komponents A ir savstarpēji nešķīstoši, tad līdzīgi kā perpendikulārās plūsmas gadījumā ekstrakcijai nepieciešamā pakāpju skaita noteikšana izdarāma, izmantojot $y-x$ diagrammu.

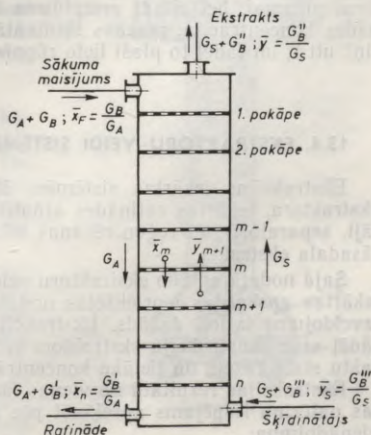
Ja ekstrakcijas procesā $G_A = \text{const}$ un $G_S = \text{const}$, tad materiālā bilance no sākuma maisījuma ievadīšanas vietas līdz m -tai pakāpei (13.17. att.) izsakāma šādi:

$$G_A \bar{x}_F + G_S \bar{y}_{m+1} = G_A \bar{x}_m + G_S \bar{y}_1, \quad (13.9)$$

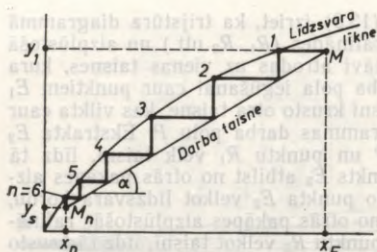
t. i., aplūkojamā ekstraktora posmā ievadītajam komponenta B patēriņam $G_A \bar{x}_F + G_S \bar{y}_{m+1}$ jābūt vienādam ar no šī posma izvadīto komponenta B patēriņu $G_A \bar{x}_m + G_S \bar{y}_1$.

No vienādojuma (13.9)

$$\bar{y}_{m+1} = \frac{G_A}{G_S} \bar{x}_m + \bar{y}_1 - \frac{G_A}{G_S} \bar{x}_F, \quad (13.10)$$



13.17. att. Fāžu koncentrāciju apzīmējumi pretplūsmas ekstrakcijai.



13.18. att. Pretplūsmas ekstrakcijas pakāpju skaita noteikšana y - x diagrammā.

kur G_A, G_S — komponenta A un tīra šķīdinātāja patēriņš, kg/s; G_B, G'_B, G''_B, G'''_B — komponenta B patēriņš sākuma maisījumā, rafinādē, ekstraktā un svaigā šķīdinātājā, kg/s.

Vienādojums (13.10) ir pretplūsmas ekstrakcijas darba taisnes vienādojums, un tas analogs rektifikācijas procesa darba taisnes vienādojumam $y = Ax + B$ (sk. 12. nodaļu). Attiecība $\frac{G_A}{G_S} = A = \tan \alpha$

ir darba taisnes slīpuma leņķa tangenss, bet $\bar{y}_1 - \frac{G_A}{G_S} \bar{x}_F = B$ ir nogrieznis uz ordinātu ass.

Darba taisnes konstruēšanai y - x diagrammā (13.18. att.) iegūst divus punktus M un M_n . Punkta M koordinātas ir sākuma maisījuma koncentrācija x_F un ekstrakta koncentrācija y_1 (ekstrakcijas kolonnas augšgalā). Punkta M_n koordinātas nosaka rafinādes x_n un šķīdinātāja y_s koncentrācijas (ekstrakcijas kolonnas apakšgalā).

Pakāpju skaitu ekstrakcijai pretplūsmā nosaka analogi kā rektifikācijai, punktu M un M_n robežās velkot pakāpienus, kā parādīts 13.18. attēlā. Pretplūsmai pakāpju skaits ir lielāks nekā perpendikulārai plūsmai, bet citādi pretplūsma ir ekonomiskāka (lielāka rafinādes koncentrācija, mazāks šķīdinātāja un siltuma enerģijas patēriņš utt.), un tādēļ to plaši lieto rūpniecībā.

13.4. EKSTRAKTORU VEIDI SISTĒMĀM ŠĶIDRUMS—ŠĶIDRUMS

Ekstrakcijas iekārtas sistēmām šķidrums—šķidrums sastāv no ekstraktora, iekārtas rafinādes atdalīšanai no ekstrakta (nostādinātāji, separatori) un reģenerēšanas iekārtas (pārtvaices iekārtas), ja jāsadala ekstrakts.

Šajā nodaļā aplūko ekstraktoru veidus. Sadalīšanas un pārtvaices iekārtas apskatītas iepriekšējās nodaļās. Ekstraktoru konstruktīvais izveidojums ir ļoti dažāds. Ekstrakcija ir masas apmaiņas process, tādēļ visu konstrukciju ekstraktori veidoti tā, lai panāktu labu kontaktu starp fāzēm un lielāku koncentrācijas gradientu.

Ekstrakcijas rezultātā no vienas fāzes uz otru fāzi pārgājušo vielas patēriņu iespējams aprēķināt pēc masas pārejas procesa pamatvienādojuma:

$$G = k_y \Delta \bar{y}_{vd} S,$$

kur G — ekstrahētā komponenta patēriņš, kg/s; k_y — masas pārejas koeficients, kg/(m²·s·kg/kg); S — saskares virsma starp fāzēm, m²; $\Delta\bar{y}_{vid}$ — vidējā koncentrāciju starpība starp fāzēm:

$$\Delta\bar{y}_{vid} = \frac{\Delta\bar{y}_s - \Delta\bar{y}_b}{2,3 \lg \frac{\Delta\bar{y}_s}{\Delta\bar{y}_b}};$$

$\Delta\bar{y}_s = \bar{y}_s^* - \bar{y}_s$ — sākuma koncentrāciju starpība; $\Delta\bar{y}_b = \bar{y}_b^* - \bar{y}_b$ — beigu koncentrāciju starpība; \bar{y}_s^* , \bar{y}_b^* — ekstrakta sākuma un beigu līdzsvara koncentrācija, kg/kg; \bar{y}_s , \bar{y}_b — ekstrakta sākuma un beigu darba koncentrācija, kg/kg.

Dažādos rūpniecībā lietojamos ekstraktoros grupē šādi: 1) ekstraktori ar nepārtrauktu fāžu sastāva maiņu; 2) pakāpju ekstraktori, kur fāžu sastāvs mainās no vienas pakāpes uz otru.

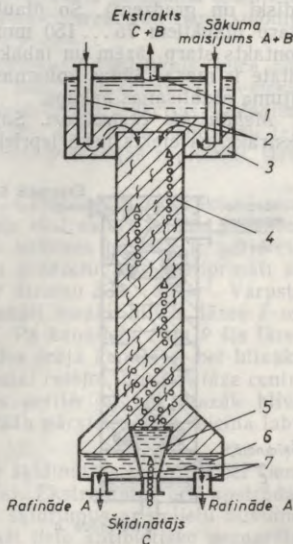
Pie pirmās grupas ekstraktoriem pieder a) gravitācijas ekstraktori bez mehāniskām iekārtām (ekstrakcija notiek smaguma spēka ietekmē); b) mehāniskie ekstraktori. Šie ekstraktori iedalās mehāniskajos gravitācijas un centrbēdzes ekstraktos.

Pie otrās grupas ekstraktoriem pieder a) šķīvju ekstraktori; b) vertikālie maisīšanas—nostādināšanas ekstraktori; c) horizontālie maisīšanas—nostādināšanas ekstraktori.

Ekstraktori ar nepārtrauktu fāžu sastāva maiņu. *Gravitācijas ekstraktori bez mehāniskām iekārtām.* Pie šīs grupas ekstraktoriem pieder 1) izsmidzināšanas ekstraktori; 2) ekstraktori ar pildījumu; 3) ekstraktori ar plaukiem — šķēršļiem.

Izsmidzināšanas ekstraktori. Izsmidzināšanas ekstraktors redzams 13.19. attēlā. Tas sastāv no vertikāla cilindra 4, kuram fāžu atdalīšanas uzlabošanai augšgals 3 un apakšgals 6 ir plašināti.

Blīvāko fāzi (aplūkojamā gadījumā sākuma maisījumu) ievada pa caurulēm 2 kolonnas augšējā daļā. Sākuma maisījums veido dispersijas vidi, kurai cauri pa izsmidzinātāju 5 kolonnā ievada sīkos pilienos sadalītu šķīdinātāju (komponentu C). Šķīdinātājam blīvums mazāks nekā dispersijas vidi, tādēļ šķīdinātājs plūst cauri



13.19. att. Ekstrakcijas kolonna ar izsmidzinātāju.

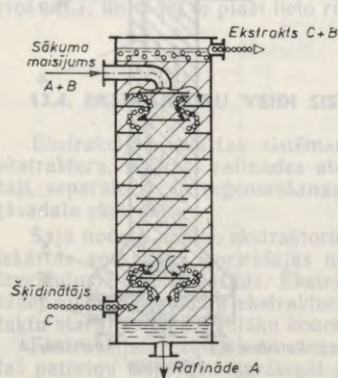
sākuma maisījuma slānim un ekstrahē komponentu *B*. Šķīdinātājam saskaroties ar sākuma maisījumu, kolonnas augšējā daļā noslāņojas ekstrakts *C+B* un pa cauruli *I* aizplūst no ekstraktora. Sākuma maisījums, pārvietodamies pa kolonnu uz leju, bagātinās ar komponentu *A* (komponents *B* pāriet ekstrahētā) un kolonnas apakšējā daļā noslāņojas. Komponenti *A* — rafināde pa caurulēm *7* izplūst no kolonnas.

Izsmidzinātāja caurumu diametrs 1,7...10,1 mm. Jo sīkāk pieli, jo lielāks masas pārejas koeficients.

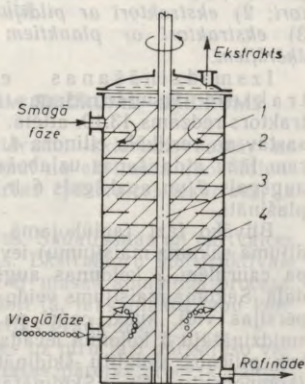
Ekstraktori ar pildījumu. Ekstraktori ar pildījumu analogi skruberiem. Efektīvākie pildķermeņi šīm kolonnām ir Rašiga gredzeni un Berla segli. Pildķermeņu lielumu izvēlas atkarībā no kolonnas diametra. Atstarpes starp caurumotajiem plauktiem ir 2...10 reizi lielākas par kolonnas diametru. Ekstraktoriem ar pildījumu ražīgums ir mazāks nekā izsmidzināšanas ekstraktoriem, jo daļu no kolonnas šķeluma aizņem pildķermeņi. Tādēļ kolonnām ar pildījumu diametrs ir lielāks nekā izsmidzināšanas kolonnām, ja to ražīgums ir vienāds. Masas apmaiņa kolonnās ar pildījumu labāka nekā izsmidzināšanas kolonnās.

Ekstraktors ar plauktiem — šķēršļiem. Ekstrakcijas kolonna ar plauktiem — šķēršļiem redzama 13.20. attēlā. Labākai fāžu sajaukšanai šajās kolonnās plūsmām ceļā novietoti plaukti (diski un gredzeni). Šo plauktu izveidojums ir dažāds. Attālums starp plauktiem 75...150 mm. Jo šis attālums mazāks, jo labāks kontakts starp fāzēm un labāka masas apmaiņa. Šo kolonnu efektivitāte ir maza. Šādas kolonnas lieto, ja nav vajadzīga augsta maisījuma atdalīšanas pakāpe.

Mehāniskie ekstraktori. Šajos ekstraktos ievērojami augstāks ekstrakcijas efekts nekā iepriekš aplūkotajiem ekstraktoriem. To pa-



13.20. att. Ekstrakcijas kolonna ar plauktiem — šķēršļiem.



13.21. att. Rotējošo disku ekstraktora shēma.

nāk, lietojot fāžu dažāda veida maisīšanu (mehāniskie maisītāji, rotorī, sūkņi utt.). Maisīšana palielina dispersitāti un uzlabo kontaktu starp fāzēm.

Mehānisko ekstraktoru trūkums — lieli ekspluatācijas izdevumi.

Rotējošo disku ekstraktori. Rotējošo disku ekstraktori (13.21. att.) sastāv no vertikāla cilindra 1. Gar tā iekšējo sienu cits virs cita noteiktos attālumos piestiprināti gredzeni 2. Pa ekstraktora asi novietots maisītājs 3, uz kura vertikālās vārpstas nostiprināti diski 4. Diski izvietoti starp gredzeniem. Maisītājam rotējot, rodas virpuļi, kas veicina kontaktu starp fāzēm. Sienai piestiprinātie gredzeni bremsē virpuļu pārvietošanos garenvirzienā. Tas nodrošina augstu masas apmaiņas efektivitāti pat liela diametra ekstraktoros.

Rotējošo disku ekstraktori lietojami, ja ir liels ražīgums un neliels pakāpju skaits.

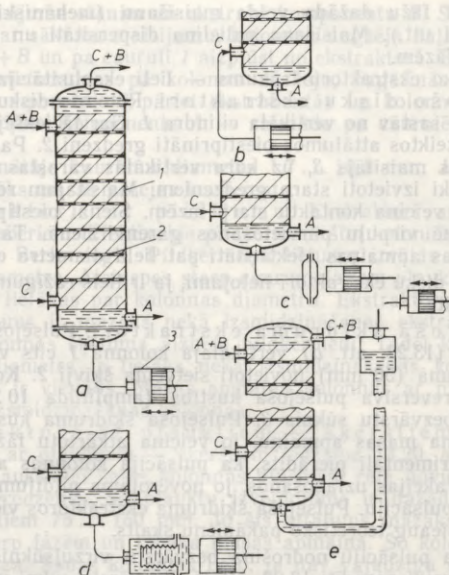
Pulsējošā šķidrums ekstraktori. Pulsējošā šķidrums ekstraktora (13.22. att. a) vertikālajā kolonnā 1 cits virs cita noteiktā attālumā (50 mm) novietoti sietveida šķīvji 2. Kolonnā šķidrumiem ir reversīva pulsējoša kustība (amplitūda 10...25 mm), kuru rada bezvārstu sūknis 3. Pulsējošā šķidrums kustība ievērojami palielina masas apmaiņu, jo veicina atkārtotu fāžu disperģēšanu. Eksperimentāli pierādīts, ka pulsācija kolonnās ar pildījumu nerada ekstrakcijas uzlabošanu, jo novērojama pildījuma orientēšanās līdz ar pulsāciju. Pulsējošā šķidrums ekstraktoros vienā kolonnā ievērojami pieaug teorētisko pakāpienu skaits.

Šķidrums pulsāciju nodrošina bezvārstu virzulsūknis, kura pievienošanas veidi parādīti 13.22. attēlā. Bezvārstu sūkņi var pievienot ekstraktora apakšējā daļā (a) vai mazāk blīvās frakcijas pievadišanas vietā, ja tā veido dispersijas vidi (b). Var lietot membrānu (c), silfonu (d) vai gaisa buferi (e) (tos lieto pulsācijas radišanai, strādājot ar agresīviem šķidrumiem).

Centrbēdzes ekstraktori. Centrbēdzes ekstraktorā ekstrakcija notiek centrālās laukā. Šāda ekstraktora shēma redzama 13.23. attēlā. Centrbēdzes ekstraktora uzbūves pamatā ir perforēta spirālveida plāksne 3 vai koncentriski gredzeni, kas nostiprināti uz vārpstas 8. Vārpsta un spirāle rotē ar ātrumu 33...83 s⁻¹. Vārpstā un ekstraktora apvalkā 6 izveidoti kanāli mazāk blīvās fāzes 7 un blīvās fāzes 2 ievadīšanai ekstraktorā. Pa kanāliem 1 un 9 šīs fāzes izvada. Mazāk blīvo fāzi ievada spirāles ārējā kanālā 4, bet blīvāko fāzi — spirāles iekšējā kanālā 5. Vārpstai rotējot, blīvākā fāze centrālās laukā pārvietojas uz spirāles perifēriju, bet mazāk blīvā fāze — tuvāk spirāles centram. Šāda fāžu pārvietošanās veicina labu saskari starp fāzēm.

Centrbēdzes ekstraktoriem ir neliels šķīdinātāja patēriņš, bet vienlaikus tie ir ļoti ražīgi (pat līdz 2,8 l/s). Ekstraktoros ērti apstrādāt viegli emulģejamus šķidrumus, kā arī šķidrumus ar nelielu blīvumu starpību. Centrbēdzes ekstraktoros plaši lieto antibiotisko preparātu rūpniecībā.

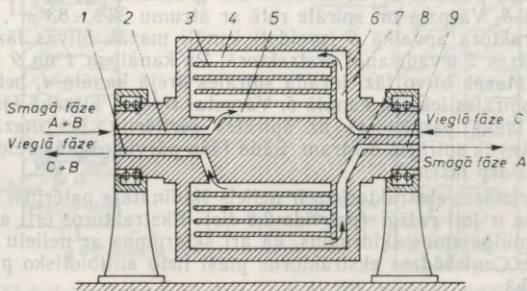
Centrbēdzes ekstraktoru trūkums — tie ir dārgi.



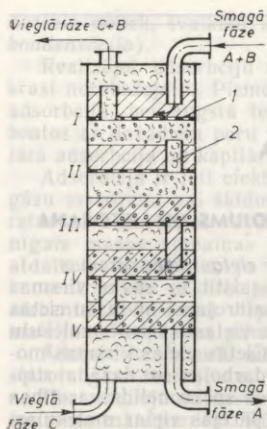
13.22. att. Pulsejošā šķidruma ekstraktoru shēmas.

Pakāpju ekstraktori. Šķīvju ekstraktori. Šķīvju ekstraktorus ar sietveida šķīvjiem lieto plaši. Ekstrakcijai lieto arī kaskādveida šķīvjus.

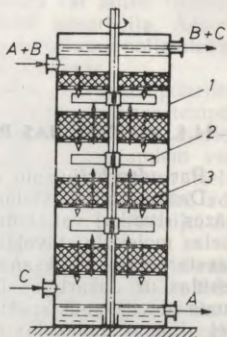
13.24. attēlā redzams šķīvju ekstraktors ar sietveida šķīvjiem 1 un pārteces caurulēm 2. Ekstraktorā blīvākā fāze atrodas uz šķīvva,



13.23. att. Centrālās ekstraktora shēma.



13.24. att. Šķīvju ekstraktors ar sietveida šķīvjiem.



13.25. att. Vertikālā maisīšanas—nostādināšanas ekstraktora shēma.

bet virs šīs fāzes atrodas mazāk blīvā fāze. Fāzes pārvietojas cauri sieta caurumiem un pa pārteces caurulēm. Cauri sieta caurumiem plūstošā fāze disperģējas. Disperģējoties blīvākajai fāzei, pilieni veidojas zem šķīvja (šķīvji I un II), bet, disperģējoties mazāk blīvākajai fāzei, pilieni rodas virs šķīvja (šķīvji III un IV). Šajās kolonnās notiek atkārtota fāzes disperģēšanās, piemēram, blīvākā frakcija uz šķīvja I disperģējas, plūstot cauri šķīvja caurumiem, bet, tuvojoties šķīvim II, šie pilieni saplūst blīvākās fāzes slānī, lai atkal no jauna disperģētos, plūstot cauri šķīvja II caurumiem, utt.

Attālums starp šķīvjiem 0,15...0,6 m. Šķīvju caurumu diametrs 1,5...10 mm, caurumu aktīvais šķēluma laukums 10% no kolonnas šķēluma. Šķīvju ekstraktoros masas apmaiņa ievērojami labāka nekā izsmidzināšanas ekstraktoros.

Maisīšanas—nostādināšanas ekstraktori. Šiem ekstraktoriem ir ļoti dažāds konstruktīvais izveidojums: ar mehāniskiem maisītājiem, sūkņiem, strūklas maisītājiem, dažāda veida nostādinātājiem un centriifūgām.

Vidējam un nelielam ražīgumam lietojami vertikālie ekstraktori. Lielam ražīgumam vairāk piemēroti horizontālie ekstraktori.

Vertikālais maisīšanas—nostādināšanas ekstraktors. Vertikālie maisīšanas—nostādināšanas ekstraktori ir dažāda izveidojuma. Viens no vienkāršākajiem šā veida ekstraktoriem redzams 13.25. attēlā. Ekstraktors sastāv no cilindra 1, kurā pa asi novietots vairākstāvu lāpstiņu maisītājs 2. Noteiktos attālumos starp maisītāja lāpstiņām izveidotas pildījuma kārtas 3 ar lielu brīvo tilpumu. Pildījuma kārtām ir nostādinātāju funkcijas.

14. ADSORBCIJA

14.1. ADSORBCIJAS PROCESA RAKSTUROJUMS UN LIETOŠANA

Par *adsorbciju* sauc *vielas saistišanu uz cietas fāzes virsmas*.

Dažām cietām vielām piemitošā spēja saistīt uz savas virsmas gāzes (tvaika) vai šķīduma molekulas izskaidrojama ar īpašu cietās vielas molekulu stāvokli uz virsmas. Cietās vielas iekšienē molekulu savstarpējās pievilkšanās spēki izlīdzinās. Cietās vielas virsmas molekulas uz apkārtējās fāzes molekulām iedarbojas ar dažāda stipruma pievilkšanās spēku. Šādas pievilkšanās spēku nelīdzsvarotības dēļ virsmas molekulas izturas citādi nekā pārējās vielas molekulas.

Ja virsmas molekulu rezultējošais pievilkšanās spēks vērsts uz vielas iekšieni, tad viela iegūst spēju uz savas virsmas saistīt citas molekulas no apkārtējās fāzes, kas atrodas kontaktā ar virsmu. Cieto vielu, kam piemīt šādas īpašības, sauc par *adsorbentu*. Saistītās molekulas pārklāj adsorbenta virsmu, tādēļ adsorbents spēj saistīt uz savas virsmas tikai noteiktu vielas daudzumu.

Pēc adsorbcijas spēku rakstura adsorbciju iedala *fizikālajā adsorbcijā* un *ķīmiskajā adsorbcijā* jeb *hemisorbcijā*.

Fizikālo adsorbciju nodrošina molekulu savstarpējās pievilkšanās spēki (van der Vālsa spēki), un šādu adsorbciju arī sauc par van der Vālsa adsorbciju. Molekulārie pievilkšanās spēki var noturēt uz fāžu saskares virsmas vairākas adsorbāta molekulu kārtas (*polimolekulārā adsorbcija*).

Ķīmiskās adsorbcijas jeb *hemisorbcijas* pamatā ir ķīmiskie spēki, un tās rezultātā veidojas virsmas savienojumi, kuri no ķīmiskajiem savienojumiem atšķiras ar to, ka virsmas molekulas, saistoties ar aktīvā komponenta molekulām, paliek adsorbenta kristāliskajā režģī. Tā kā hemisorbcijas norisei parasti ir nepieciešama attiecīga aktivācijas enerģija, tad hemisorbcija ir *aktīveta adsorbcija*. To, līdzīgi ķīmiskajai reakcijai, veicina temperatūras paaugstināšana, gaismas iedarbība u. c. Atšķirībā no fizikālās adsorbcijas, kas notiek ātri un ir pilnīgi atgriezeniska, ķīmiskā adsorbcija notiek ļoti lēni un adsorbēto vielu grūti atdalīt no adsorbenta.

Fizikālā adsorbcija atkarīga tikai no adsorbenta virsmas stāvokļa, bet ķīmiskā adsorbcija ir ļoti specifiska un atkarīga no adsorbenta un adsorbējamās vielas īpašībām.

Ja adsorbcijas rezultātā rodas virsmas savienojumi, tad uz adsorbenta virsmas veidojas monomolekulāra adsorbējamās vielas kārtā (*monomolekulārā adsorbcija*). Adsorbējamās vielas molekulas var pārklāt adsorbenta virsmu arī tikai daļēji. Tvaika adsorbcija

dažreiz notiek, tvaikam kondensējoties adsorbenta porās (*kapilārā kondensācija*).

Realizējot adsorbciju rūpniecībā, minētie adsorbcijas veidi nav krasi norobežojami. Piemēram, zemā temperatūrā var notikt fizikālā adsorbcija, bet augstā temperatūrā — aktivētā adsorbcija. Adsorbentos ar dažādiem poru izmēriem vienlaikus iespējama polimolekulārā adsorbcija un kapilārā kondensācija (sīkajās porās).

Adsorbcija ir ļoti efektīva metode, ja jāsadala vairākkomponentu gāzu maisījumi vai šķīdumi. Komponenti ar tuvām viršanas temperatūrām adsorbcijas rezultātā ir grūti atdalāmi. Adsorbcija ir vienkāršs masas apmaiņas process, kurā no gāzu maisījumiem var atdalīt komponentus, ja to koncentrācija ir zema. Augstām vielu koncentrācijām adsorbcija ir neekonomiska, jo bieži jāreģenerē adsorbents. Kombinējot vispirms adsorbciju un pēc tam adsorbciju, no maisījuma iespējams pilnīgi atdalīt vēlamo komponentu.

Adsorbciju izmanto analītiskām vajadzībām, lai kvantitatīvi raksturotu gāzu maisījumus vai šķīdumus. Šo metodi laboratorijās lieto ne tikai maisījumu sastāva noteikšanai, bet arī komponentu izdalīšanai no maisījumiem. Rūpniecībā adsorbciju lieto šķīdinātāju reģenerācijai, gāzu un šķīdumu žāvēšanai, dabasgāzu sadalīšanai (atdala propānu un butānu), eļļu un parafīna tīrīšanai, heterogēnai katalīzei u. c.

14.2. ADSORBENTI

Par adsorbentiem izmanto cietus porainus materiālus ar lielu virsmu.

Uz viena un tā paša adsorbenta dažādas vielas adsorbējas dažādi. Ja caur adsorbenta slāni plūst vairāku komponentu maisījums (gāze vai šķīdums), tad adsorbējas tie maisījuma komponenti, kuriem lielāka adsorbcijas spēja. Adsorbcijas procesa pamatā ir adsorbenta selektivitāte.

Sīkporainiem adsorbentiem ir liela īpatnējā virsma. To poru rādiuss ir līdz 6 nm. Rupjporainu adsorbentu poru rādiuss ir 6... 80 nm.

Sadalot lielmolekulāru vielu šķīdumus vai gāzu maisījumus, sīkporainā adsorbenta virsma netiek pilnīgi izmantota, jo poru niecīgo izmēru dēļ adsorbējamās molekulas nespēj nokļūt visu virsmu (neiekļūst porās). Sīko poru dēļ apgrūtināta arī molekulu difūzija, līdz ar to vajadzīgs ilgāks fāžu saskares laiks un lielāka iekārta. Sīkporainiem adsorbentiem apgrūtināta arī desorbcija.

Adsorbējamās vielas molekulu difūziju uz adsorbenta virsmas veicina adsorbenta graudu izmēru samazināšana. Smalkam adsorbentam nepieciešams īsāks laiks dinamiskā līdzsvara sasniegšanai. Tomēr pārmērīga adsorbenta graudu izmēru samazināšana rada lielu hidraulisko pretestību plūsmai, kas virzās cauri adsorbentam, un palielina adsorbenta daļiņu līdzraušanu ar gāzveida (šķidro) fāzi.

Rūpniecībā lieto adsorbentus (lodītes, cilindrus u. c.) ar graudu izmēriem 1...7 mm un pulverveida adsorbentus, kuriem daļiņu

izmērs mazāks par 0,125 mm (galvenokārt šķidrums adsorbcijai). Par adsorbentiem plaši lieto aktīvo ogli un silikagelu. Lieto arī aktīvo alumīnija oksīdu, alumosilikātus, dabiskos un sintētiskos ceolītus.

Aktīvā ogle. Aktīvo ogli iegūst no augu un dzīvnieku valsts materiāliem (koka, kūdras, riekstu čaumalām, kauliem, asinīm u. c.) sausās pārtvaices rezultātā. Sausajā pārtvaicē iegūtā ogle nav aktīva, jo tās poras aizpildītas ar darvu un citiem sausās pārtvaices produktiem.

Ogles īpatnējās virsmas palielināšanai to aktivē, izkarsējot līdz 900 °C temperatūrā, ekstrahējot ar šķīdinātājiem darvu no porām un oksidējot ogles virsmu ar skābekli, gaisu, ūdens tvaiku, oglekļa dioksīdu. Aktīvēšanu izdara arī, pāroglejot organiskās vielas cinka hlōrīda, sērskābes, fosforskābes un citu piedevu klātbūtnē.

Pēc īpatnējās virsmas, blīvuma un graudu lieluma aktīvo ogli iedala vairākās šķirās. Aktīvās ogles īpatnējā virsma ir 600... 1700 m²/g. Gaisa klātbūtnē aktīvā ogle lietojama temperatūrās līdz 200 °C. Inertā atmosfērā temperatūra var būt augstāka. Ja aktīvajai oglei pievieno nedaudz silikagela, tās termiskā izturība pieaug.

Atkarībā no lietošanas veida aktīvo ogli iedala šādi:

1) ogle gāzu un tvaiku saistīšanai: a) rekuperācijas ogle, kas lietojama organisko vielu tvaiku saistīšanai no gaisa (gāzēm); b) gāzmasku ogle; c) katalīzes (kontakta) ogle, ko lieto par katalizatoru ķīmiskās reakcijās;

2) ogle vielu saistīšanai no šķīdumiem: a) atkrāsošanas ogle, ko lieto šķīdrumu atkrāsošanai; b) medicīniskā ogle, ko izmanto gāzu, indīgu vielu adsorbcijai un lieto iekšķīgi.

Aktīvā ogle labi saista organisko vielu tvaikus, kā arī dažādus piemaisījumus no šķīdumiem.

Silikagels. Tas ir atūdeņots silīcijskābes gels, kurā ir 5...7% ūdens. Silikagelam ir vienāda izmēra vienmērīgi sadalītas poras. Atkarībā no poru lieluma silikagelu iedala sīkporainā (bērumsa 700 kg/m³), lielporainā (bērumsa 400...500 kg/m³) un silikagelā ar bērumsa starp sīkporaino un lielporaino silikagelu.

Silikagela īpatnējā virsma 200...900 m²/g. Silikagels ir hidrofilis materiāls, un tas uzsūc mitrumu līdz 50% no savas masas. Mītra silikagela adsorbācijas spēja pavājinās.

Silikagelu lieto gaisa un gāzu žāvēšanai, naftas gāzu un naftas produktu sadalīšanai. Silikagels labi iztur augstu temperatūru.

Adsorbācijas iekārtas izveidojums nav atkarīgs no tā, vai par adsorbentu lieto aktīvo ogli vai silikagelu. Atšķirība ir desorbcijā un regenerēšanā. Silikagela aktivitāte nedaudz mazāka par aktīvās ogles aktivitāti, bet tas darbojas ilgāk nekā ogle.

Ceolīti. Ceolītu kopējā ķīmiskā formula $Me_{2/n}O \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot yH_2O$, kur Me — sārnu metālu vai sārmezņu metālu katjoni; n — to oksidēšanas pakāpe. Ceolītiem ir regulāra poru struktūra (tos sauc par molekulāriem sietiem). Ceolīti saista tikai tādas vielas, kuru molekulas spēj izplūst cauri poru atverēm (piemēram, saista n -butānu, bet nesaista izobutānu). Molekulārie sieti labi darbojas, ja

adsorbējamam komponentam ir necīga koncentrācija. Jo ceolītos lielāka attiecība starp $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$, jo tie ir izturīgāki pret skābēm un temperatūras paaugstināšanu, kā arī katalitiski aktivāki.

Ceolīti atkarībā no atveru diametra iedalās divos veidos — ceolīti A (atveru diametrs 0,4...0,5 mm) un ceolīti X (atveru diametrs 0,8...0,9 mm). Atkarībā no katjoniem (K, Na, Ca) ceolītus iedala šādi: ceolīti KA, NaA, CaA, CaX, NaX. Piemēram, ceolīti KA adsorbē ievērojamos daudzumos tikai ūdeni, NaA saista komponentus no rūpniecības gāzēm ar molekulu izmēru $>0,4$ nm, CaA saista spirtus un ogļūdeņražus, ceolītus X lieto dažādu komponentu adsorbīcijai no jauktiem maisījumiem.

Adsorbenta statiskā un dinamiskā aktivitāte. Jebkuru adsorbentu raksturo *aktivitāte, kuru izsaka ar adsorbāta masu uz adsorbenta masas vai tilpuma vienību.*

Izšķir statisko un dinamisko aktivitāti jeb ietilpību.

Statisko aktivitāti raksturo tā adsorbāta masa, kuru saista adsorbents, līdz iestājas līdzsvars starp fāzēm.

Dinamisko aktivitāti raksturo tā adsorbāta masa, kuru saista adsorbents līdz brīdim, kad aizplūstošajā fāzē parādās adsorbējamais komponents.

Adsorbenta statisko un dinamisko aktivitāti izsaka kilogramos adsorbējamā komponenta uz 1 kg adsorbenta (vai arī kilogramos adsorbējamā komponenta uz 1 m^3 adsorbenta).

Adsorbenta statiskā un dinamiskā aktivitāte atkarīga no temperatūras un adsorbējamā komponenta koncentrācijas gāzveida (šķidrā) fāzē. Adsorbenta dinamiskā aktivitāte mazāka par statisko aktivitāti. Aktīvajai oglei rūpnieciskās iekārtās dinamiskā aktivitāte ir 85...95% no statiskās. Adsorbenta patēriņu nosaka pēc dinamiskās aktivitātes.

Adsorbīcijas izoterma un adsorbīcijas ātrums. Kvantitatīvi adsorbīcijas procesu raksturo adsorbīcijas izoterma.

Adsorbīcijas izoterma. Eksperimentāli pierādīts, ka adsorbētā komponenta masa X atkarīga no adsorbējamā komponenta daļējā spiediena p vai koncentrācijas Y un temperatūras t , kādā notiek process, t. i.,

$$X = f(p, t) = \varphi(Y, t).$$

Ja $t = \text{const}$, tad

$$X = f(p) = \varphi(Y).$$

Likni, kura izsaka šo funkciju, sauc par *adsorbīcijas izotermu*. Adsorbīcijas izoterma iegūst eksperimentāli, un tās raksturo procesa statiku. 14.1. attēlā parādītas adsorbīcijas izoterma divām temperatūrām. No liknēm redzams, ka adsorbētā komponenta masa pieaug, palielinoties adsorbējamā komponenta koncentrācijai (parciāla-

¹ Šajā nodaļā koncentrācijas apzīmētas šādi: adsorbentam ar X (vienībā kg/kg) vai C (vienībā kg/m^3), gāzveida (šķidrā) fāzei — ar Y (vienībā kg/kg) vai ar C_g (vienībā kg/m^3).

Adsorbcijas ātrums. Svarīgs adsorbcijas procesa raksturotājs ir *adsorbcijas ātrums*. Tas atkarīgs no *ārējās difūzijas*, t. i., no ātruma, ar kādu adsorbējamās vielas molekulas nokļūst uz adsorbenta virsmas, un no *iekšējās difūzijas*, t. i., no ātruma, ar kādu adsorbējamās vielas molekulas pārvietojas adsorbenta porās.

Adsorbcijas ātrumu var noteikt ārējā difūzija, iekšējā difūzija vai arī abas difūzijas vienlaikus. Atkarībā no tā, kāds difūzijas veids ir pārsvarā, adsorbcijas ātrumu iedala *ārējās difūzijas*, *iekšējās difūzijas* un *jauktās difūzijas adsorbcijas ātrumā*.

Ārējās difūzijas adsorbcijas ātrumu ietekmē plūsmas hidrodinamika (ātrums), temperatūra, adsorbenta graudu izmērs, šķidrās vai gāzveida fāzes viskozitāte, blīvums un difūzijas koeficients.

Iekšējās difūzijas adsorbcijas ātrumu ietekmē adsorbenta poru un graudu izmērs, adsorbējamā komponenta molekulu izmēri, temperatūra un citi faktori.

Molekulām pārvietojoties porās, notiek arī molekulu pārvietošanās pa adsorbenta virsmu (*virsmas difūzija*). Zemā temperatūrā molekulas adsorbējas uz virsmas aktīvajiem centriem. Temperatūrai paaugstinoties, molekulu svārstību amplitūda pieaug, un tās pārvietojas uz nākamajiem brīvajiem centriem. Šim procesam nepieciešama aktivācijas enerģija, un tā ātrums pieaug, paaugstinoties temperatūrai.

Adsorbcijas ātrumu jeb adsorbētā komponenta masu laika vienībā uz adsorbenta tilpuma vienību aprēķina, lietojot adsorbcijas kinētisko vienādojumu:

$$\frac{dC}{d\tau} = k_{yv}(C_g - C_g^*), \quad (14.1)$$

kur C — adsorbētā komponenta masa adsorbenta tilpumā (adsorbenta tilpuma aktivitāte), kg/m^3 ; C_g — adsorbējamā komponenta koncentrācija gāzveida (šķidrā) fāzē, kg/m^3 ; C_g^* — adsorbētā komponenta koncentrācija gāzu maisījumā, kas līdzsvarā ar koncentrāciju C_g , kg/m^3 ; k_{yv} — masas pārejas tilpuma koeficients pārejai no gāzes (šķidrums) uz adsorbentu.

Ja $\tau = 1$ s, $C_g - C_g^* = 1$ kg/m^3 , tad $C = k_{yv}$.

Masas pārejas tilpuma koeficients k_{yv} rāda, cik liela komponenta masa no gāzes (šķidrums) plūsmas pāriet uz 1 m^3 adsorbenta 1 sekundē, ja koncentrāciju starpība 1 kg/m^3 . Koncentrāciju starpībai 1 kg/m^3 jābūt starp adsorbējamā komponenta koncentrāciju gāzveida (šķidrā) fāzē un gāzveida fāzes koncentrāciju, kas ir līdzsvarā ar koncentrāciju C_g .

$$\text{Koeficienta } k_{yv} \text{ vienība } [k_{yv}] = \frac{[C]}{[\tau][\Delta C_g]} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^3}{\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}} = \text{s}^{-1}.$$

Masas pārejas tilpuma koeficients k_{yv} atkarīgs no ārējās un iekšējās difūzijas un to aprēķina pēc vienādojuma (10.56):

$$k_{yv} = \frac{1}{1/\beta_{yv} + A/\beta_{xv}}, \quad (14.2)$$

kur β_{yV} — masas atdeves tilpuma koeficients gāzveida (šķidrā) fāzē, s^{-1} ; β_{xV} — masas atdeves tilpuma koeficients cietajā fāzē, s^{-1} ; A — sadalījuma koeficients, $A = C_g^s / C_g^*$, kur C_g^s — adsorbējamā komponenta sākuma koncentrācija gāzveida fāzē, kg/m^3 ; C_g^* — adsorbējamā komponenta līdzsvara koncentrācija adsorbentā, kura ir līdzsvarā ar C_g^s , kg/m^3 .

Adsorbcijas procesos iekšējā difūzija ir tik liela, ka attiecība A/β_{xV} ir ļoti niecīga un to var ignorēt; tad $k_{yV} \approx \beta_{yV}$.

Koeficientu β_{yV} ievērojami ietekmē gāzes (šķidruma) plūsmas režīms, tādēļ tas atkarīgs no Reinaldsa kritērija.

Ja $Re = 2 \dots 30$, tad $Nu_d = 0,725 Re^{0,47} (Pr_d)^{0,33}$, ja $Re > 30$, tad $Nu_d = 0,395 Re^{0,64} (Pr_d)^{0,33}$, kur $Nu_d = \beta_{yV} d_{ekv} / D_y$ — Nuselta kritērijs difūzijai; $Re = 4\omega_0 / (a v_y)$ — Reinaldsa kritērijs graudainam slānim; $Pr_d = \nu_y / D_y$ — Prantla kritērijs difūzijai; $d_{ekv} = 4\epsilon / a$ — graudainā slāņa kanālu ekvivalentais diametrs, m (sk. vienādojumu (2.85)); D_y — gāzveida (šķidrās) fāzes difūzijas koeficients, m^2/s ; ω_0 — gāzveida (šķidrās) fāzes fiktīvais ātrums, m/s (sk. vienādojumu (2.90)); ν_y — plūsmas kinemātiskā viskozitāte, m^2/s ; a — adsorbenta slāņa ipatnējā virsma, m^2/m^3 (sk. vienādojumu (2.88)).

Adsorbcijas siltumefekts. Adsorbcija ir eksotermisks process. Adsorbcijas siltums gāzveida (tvaika) fāzei tuvs kondensācijas siltumam. Siltums, kas izdalās aktivētās adsorbcijas rezultātā, ir ievērojami lielāks nekā fizikālās adsorbcijas gadījumā. Dažu organisko savienojumu adsorbcijas siltumi sakopoti 14.1. tabulā.

14.1. tabula

Dažu organisko savienojumu adsorbcijas siltumi,
ja adsorbents ir aktīvā ogle

Vielā	Formula	Adsorbcijas siltums, $\cdot 10^{-3}$ kJ/kg
Benzols	C_6H_6	789,8
Dihlormetāns	CH_2Cl_2	611,3
Etilēteris	$(C_2H_5)_2O$	877,8
Etilspirts	C_2H_5OH	1366,0
Metilhlorīds	CH_3Cl	763,4
Metilspirts	CH_3OH	1715,0
Tetrahlorogliklis	CCl_4	415,2

Adsorbcijas siltumu (uz vienu molu gāzes) var noteikt, izmantojot Trutona formulu:

$$\frac{r_a}{\sqrt{T_k}} = const,$$

kur r_a — adsorbcijas siltums, kJ/mol; T_k — adsorbējamās vielas viršanas temperatūra atmosfēras spiedienā, K; konstantes skaitliskā vērtība atkarīga no adsorbenta (aktīvajai oglei 2184).

Adsorbcijas siltums aprēķināms arī šādi:

$$r_a = 44 \frac{\lg \frac{p_2}{p_1}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}},$$

kur p_1, p_2 — adsorbējamā komponenta parciālais spiediens virs adsorbenta temperatūrās T_1 un T_2 .

14.3. ADSORBCIJAS PROCESA MATERIĀLĀ BILANCE

Adsorbcijas procesa materiālo bilanci izsaka ar kopējo masas apmaiņas procesa materiālo bilanci (sk. vienādojumu (10.18)).

$$G = G_y(Y_s - Y_b) = G_x(X_b - X_s), \quad (14.3)$$

kur G — adsorbētā komponenta masa sekundē, kg/s; G_y — adsorbcijai pievadītās gāzveida (šķidrās) fāzes patēriņš, kg/s; Y_s, Y_b — gāzveida (šķidrās) fāzes sākuma un beigu koncentrācija, kg/kg; G_x — adsorbenta patēriņš, kg/s; X_s, X_b — adsorbējamā komponenta koncentrācija adsorbentā adsorbcijas sākumā un beigās, kg/kg.

No vienādojuma (14.3) var aprēķināt stacionārā slāņa adsorbieriem nepieciešamo adsorbenta masu, ievietojot patēriņu G_y un G_x vietā attiecīgās masas m_y, m_x , tad

$$m_x = m_y \frac{Y_s - Y_b}{X_b - X_s}$$

kur m_y — gāzveida fāzes masa, kg; m_x — adsorbenta masa, kg.

Nepārtrauktas darbības adsorbieriem īpatnējo adsorbenta patēriņu nosaka pēc izteiksmes

$$b = \frac{G_x}{G_y} = \frac{Y_s - Y_b}{X_b - X_s},$$

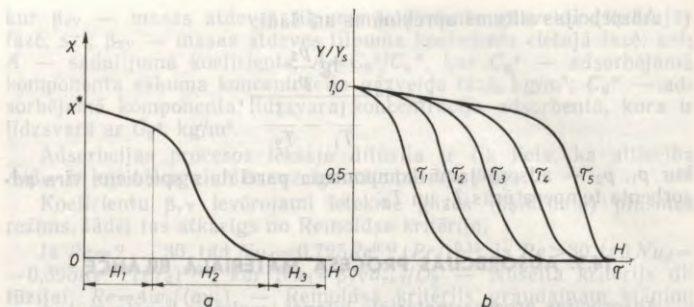
kur b — īpatnējais adsorbenta patēriņš, kg/kg.

Pēc vienādojuma (14.3) var aprēķināt arī sekundē adsorbēto masu G .

No minētajiem vienādojumiem redzams — jo lielāka adsorbenta koncentrācija X_b un mazāka koncentrācija X_s (t. i., cik pilnīgi adsorbents desorbēts), jo mazāks tā patēriņš. Adsorbenta patēriņš samazinās, jo zemāka koncentrācija Y_s un augstāka koncentrācija Y_b . Adsorbenta patēriņš ietekmē procesa ekonomiskos rādītājus, tādēļ uz adsorbciju ieteicams aizvadīt gāzveida (šķidro) fāzi ar iespējami zemāku vielas sākuma koncentrāciju Y_s .

Materiālā bilance adsorbcijai ar suspendētu slāni izsakāma arī šādi:

$$(1 - \epsilon_0) H d C / d \tau = w_0 / (\epsilon_0 (C_g^s - C_g^*)), \quad (14.4)$$



14.2. att. Adsorbējamā komponenta koncentrācijas maiņa adsorbenta slānī (shēma).

kur ϵ_0 — adsorbenta slāņa porainība, m^3/m^3 ; H — adsorbenta slāņa augstums, m ; C — adsorbenta tilpuma aktivitāte, kg/m^3 ; τ — adsorbcijas ilgums līdz līdzsvaram, s ; ω_0 — gāzveida (šķidrās) fāzes fiktīvais ātrums, m/s ; C_g^s, C_g^* — gāzveida (šķidrās) fāzes sākuma koncentrācija un tai atbilstošā līdzsvara koncentrācija, kg/m^3 .

Koncentrācijas frontes veidošanās un pārvietošanās, masas apmaiņas josla un slāņa aiztures laiks. Adsorbcijā līdz ar laiku mainās adsorbenta piesātinātība un adsorbējamā komponenta koncentrācija gāzes (šķidrās) fāzē pa adsorbenta slāņa augstumu. Šo adsorbējamā komponenta sadalījumu starp fāzēm laika un telpas ziņā var izskaidrot šādi.

Gāzes plūsma ar nemainīgu adsorbējamā komponenta koncentrāciju Y_s ieplūst adsorbenta svaigajā adsorbenta slānī ($X=0$). Adsorbējamā viela adsorbējas pirmajā, pēc tam otrajā, trešajā utt. adsorbenta slāņa joslā. Katru nākamo joslu apskalo plūsma, kurā adsorbējamā komponenta koncentrācija $Y < Y_s$, jo daļu no tā saista iepriekšējās joslas. Tad, kad pilnīgi piesātināta pirmā josla, tā atslēdzas un gāze ar koncentrāciju Y_s sāk apskalot otro joslu, pēc tam trešo.

Adsorbcijas norises laikā pa adsorbenta slāņa augstumu H var izdalīt trīs joslas (14.2. att. a): 1) piesātinātā adsorbenta josla (augstums H_1), kurā sasniegta adsorbenta piesātinātība X^* (koncentrācija ir līdzsvarā ar gāzes plūsmas koncentrāciju Y_s); 2) aktīvā josla (augstums H_2), kura vēl nav piesātināta un kurā adsorbcijas process turpinās; 3) josla, kura vēl nepiedalās adsorbcijas procesā (augstums H_3).

Adsorbenta piesātināšana pirmajā joslā notiek ar dilstošu adsorbcijas ātrumu, jo, tuvojoties adsorbenta koncentrācijai X^* , nepārtraukti samazinās procesa virzošais spēks. Laiku τ_0 , kad notiek adsorbenta slāņa pirmās joslas piesātināšana, sauc par pirmo periodu, kurā veidojas *stacionāra koncentrācijas fronte*.

Sākot no momenta $\tau = \tau_0$ (ar augstumu H_1), adsorbenta darbojošā joslā izveidojas noteikts koncentrācijas sadalījums abās fāzēs, un šī

stacionārā koncentrācijas fronte ar nemainīgu ātrumu pārvietojas paralēli pati sev, atstājot aiz sevis augošu piesātinātu adsorbenta slāni.

Ja slāņa augstums $H = H_1 + H_2$, gāze aizplūst ar beigu koncentrāciju $Y_b = 0$. Ja $H < H_1 + H_2$, tad $Y_b > 0$, t. t., izplūstošajā gāzē (šķīdumā) parādās adsorbējamais komponents. Laika sprīdi no gāzes ieplūdes adsorbenta slānī līdz izplūdei ar koncentrāciju $Y_b = 0$ (līdz sākas adsorbējamā komponenta izplūde) sauc par *slāņa aiztures (aizsargdarbības) laiku*.

14.2. attēlā *b* redzamas liknes, kas raksturo adsorbējamā komponenta relatīvās koncentrācijas Y/Y_s maiņu plūsmā pa adsorbenta slāņa augstumu vai laikā. Šādu likni sauc par *izejas likni*.

Pēc šī vienkāršotā periodiskās adsorbcijas modeļa var labāk izprast adsorbcijas procesus.

14.4. DESORBCIJA

Adsorbētā komponenta atdalīšanai no adsorbenta izmanto desorbciju. Rūpniecībā adsorbcijas iekārtās vienmēr pēc adsorbcijas notiek adsorbenta reģenerācija, t. i., adsorbenta adsorbcijas spēju atjaunošana. Parasti adsorbenta reģenerācijā ietilpst *desorbcija, adsorbenta žāvēšana un dzesēšana*.

Adsorbcijas iekārtas veidotas tā, lai būtu iespējams realizēt adsorbenta reģenerāciju (desorbciju).

Desorbciju var realizēt dažādi.

1. Adsorbentu desorbē, caurpūšot adsorbenta slāni ar karstām gāzēm vai ar pārkarsētu tvaiku. Šajos gadījumos noteicošais faktors ir temperatūra. Ja temperatūra par zemu, nenotiek pilnīga desorbcija, ja temperatūra par augstu, iespējama adsorbenta struktūras maiņa.

2. Adsorbēto komponentu no adsorbenta virsmas izspiež ar citiem komponentiem, kam augstāka adsorbcijas spēja. Piemēram, adsorbējot gāzveida ogļūdeņražus, par desorbējošo agentu lieto ūdens tvaiku. Ogļūdeņražu molekulas uz adsorbenta virsmas aizvieto ūdens molekulas, izdalās tvaika kondensācijas siltums, kas paaugstina adsorbenta temperatūru un veicina desorbciju. Lai pilnīgi atjaunotu adsorbenta adsorbcijas spējas, tas jāatbrīvo no kondensāta. Tādēļ adsorbentu žāvē, bet pēc tam dzesē līdz adsorbcijas temperatūrai.

3. Adsorbentu desorbē, pazeminot spiedienu (vakuumā).

4. Adsorbenta adsorbcijas spējas atjauno, oksidējot (sadedzinot) adsorbēto vielu. Šo metodi lieto tad, ja vielai ir liela adsorbcijas spēja un adsorbētās vielas sadedzināšana ekonomiskā ziņā ir atļaujama.

Adsorbenta reģenerācija ir energoietilpīgs process, un tas bieži izšķir, vai konkrētajā gadījumā adsorbcija ir ekonomiski izdevīga.

Desorbcijas rezultātā adsorbenta aktivitāte var atjaunoties pilnīgi vai daļēji. Tas atkarīgs no desorbcijas režīma un adsorbētā komponenta. Adsorbenta aktivitāte pirmajās reģenerācijas reizēs

samazinās par 10...20% no sākuma aktivitātes. Nākamajos reģenerācijas ciklos aktivitātes samazināšanās notiek lēnāk. Desorbējot ar polāriem šķīdinātajiem vai adsorbēto vielu oksidējot, adsorbenta aktivitāte zūd maz.

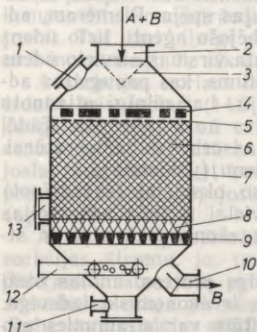
Desorbēšanas ilgums ir isāks par adsorbēšanas norises laiku, jo notiek augstākās temperatūrās. Ja reģenerāciju veic, adsorbēto vielu oksidējot, silikagelam pieļaujamā temperatūra ir 300...350 °C, alumosilikātiem 600...650 °C. Reģenerējot aktīvo ogli ar ūdens tvaiku, maksimālā temperatūra ir 200 °C.

14.5. ADSORBERI UN ADSORBĒŠANAS IEKĀRTU TEHNOLOĢISKĀS SHĒMAS

Ķīmiskajā rūpniecībā adsorberus iedala pēc adsorbenta stāvokļa: *adsorberos ar stacionāru adsorbenta slāni, ar plūstošu adsorbenta slāni un ar suspendētu adsorbenta slāni.*

Adsorberi ar stacionāru adsorbenta slāni. Šie adsorberi pēc savas uzbūves ir vienkārši — tie ir vertikāli vai horizontāli cilindri 7 (14.3. att.). Cilindrā (diametrs 2...3 m) ievietots režģis 9, virs kura atrodas siets (vairākās kārtās), porainas keramikas plāksnes (0,1 m) vai oļu slānis 8 (50...300 mm). Virs sieta (plāksņu, oļu slāņa) sabērta adsorbenta slānis 6 (augstums 0,5...1,2 m). Lai plūsma neaiznestu līdz adsorbentu, virs adsorbenta slāņa novietots siets 5. Virs sieta sakrauti čuguna stieņi 4.

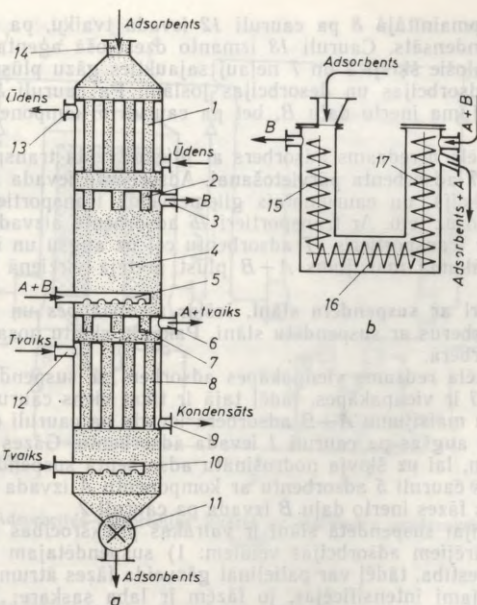
14.3. attēlā redzamajā adsorbērā ar stacionāru adsorbenta slāni gāzu maisījumu *A+B* ievada no augšas pa cauruli 2 caur sietu 3. Gāzes inerto daļu *B* izvada pa cauruli 10. Pa caurumoto cauruli 12 desorbēšanas procesā ievada desorbēšanas aģentu (ūdens tvaiku, karstu gaisu). Kondensātu novada pa cauruli 11. Lūkas 1 un 13 izmanto adsorbenta iekraušanai un izkraušanai.



14.3. att. Adsorbēšanas iekārta ar stacionāru adsorbenta slāni.

Horizontālos adsorberus ķīmiskajā rūpniecībā lieto reti. Biežāk lieto gredzenveida adsorberus ar stacionāru adsorbenta slāni — vertikālus cilindrus, kuru diametrs līdz 3,2 m, augstums līdz 8 m. Adsorbenta slānim ir gredzenveida šķērsriezums. Tas ievērojami paaugstina adsorbēšanas ražīgumu un samazina slāņa hidraulisko pretestību.

Ja adsorbēšanas un desorbēšanas laikā nepieciešama siltumapmaiņa, tad lieto cauruļveida adsorberus, kas konstruktīvi līdzīgi cauruļveida siltumapmaiņtājiem (sk. 8.5. att.). Caurulēs ievieto graudainu adsorbentu. Starpcauruļu telpā ievada dzesēšanas vai sildīšanas aģentu (pēc vajadzības).



14.4. att. Adsorbērs ar plūstošu adsorbenta slāni.

Adsorbēri ar plūstošu adsorbenta slāni. Pilnīgāk adsorbentu izmanto adsorbēros ar plūstošu adsorbenta slāni. Šie adsorbēri iedalāmi kolonnu aparātos un aparātos ar mehāniskiem transportieriem.

Kolonnas adsorbērs ar plūstošu adsorbenta slāni redzams 14.4. attēlā. Šis adsorbērs ir vertikāla kolonna ar cauruļveida dzesinātāju 1, siltumapmainītāju 8 un diviem sadalošiem šķīvjiem 2 un 7. Adsorbentu ievada adsorbērā no augšas pa pievadu 14. Nepārtrauktu adsorbenta plūsmu panāk ar dozatoru 11. Adsorbentu vispirms atdesē dzesinātājā 1 un cauri sadalošajam šķīvim 2 ievada kolonnas adsorbēcijas joslā 4. Adsorbents, saskaroties ar gāzu maisījumu $A+B$, kas ieplūst pa cauruli 5, adsorbē komponentu A . Adsorbēcijas joslas apakšējā daļā plūstošais adsorbents ir piesātināts ar komponentu A un cauri apakšējam sadalošajam šķīvim 7 ieplūst desorbēcijas joslā. Desorbēcijas joslā adsorbents, plūzdams cauri siltumapmainītājam 8, sakarst. Pa cauruli 10 desorbēcijas joslā ievada desorbēcijas aģentu (ūdens tvaiku). Desorbēto adsorbentu no adsorbēra aizvada dozators 11 uz žāvēšanu un dzesēšanu (14.4. attēlā tas nav parādīts). Reģenerēto adsorbentu aizvada atpakaļ uz adsorbēru, galīgo dzesēšanu veic dzesinātājs 1.

Siltumapmainītājā 8 pa cauruli 12 ievada tvaiku, pa cauruli 9 aizplūst kondensāts. Cauruli 13 izmanto dzesējošā aģenta aizvadišanai. Sadalošie šķīvji 2 un 7 neļauj sajaukties gāzu plūsmām, kas plūst no adsorbcijas un desorbcijas joslām. Pa cauruli 3 aizvada gāzu maisījuma inerto daļu B, bet pa cauruli 6 komponentu A un tvaiku.

14.4. attēlā b redzams adsorbērs ar gliemežveida transportieriem 15, 16 un 17 adsorbenta pārvietošanai. Adsorbentu ievada adsorbēra kreisajā sekcijā, un caurumotais gliemežveida transportieris 15 to lēni pārvieto uz leju. Ar transportieri 16 adsorbentu aizvada uz labo sekciju, kur transportieris 17 adsorbentu ceļ uz augšu un izvada no aparāta. Sākuma maisījums A+B plūst pretējā virzienā nekā adsorbents.

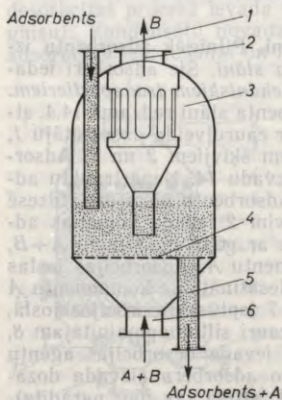
Adsorbēri ar suspendētu slāni. Izšķir *vienpakāpes* un *vairākpakāpju* adsorbērus ar suspendētu slāni. Pakāpju skaitu nosaka šķīvju skaits adsorbērā.

14.5. attēlā redzams vienpakāpes adsorbērs ar suspendētu slāni. Adsorbērs 3 ir vienpakāpes, tādēļ tajā ir tikai viens caurumots šķīvis 4. Gāzu maisījumu A+B adsorbērā ievada pa cauruli 6. Pretējā virzienā no augšas pa cauruli 1 ievada adsorbentu. Gāzes ātrumam jābūt tādā, lai uz šķīvja nodrošinātu adsorbenta suspendētu slāni. Pa pārteces cauruli 5 adsorbentu ar komponentu A izvada uz desorbēru. Gāzes fāzes inerto daļu B izvada pa cauruli 2.

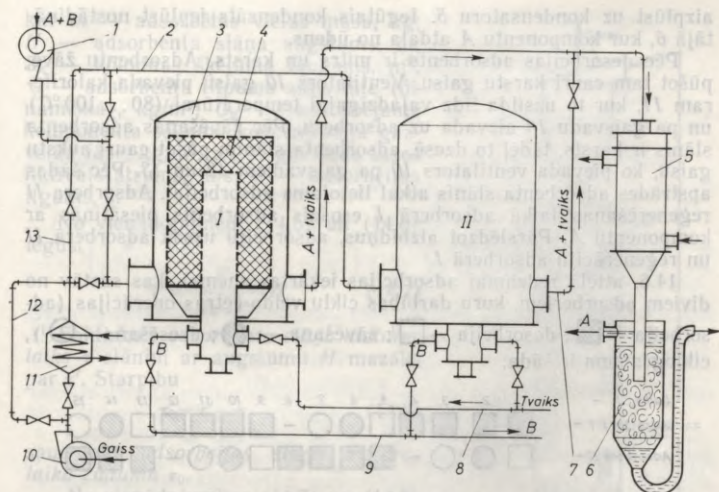
Adsorbēcijai suspendētā slānī ir vairākas priekšrocības salīdzinājumā ar pārējiem adsorbēcijas veidiem: 1) suspendētajam slānim ir neliela pretestība, tādēļ var palielināt gāzveida fāzes ātrumu; 2) process ievērojami intensificējas, jo fāzēm ir laba saskare; 3) adsorbenta vietēja pārkaršana nenotiek, jo temperatūra izlīdzinās vienmērīgi pa visu slāni; 4) adsorbentu viegli pārvietot no šķīvja uz šķīvi vai no viena aparāta uz otru.

Tomēr adsorbēcijai suspendētā slānī ir arī trūkumi: 1) adsorbenta graudi suspendētā slānī tiek berzti, tādēļ lietojams tikai mehāniski izturīgs adsorbēns; 2) aizplūstošajai gāzei saskaroties ar piesātinātu adsorbentu, iespējama daļēja desorbēcija.

Adsorbēcijas—desorbēcijas iekārtu tehnoloģiskās shēmas. Realizējot adsorbēcijas procesu, jebkurā iekārtā veic šādas tehnoloģiskas operācijas: 1) *adsorbēciju* — gāzveida (šķidrājai) fāzei kontaktējoties ar adsorbentu, adsorbējamais komponents pārvietojas uz cietās fāzes virsmu; 2) *desorbēciju* — adsorbentam saskaroties ar desorbējošo aģentu (tvaiku, karstām gāzēm u. c.), atdalās



14.5. att. Vienpakāpes adsorbērs ar suspendētu slāni.



14.6. att. Adsorbcijas—desorbcijas iekārta ar stacionāru gredzenveida adsorbenta slāni.

adsorbētais komponents; 3) *adsorbenta sagatavošanu atkārtotai darbībai (žāvēšana, dzesēšana).*





Aplūkotās procesa stadijas realizējamas ar stacionāru vai plūstošu adsorbenta slāni. Procesā ar stacionāru adsorbenta slāni periodiskas darbības iekārtā šīs operācijas notiek vienā aparātā (adsorberā).

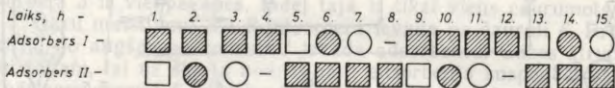
Nepārtrauktas darbības iekārtās ar stacionāru adsorbenta slāni divi vai vairāki (līdz seši) adsorberi saslēgti paralēli. Vienā aparātā notiek adsorbcija, otrā desorbcija, žāvēšana vai dzesēšana. Adsorberu skaits shēmā atkarīgs no iekārtas darba grafika (ciklogrammas), kuru sastāda, vadoties no adsorbera ražīguma un atsevišķo darba ciklu ilguma.

14.6. attēlā redzama adsorbcijas iekārtas shēma adsorbcijai ar stacionāru adsorbenta slāni. Shēmā parādīts (griezumā) adsorbers 3 ar stacionāru gredzenveida adsorbenta slāni 4. Gāzu maisījumu ar ventilatoru vai gāzpūtēju 1 (atkarībā no iekārtas pretestības) ievada adsorberā I. Gāzveida (šķidrājam) fāzei plūstot cauri adsorbenta slānim 4, notiek adsorbcija. Adsorbējamo komponentu A saista adsorbenta slānis, bet gāzes inertā daļa B aizplūst no adsorbera pa cauruli 9. Kad adsorberā I notiek adsorbcija, adsorberā II pa cauruli 8 ievada ūdens tvaiku (ar spiedienu 0,3...0,5 MPa) komponenta A desorbcijai. Desorbāts kopā ar ūdens tvaiku pa cauruli 7

aizplūst uz kondensatoru 5. Iegūtais kondensāts ieplūst nostādinātājā 6, kur komponentu *A* atdala no ūdens.

Pēc desorbcijas adsorbents ir mitrs un karsts. Adsorbentu žāvē, pūšot tam cauri karstu gaisu. Ventilators 10 gaisu pievada kaloriferam 11, kur to uzsilda līdz vajadzīgajai temperatūrai (80...100°C) un pa gaisvadu 13 aizvada uz adsorberu. Pēc žāvēšanas adsorbenta slānis ir karsts, tādēļ to dzesē, adsorbenta slānim pūšot cauri aukstu gaisu, ko pievada ventilators 10 pa gaisvadiem 12 un 13. Pēc šādas apstrādes adsorbenta slānis atkal lietojams adsorbcijai. Adsorbera II reģenerēšanas laikā adsorberā I esošais adsorbents piesātinās ar komponentu *A*. Pārslēdzot aizbīdņus, adsorbciju uzsāk adsorberā II un reģenerāciju adsorberā I.

14.6. attēlā redzamai adsorbcijas iekārtas shēmai, kas sastāv no diviem adsorberiem, kuru darbības ciklu veido četras operācijas (adsorbcija — ; desorbcija — ; žāvēšana — ; dzesēšana — ), ciklogramma ir šāda:



Iekārtas ar plūstošu adsorbenta slāni ir nepārtrauktas darbības, ekonomiskas un viegli automatizējamas. 14.7. attēlā redzama nepārtrauktas darbības adsorbcijas iekārta ar suspendētu slāni. Adsorbērs 3 ir četrpakāpju (četri adsorbcijas šķīvji). Adsorbērs sastāv no divām daļām: augšējās daļas — adsorbera 3 un apakšējās daļas — desorbera 5. Augšējās šķīvjus 2 adsorbcijas daļā izmanto adsorbenta dzesēšanai. Adsorbcijas daļas darbība analoga vienpakāpes adsorbēra darbībai.

Zem adsorbēra pamata *a* sākas desorbērs 5. No adsorbēra apakšējā šķīvja piesātinātais adsorbents pa pārteces cauruli 9 nokļūst uz desorbēra augšējā šķīvja. Pretī adsorbentam pa cauruli 8 ievada desorbējošo aģentu (karstu gaisu, pārkarsētu tvaiku). Tas ar desorbātu (komponentu *A*) aizplūst no iekārtas pa cauruli 4. No desorbēra apakšējā šķīvja desorbēts adsorbents cauri dozatoram 7 nokļūst pneimotransporta caurulē 6 un tiek aizvadīts uz ciklonu 1, no kura tas atkal atgriežas adsorberā. Sākuma maisījumu adsorberā pievada pa cauruli 10. Inerto gāzes fāzes daļu izvada no adsorbēra pa cauruli 11.

14.6. ADSORBERU APRĒĶINU METODES

Adsorbcija ar stacionāru adsorbenta slāni. Adsorbētā komponenta masa, ja slāņa augstums *H* un kolonnas šķēluma laukums *S_k*, ir

$$m = CS_k H \quad \text{jeb} \quad (14.5)$$

$$m = C_g^s S_k \omega_0 t', \quad (14.6)$$

kur m — adsorbētās vielas masa, kg;
 H — adsorbenta slāņa augstums, m;
 S_k — kolonnas šķēluma laukums, m²;
 C — adsorbenta tilpuma aktivitāte (dinamiskā), kg/m³; C_g^s — adsorbējamā komponenta sākuma koncentrācija gāzveida fāzē, kg/m³; ω_0 — gāzveida fāzes fiktīvais ātrums, m/s; τ' — adsorbcijas ilgums, s.

No vienādojumiem (14.5) un (14.6) iegūst

$$\tau' = \frac{C}{\omega_0 C_g^s} H. \quad (14.7)$$

Faktiskais adsorbenta slāņa aiztures laiks τ slānim ar augstumu H mazāks par τ' . Starpību

$$\tau_0 = \tau' - \tau \quad (14.8)$$

sauc par adsorbcijas slāņa aiztures laika zudumu τ_0 .

No vienādojumiem (14.7) un (14.8) iegūst, ka faktiskais adsorbcijas slāņa aiztures laiks

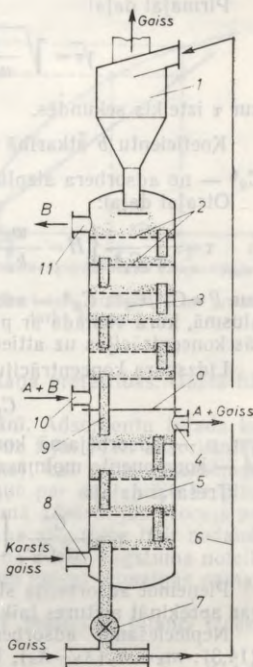
$$\tau = \frac{C}{\omega_0 C_g^s} H - \tau_0,$$

kur $\frac{C}{\omega_0 C_g^s} = K_a$ sauc par adsorbcijas slāņa aiztures laika koeficientu, tad

$$\tau = K_a H - \tau_0.$$

Realizējot adsorbciju ar stacionāru adsorbenta slāni, procesa ilgums atkarīgs no tā, kādā adsorbcijas izoterma daļā notiek adsorbcija. Adsorbcijas izoterma iedalāma trīs daļās: pirmā daļa raksturojama ar attiecību $p/p_p < 0,17$ (benzolam), otrā daļa — $p/p_p \approx 0,17 \dots 0,50$, bet trešā daļa — $p/p_p > 0,50$, kur p — adsorbējamā komponenta tvaika parciālais spiediens, Pa; p_p — adsorbējamā komponenta piesātinātā tvaika spiediens, Pa.

Nosakot adsorbcijas procesa ilgumu, no adsorbcijas izoterma un dotās gāzveida (šķidrās) fāzes koncentrācijas C_g^s nosaka adsorbenta līdzsvara koncentrāciju C^* . No attiecības $\frac{C_g^s}{C^*}$ (ekvivalenta ar $\frac{p}{p_p}$) nosaka, kādai izoterma daļai atbilst koncentrācija C_g^s . Masas pārejas tilpuma koeficientu k_{yV} aprēķina pēc vienādojuma (14.2). Atkarībā no tā, kādā izoterma daļā atrodas C_g^s , adsorbcijas ilgumu τ aprēķina šādi.



14.7. att. Nepārtrauktas darbības adsorbcijas iekārta ar suspendētu slāni.

Pirmajai daļai

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\frac{C^*}{\omega_0 C_g^s}} \sqrt{H-b} + \sqrt{\frac{C^*}{k_{yV} C_g^s}}$$

kur τ izteikts sekundēs.

Koeficientu b atkarībā no attiecības $\frac{C_g^b}{C_g^s}$ iegūst no 14.2. tabulas; C_g^b — no adsorbēra aizplūstošās fāzes koncentrācija, kg/m^3 .

Otrajai daļai:

$$\tau = \frac{C^*}{\omega_0 C_g^s} \left\{ H - \frac{\omega_0}{k_{yV}} \left[\frac{1}{P} \ln \left(\frac{C_g^s}{C_g^b} - 1 \right) + \ln \frac{C_g^s}{C_g^b} - 1 \right] \right\},$$

kur $P = C_g^s / C_g^*$; C_g^* — adsorbējamā komponenta koncentrācija gāzes plūsmā, kura vienāda ar pusi no adsorbējamā komponenta maksimālās koncentrācijas uz attiecīgā adsorbenta, kg/m^3 .

Līdzsvara koncentrāciju C_g^* aprēķina šādi:

$$C_g^* = 1,6 \cdot 10^{-2} pM/T,$$

kur p — adsorbējamā komponenta tvaika parciālais spiediens, Pa; M — komponenta molmasa, kg/mol ; T — adsorbēcijas temperatūra, K.

Trešajai daļai:

$$\tau = \frac{C^*}{\omega_0 C_g^s} \left[H - \frac{\omega_0}{k_{yV}} \left(\ln \frac{C_g^s}{C_g^b} - 1 \right) \right].$$

Pieņemot adsorbenta slāņa augstumu H , no minētajām formulām var aprēķināt aiztures laiku τ — vai arī otrādi.

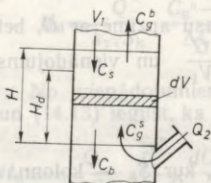
Nepieciešamā adsorbenta masa aprēķināma no vienādojuma (14.3): $m_x = m_y (X_b - X_s)$, bet adsorbenta tilpums $V = m_x / \rho$, kur ρ — adsorbenta bēruma blīvums, kg/m^3 .

Ja zināms adsorbenta slāņa augstums H , tad adsorbēra diametrs $D \approx 1,13 \sqrt{V/H}$. Rūpniecībā lietojamiem adsorbēriem diametrs ir līdz 3 m, bet augstums — līdz 10 ... 12 m. Adsorbēra augstums atkarīgs

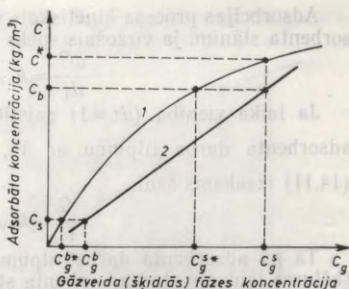
14.2. tabula

Koeficienta b vērtības

$\frac{C_g^b}{C_g^s}$	b	$\frac{C_g^b}{C_g^s}$	b
0,005	1,84	0,400	0,23
0,010	1,67	0,500	0,07
0,030	1,35	0,600	-0,10
0,050	1,19	0,700	-0,27
0,100	0,94	0,800	-0,46
0,200	0,63	0,900	-0,68
0,300	0,42		



14.8. att. Adsorbcijas kolonna ar plūstošu adsorbenta slāni.



14.9. att. Adsorbcijas izoterma 1 un procesa darba taisne 2.

no adsorbenta mehāniskās izturības un slāņa pretestības. Gāzes fiktīvo ātrumu izvēlas 0,1 ... 0,2 m/s.

Adsorbcija ar plūstošu adsorbenta slāni. Adsorbentu ievada kolonnā no augšas, un tas lēni pārvietojas uz leju. Pretī adsorbentam no apakšas uz augšu plūst gāze (šķidrums), kas satur adsorbējamo komponentu (14.8. att.). Šādu procesu sauc par adsorbciju ar plūstošu adsorbenta slāni. Aplūkojamā gadījumā adsorbcijas process notiek nepārtraukti. Plūstošā adsorbenta slāņa augstums H ir nedaudz lielāks par slāņa darba augstumu H_d . Slāņa darba augstuma noteikšana pamatojas uz 10. nodaļā apskatītajiem masas apmaiņas pamatprincipiem.

Bezgalīgi mazam slāņa elementam dV materiālo bilanci izsaka šādi:

$$V_1 dC = -Q dC_g, \quad (14.9)$$

kur V_1 — adsorbenta tilpums laika vienībā; Q — gāzes (šķidrums) caurtece; dC un $-dC_g$ — adsorbāta koncentrācija tilpuma vienībā un gāzes (šķidrums) koncentrāciju starpība slānī dV .

Vienādojumu (14.9) integrējot robežās no C_s līdz C_b un no C_g^s līdz C_g^b , iegūst

$$\int_{C_s}^{C_b} V_1 dC = - \int_{C_g^s}^{C_g^b} Q dC_g \quad \text{vai} \\ V_1 (C_b - C_s) = Q (C_g^s - C_g^b). \quad (14.10)$$

So vienādojumu sauc par *adsorbcijas procesa darba taisnes vienādojumu*, un šī taisne velkama caur punktiem ar koordinātām C_g^s , C_b un C_g^b , C_s (14.9. att.). Adsorbcijas virzošais spēks procesa sākumā vienāds ar $C_g^s - C_g^{s*}$, bet pie izplūdes — ar $C_g^b - C_g^{b*}$. Pa slāņa augstumu procesa virzošais spēks ir mainīgs, tādēļ adsorbcijas iekārtu aprēķinos lieto vidējo virzošo spēku ΔC_{vid} .

Adsorbcijas procesa kinētiskais vienādojums (14.1) plūstošam adsorbenta slānim, ja virzošais spēks ir mainīgs:

$$\frac{dC}{d\tau} = k_{yv} \Delta C_{vid}. \quad (14.11)$$

Ja laika vienībā ($d\tau=1$) saistīto vielas masu apzīmē ar G , bet adsorbenta darba tilpumu ar V_1 , tad $dC = \frac{G}{V_1}$ un vienādojums (14.11) izsakāms šādi:

$$\frac{G}{V_1} = k_{yv} \Delta C_{vid}.$$

Tā kā adsorbenta darba tilpums $V_1 = H_d S_k$, kur S_k — kolonnas šķēluma laukums, tad adsorbenta slāņa darba augstums

$$H_d = \frac{G}{k_{yv} S_k \Delta C_{vid}}. \quad (14.12)$$

Ja adsorbcijas izoterma koncentrāciju robežās C_g^b , C_g^s vai C_b , C_s ir taisne, tad

$$\Delta C_{vid} = \frac{\Delta C_1 - \Delta C_2}{2,3 \lg \frac{\Delta C_1}{\Delta C_2}},$$

kur $\Delta C_1 = C_g^s - C_g^{s*}$ — lielākais virzošais spēks slāņa vienā galā; $\Delta C_2 = C_g^b - C_g^{b*}$ — mazākais virzošais spēks slāņa otrā galā. Ja $\frac{\Delta C_1}{\Delta C_2} < 2$, tad $\Delta C_{vid} = (\Delta C_1 + \Delta C_2)/2$. Ja adsorbcijas izoterma nav taisne, tad, pamatojoties uz metodiku, kas dota vienādojuma (10.53) iegūšanai, adsorbcijas procesa vidējā virzošā spēka noteikšanai iegūst izteiksmi

$$\Delta C_{vid} = \frac{C_g^s - C_g^b}{C_g^s}. \quad (14.13)$$

Vienādojuma (14.13) saucēja $\int_{C_g^b}^{C_g^s} \frac{dC_g}{C_g - C_g^*}$ vērtību nosaka, grafiski integrējot, kā tas parādīts 416. lappusē. Integrālis $\int_{C_g^b}^{C_g^s} \frac{dC_g}{C_g - C_g^*}$ izsaka koncentrācijas maiņu dC_g uz procesa virzošā spēka $(C_g - C_g^*)$ vienību. To sauc par *kopējo pārnesto vienību skaitu adsorbcijai*, t. i.,

$$\int_{C_g^b}^{C_g^s} \frac{dC_g}{C_g - C_g^*} = n_c.$$

Adsorbētā komponenta masa sekundē G izsakāma šādi:

$$G = Q(C_g^s - C_g^b),$$

kur Q — adsorberā ieplūstošās gāzes caurtece, m^3/s .

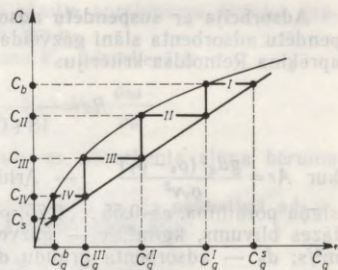
Ievērojot pēdējo izteiksmi, vienādojums (14.12) izsakāms šādi:

$$H_d = \frac{Q}{k_{yV} S_k} \frac{C_g^s - C_g^b}{\Delta C_{vid}} \quad (14.14)$$

No vienādojumiem (14.14) un (14.13) iegūst, ka

$$H_d = \frac{Q}{k_{yV} S_k} \int_{C_g^b}^{C_g^s} \frac{dC_g}{C_g - C_g^*} \quad \text{vai}$$

$$H_d = \frac{Q}{k_{yV} S_k} n_c.$$



14.10. att. Koncentrācijas maiņas pakāpienu skaita noteikšana.

Pēdējā vienādojuma daļa $\frac{Q}{k_{yV} S_k}$ ekvivalenta adsorbenta slāņa augstumam h_{ekV} , kas atbilst vienai pārnestajai vienībai, tādēļ

$$H_d = h_{ekV} n_c. \quad (14.15)$$

Adsorbenta slāņa darba augstuma noteikšanai var vadīties arī no koncentrācijas maiņas pakāpieniem. Tad vispirms nosaka grafiski (14.10. att.) koncentrācijas maiņas pakāpienu (teorētisko šķīvju) skaitu n_t .

Kopējo pārnesto vienību skaitu iegūst šādi:

$$n_c = n_t n'_c, \quad (14.16)$$

kur n'_c — pārnesto vienību skaits, kas atbilst vienam koncentrācijas maiņas pakāpienam.

Vienādojumā (14.15) n_c vietā ievietojot $n_t n'_c$ no vienādojuma (14.16), iegūst

$$H_d = h_{ekV} n_t n'_c. \quad (14.17)$$

Ja adsorbcijas izoterma nav taisne, tad n'_c ir mainīgs lielums un aprēķināms katram koncentrācijas maiņas pakāpienam atsevišķi (14.10. att.):

$$n_{cI} = \frac{2(C_g^s - C_g^I)}{(C_g^s - C_g^I) + (C_b - C_{II})},$$

$$n_{cII} = \frac{2(C_g^s - C_g^I)}{(C_g^I - C_g^{II}) + (C_{II} - C_{III})} \quad \text{utt.}$$

Ievērojot, ka n_c ir mainīgs, vienādojums (14.17) izsakāms šādi:

$$H_d = h_{ekV} (n_{cI} + n_{cII} + \dots + n_{c^n}) = h_{ekV} \sum_I^n n'_c.$$

Adsorbēcija ar suspendētu adsorbenta slāni. Adsorbēriem ar suspendētu adsorbenta slāni gāzveida fāzes plūsmas ātruma noteikšana aprēķina Reynolds kritēriju:

$$Re = \frac{Ar\varepsilon}{18 + 0,6\sqrt{Ar\varepsilon^{4,75}}}$$

kur $Ar = \frac{gd_g^3(\rho_a - \rho_y)}{\rho_y \nu^2}$ — Arhimēda kritērijs; ε — suspendētā slāņa porainība, $\varepsilon = 0,55 \dots 0,75$; ρ_a un ρ_y — adsorbenta un gāzveida fāzes blīvums, kg/m^3 ; ν — gāzveida fāzes kinemātiskā viskozitāte, m^2/s ; d_g — adsorbenta graudu diametrs, m ; g — brīvās krišanas paātrinājums, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Gāzveida fāzes ātrums suspendēta adsorbenta slāņa nodrošināšanai ir šāds:

$$\omega_y = \frac{Re\mu}{d_g\rho_y}$$

Minimālais adsorbenta patēriņš Q_{ad}^{\min} , kad adsorbējamais komponents adsorbentā sasniedz līdzsvaru, nosakāms no procesa materiālās bilances:

$$Q_{ad}^{\min}(C^* - C_s) = Q(C_g^s - C_g^b) \quad \text{un}$$

$$Q_{ad}^{\min} = Q \frac{C_g^s - C_g^b}{C^* - C_s},$$

kur Q_{ad}^{\min} — adsorbenta patēriņš, m^3/s ; Q — gāzveida fāzes patēriņš, m^3/s ; C_g^s , C_g^b — adsorbējamās vielas sākuma un beigu koncentrācijas gāzveida fāzē, kg/m^3 ; C^* — adsorbenta statistiskā aktivitāte (tās noteikšanu sk. 14.9. att.), kg/m^3 ; C_s — adsorbējamā komponenta koncentrācija adsorbentā pēc desorbēcijas, kg/m^3 .

Nepieciešamo adsorbenta patēriņu Q_{ad} iegūst, palielinot minimālo adsorbenta patēriņu par 10...30%, t. i., $Q_{ad} = (1,1 \dots 1,3) Q_{ad}^{\min}$.

Zinot, ka adsorbētā komponenta masa sekundē G izsakāma šādi:

$$G = Q(C_g^s - C_g^b) \quad \text{un} \quad G = k_{yV} V_{ad} \Delta C_{vid},$$

tad no šiem vienādojumiem var izteikt adsorbenta tilpumu

$$Q(C_g^s - C_g^b) = k_{yV} V_{ad} \Delta C_{vid} \quad \text{un} \quad V_{ad} = \frac{Q}{k_{yV}} \frac{C_g^s - C_g^b}{\Delta C_{vid}},$$

kur k_{yV} — masas pārejas koeficients, kas attiecināts uz adsorbenta tilpuma vienību, nosakāms, izmantojot vienādojumu (14.2), s^{-1} ; V_{ad} — adsorbenta materiāla tilpums (bez tukšumiem), m^3 .

Pēdējā vienādojuma otrais loceklis

$$\frac{C_g^s - C_g^b}{\Delta C_{vid}} = n_C = \int_{C_g^b}^{C_g^s} \frac{dC_g}{C_g - C_g^*},$$

kas izsaka kopējo pārnesto vienību skaitu, aprēķināms, lietojot grafiskās integrēšanas metodi (sk. 416. lpp.).

Kopējais adsorbenta slāņa tilpums V_{s1} adsorberā ir

$$V_{ad}\rho_{ad} = V_{sl}\rho_b \quad \text{un} \quad V_{s1} = V_{ad} \frac{\rho_{ad}}{\rho_b},$$

kur ρ_{ad} , ρ_b — adsorbenta materiāla un adsorbenta slāņa bēruma blīvumi, kg/m^3 .

Adsorberam nepieciešamais šķīvjū skaits n_p , ja nekustīgā adsorbenta slāņa augstums uz šķīvja ir h , aprēķināms šādi:

$$n_p = \frac{V_{s1}}{hS_k},$$

kur S_k — adsorbera šķērsriezuma laukums, m^2 .

Adsorbenta slāņa aiztures laiks suspendētam slānim. No vienādojuma (14.4) suspendētā adsorbenta slāņa aiztures laiks

$$\tau = \frac{\varepsilon_0(1-\varepsilon_0)H}{\omega_0} \int_{c_s}^{c_b} \frac{dC}{C_g - C_g^*}.$$

Ja līdzsvara izoterma $C=f(C_g)$ ir zināma, integrāli atrisina grafiski. Adsorbējot gāzveida fāzes ar adsorbentu suspendētā slānī atšķirībā no adsorbcijas stacionārā slānī, nav jāievēro adsorbcijas slāņa aiztures laika zudumi, jo adsorbcija suspendētā slānī noris, adsorbenta graudiem ideāli sajaucoties, un visā slānī ir vienāda koncentrācija. Adsorbcijā ar šķīdriem novēro aiztures laika zudumus.

Intensiva adsorbenta sajaukšanās samazina komponenta vidējo koncentrāciju (intensitāti), adsorbenta dinamisko aktivitāti un aiztures laiku salīdzinājumā ar stacionāru un plūstošu adsorbenta slāni.

15. JONU APMAIŅA

15.1. JONU APMAIŅAS PROCESA RAKSTUROJUMS UN LIETOŠANA

Jonu apmaiņas procesa pamatā ir katjonu, anjonu vai abu šo jonu veidu saistišana ar jonītiem no šķīdumiem (pēdējā laikā arī no gāzēm). Jonītos ir ķīmiski aktīvas grupas ar kustīgiem jonītiem, kas spēj savstarpēji apmainīties. Jonītā esošo jonu, kas pārvietojas uz šķīdumu, aizvieto no šķīduma jonīta graudā ieklūstošais jons.

Jonu apmaiņas procesos izmantojamo aparātu uzbūve ir samērā vienkārša. To pamatā ir graudains jonīta slānis, caur kuru filtrē apstrādājamo šķīdumu (gāzi).

Jonu apmaiņas procesus plaši lieto zinātnē un tehnikā. Tehnikā jonītus lieto ūdens mikstināšanai un atsāļošanai, rūpniecības notekūdeņu attīrīšanai, vanādija, molibdēna, zelta, sudraba, vara, niķeļa, cinka, skandija, indija un citu izkliedēto metālu iegūšanai, no pazemes ūdeņiem iegūst bromu un jodu, no jūras ūdeņiem — urānu.

Organisko vielu tehnoloģijā jonītus lieto jonizētu un vāji jonizētu organisko savienojumu atdalīšanai no neorganiskajiem savienojumiem, cukura rūpniecībā, atsevišķu organisko komponentu izdalīšanai no maisījumiem (piemēram, karbonskābju un alifātisko amīnu izdalīšanai), ārstniecības vielu izdalīšanai no augiem (piemēram, hinīna, beladonnas, strihnīna, alkaloīdu, glikozīdu, vitamīnu iegūšanai) u. c. Pēdējos gados jonītus sāk izmantot olbaltumvielu sadalīšanās produktu (peptīdu, aminoskābju) atdalīšanai, Jonītus plaši lieto antibiotisko vielu iegūšanai no mikrobioloģiskās sintēzes produktiem, fermentu (tiras amilāzes) iegūšanai.

Ar jonītiem iespējams realizēt dažādas sintēzes. Piemēram, filtrējot caur ūdeņraža katjonītiem dažādu sāļu šķīdumus, iegūst attiecīgās neorganiskās vai organiskās skābes (slāpekļskābi, sālsskābi, fosforskābi u. c.). Filtrējot caur anjonīta slāni, iegūst neorganiskas un organiskas bāzes (hidrazīnu, dažādus amīnus u. c.).

Jonītus lieto arī rūpniecības gāzu attīrīšanai, kas pamatojas uz attiecīga komponenta šķīšanu jonīta «iekšējā» ūdenī. Piemēram, katjonīti labi saista amonjaku, anjonīti — neorganiskās skābes, sērū, selēnu, slāpekļa un oglekļa oksīdus, hloru.

15.2. JONU APMAIŅAS MATERIĀLI, TO KLASIFIKĀCIJA UN ĪPAŠĪBAS

Atkarībā no jonīta matricas lādiņa jonītus iedala *katjonītos*, kas spēj apmainīties ar katjonītiem, un *anjonītos*, kas spēj apmainīties ar anjonītiem.

Katjonīti atbilst skābēm (kustīgais jons ir ūdeņraža jons vai kāds cits katjons — Na^+ , Ca^{2+} u. c.). Anjonīti atbilst bāzēm (kustīgais jons ir OH^- jons vai kāds cits anjons — Cl^- , SO_4^{2-} u. c.).

Katjonīti un anjonīti savukārt iedalās divās grupās atkarībā no funkcionālo grupu jonizācijas pakāpes, analogiski kā stiprie un vājie elektrolīti. Stipri jonizētie katjonīti pieder pie *stipri skābiem katjonītiem*. Tie ūdeņraža jonus spēj apmainīt šķīdumos plašā pH intervālā — tos sauc par universāliem katjonītiem KU. Vāji jonizētie katjonīti (*vāji skābie*) apzīmēti ar KB («buferi» — analogiski vājo skābju sāļiem). Šie katjonīti spēj apmainīt ūdeņraža jonus ar metāla joniem tikai sārmainos, daži — arī neitrālos šķīdumos.

Anjonītus iedala analogiski: stipri jonizētos anjonītos, ko sauc par *stipri bāziskiem anjonītiem* un apzīmē ar AB (universālas darbības — darbojas plašā pH intervālā) un *vāji bāziskos anjonītos*, kurus apzīmē ar AH. Anjonīti AH spēj apmainīt hidroksīdjonus skābos un neitrālos šķīdumos. Jonītu rūpniecība izgatavo arī *amfotērus jonītus*, kuriem ir augsta selektivitāte attiecībā pret krāsaino un smago metālu katjonītiem. Šie jonīti darbojas skābās, neitrālās un sārmainās vidēs. Amfotēros jonītus sauc par *amfolītiem*, un tos nosauc atkarībā no to sastāva ietilpstošās jonogēnās grupas.

Jonīti iedalās *neorganiskajos un organiskajos jonītos*.

Neorganiskie jonīti. Neorganiskajiem jonītiem ir augsta selektivitāte, tie ir ķīmiski, termiski un radiācijas izturīgi.

Pie šīs grupas jonītiem pieder

1) oksihidrāti ar kopēju formulu $(\text{OH})_x\text{M}_y\text{E}_z\text{G}_{p-x} \cdot (\text{H}_2\text{O})_n$, kur M un E — metālu joni. Pie šīs grupas var pieskaitīt arī sulfīdus ar formulu $\text{M}_x\text{E}_y\text{S}_z$, kur M un E — metālu joni;

2) ferrocianīda jonīti — vienkāršie $\text{E}_y[\text{Fe}(\text{CN})_6]_z$, $(\text{EO})_y[\text{Fe}(\text{CN})_6]_z$, $(\text{EO}_2)_y[\text{Fe}(\text{CN})_6]_z$ un jauktie $\text{M}_x\text{E}_y[\text{Fe}(\text{CN})_6]_z$, $\text{M}_x(\text{EO})_y[\text{Fe}(\text{CN})_6]_z$, $\text{M}_x(\text{EO}_2)_y[\text{Fe}(\text{CN})_6]_z$, kur M — viēnlādiņa, retāk divlādiņa vai polilādiņa joni; E — divlādiņa vai polilādiņa metāla joni;

3) heteropolāri sāļi. Pie šīs grupas pieder BaSO_4 , LaF_3 un citi sāļi, kas spēj piedalīties heterogēnā apmaiņas reakcijā ar šķīdumu.

Neorganiskie jonīti ir aktīvi attiecībā pret retiem un izkliedētiem elementiem (Ag, Au, Cs, Rb, Tl, Mo, W, Os, U u. c.). Tos lieto indīgu, radioaktīvu vielu izdalīšanai no šķīdumiem vai to koncentrēšanai, izmanto arī par katalizatoriem.

Organiskie jonīti. Organiskos jonītus iegūst mazmolekulāru savienojumu kondensācijas vai polimerizācijas rezultātā, un tos sauc arī par *jonu apmaiņas sveķiem*. Jonogēnās (funkcionālās, aktīvās) grupas lielmolekulāros savienojumos ievada sintēzes beigās. Katjonītiem šīs grupas ir stipri vai vāji skābas, bet anjonītiem — stipri vai vāji bāziskas.

Jonogēnās grupas ir šādas:

katjonītiem $-\text{SO}_3^-$ $-\text{COOH}$, $-\text{PO}_3^{2-}$, $-\text{C}_6\text{H}_4-\text{O}^-$ u. c.

anjonītiem $-\text{N}(\text{CH}_3)_3^+$, $-\text{NH}_2^+$, $=\text{NH}$, $-\text{C}_5\text{H}_4\text{N}$, $-\text{C}_6\text{H}_4\text{NH}_2$, $-\text{OH}$ u. c.

Organiskajiem jonītiem galvenokārt ir gelveida uzbūve. Telpiskā polimerizācijā iegūst cietas vielas ar režģveida struktūru. Jonītus, kuros vienmērīgi sadalīti gelveida laukumi (šajos laukumos koncentrētas jonogēnas grupas), sauc par *izoporainiem* jonītiem, kaut arī nekādu poru tur nav.

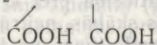
Polimēru jonīti ir arī poraini (poru izmērs $8 \dots 10^4$ nm). Šādus jonītus sauc par *makroporainiem jonītiem*.

Plaši izplatīts katjonīts ir KU-2-8. Tam ir gelveida uzbūve, tas ir stipri skābs, satur sulfogrupu, kas piesaistīta aromātiskam gredzenam $[-CH_2-CH- \text{C}_6\text{H}_4-SO_3H]_n$. Katjonītu KU-2-8 lieto ūdens

mīkstināšanai un atsāļošanai, hidrometalurģijā, notekūdeņu attīrīšanai un citur, kā arī par katalizatoru ķīmiskajās reakcijās. To lieto arī rūpniecībā izplūdes gāzu attīrīšanai.

Katjonīts KB-2 ir vāji skābs, ar gelveida uzbūvi. Tas satur jonogēno grupu $-COOH$, kas pievienota alifātiskai ķēdei

$(-CH_2-CH-CH-CH_2-)_n$. To lieto metālu saistīšanai no šķīdu-



miem, notekūdeņu attīrīšanai, sārmu metālu un sārmzemju metālu saistīšanai.

Bez minētajiem katjonītiem ķīmiskajā rūpniecībā lieto vēl daudzus citus organiskos katjonītus.

No anjonītiem var minēt anjonītu AB-17-8. Tam ir gelveida uzbūve, un tas satur jonogēno grupu $[=CH-(C_6H_5)-CH_2N^+(CH_3)_3]_n$. To lieto temperatūrās līdz 90°C vāju skābju (ogļskābes, kramskābes) saistīšanai, ūdens atsāļošanai, hidrometalurģijā, notekūdeņu attīrīšanai no anjonītiem u. c.

Ražošanā jonītus lieto graudu veidā (optimālais izmērs $0,5 \dots \dots 0,7$ mm, pēc iespējas sfēriskas formas), granulu veidā (diametrs $0,8 \dots 1,2$ mm, garums līdz 3 mm), pulvera veidā (daļiņu vidējais izmērs $0,05$ mm), jonu apmaiņas šķiedru (garums līdz 3 mm), jonu apmaiņas membrānu (plāksnes $\delta = 0,3 \dots 0,5$ mm, $lb \approx 500 \times 1500$ mm vai nepārtrauktas 1 m platas lentes) un šķīdru jonītu veidā.

15.3. JONU APMAIŅAS PROCESU TEORĒTISKIE PAMATI

Jonītam kontaktējoties ar šķīdumu, notiek jonu difūzija no šķīduma jonītā un ekvivalenta kustīgo pretjonu difūzija no jonīta šķīdumā. Šādas difūzijas rezultātā iestājas līdzsvars.

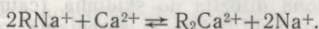
Jonu apmaiņas līdzsvaru nosaka aktīvo masu likums. Analizējot jonu apmaiņu, pamatojoties uz aktīvo masu likumu, jāņem vērā arī parādības, kas notiek jonītā vienlaikus ar jonu apmaiņu.

Jonu apmaiņas selektivitāti un līdz ar to līdzsvara konstanti ietekmē *jona lādiņa lielums*. Apmainoties vienāda lādiņa joniem, liela nozīme ir *hidratācijas rādīsam*, t. i., jona lādiņa blīvumam. Liela nozīme ir arī *osmozei* (jona grauda uzbriešanai un saplākšanai).

Heterogēno reakciju teorija. Jonu apmaiņas procesu izskaidrošanai zināmas vairākas teorijas. Plašāk lieto *membrānu*, *osmozes* un

heterogēno reakciju teorijas. Šajā nodaļā jonu apmaiņu aplūkosim kā heterogēnu reakciju.

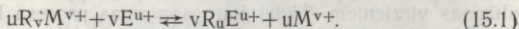
Pieņemsim, ka jonu apmaiņa notiek ar nātrija katjonītu RNA, kura uzdevums saistīt no šķīduma Ca jonus. Tā kā apmaiņa notiek ekvivalentos daudzumos, var uzrakstīt šādu reakcijas vienādojumu:



Līdzsvara vienādojums dotajā gadījumā vienāds ar aktīvo masu likuma konstanti

$$K = \frac{[\text{Na}^+]^2 [\text{R}_2\text{Ca}^{2+}]}{[\text{Ca}^{2+}] [\text{RNA}^+]^2}$$

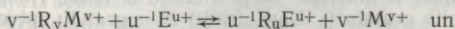
Vispārīgā veidā jebkuram jonītam, ja šķīdumā esošo metāla jonu apzīmē ar E^{u+} un attiecīgo katjonītu ar $R_v M^{v+}$, tad reakcijas vienādojums vispārīgā veidā ir šāds:



Līdzsvara konstante

$$K = \frac{[M^{v+}]^u [R_u E^{u+}]^v}{[E^{u+}]^v [R_v M^{v+}]^u}$$

Reakcijas (15.1) vienkāršošanai abas puses izdala ar uv , tad

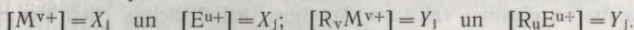


$$K' = \frac{[M^{v+}]^{1/v} [R_u E^{u+}]^{1/u}}{[E^{u+}]^{1/u} [R_v M^{v+}]^{1/v}} \quad (15.2)$$

Sakarība starp līdzsvara konstantēm ir šāda: $K' = K^{1/uv}$.

Anjonītu apmaiņai var uzrakstīt analogiskus vienādojumus. Līdzsvara konstantēs kvadrātiekvāš minētās izteiksmes nav koncentrācijas, bet jonu aktivitātes šķīdumā un jonītā. Jonu aktivitātes datu literatūrā trūkst, tadēļ līdzsvara konstantes K vērtības aprēķiniem izmanto koncentrācijas.

Vienādojuma (15.2) vienkāršošanai koncentrācijas šķīdumā apzīmē ar X , bet jonītā — ar Y , tad



Vienādojums (15.2) pārrakstāms šādi:

$$K_{ij} = \frac{X_i^{1/v} Y_j^{1/u}}{X_j^{1/u} Y_i^{1/v}} \quad \text{vai}$$

$$\frac{Y_j^{1/u}}{Y_i^{1/v}} = K_{ij} \frac{X_j^{1/u}}{X_i^{1/v}}$$

Lai no šī vienādojuma iegūtu sakarību starp Y_j un X_j , tad izmanto materiālās bilances vienādojumus:

$$Y_1 + Y_j = Y_0 \quad \text{un} \quad X_1 + X_j = X_0$$

Ja jonīts ir svaigs un satur tikai pretjonu, tad $Y_1 = Y_0$ un $X_1 = X_0$.
 Ja $K_{11} = 1$, tad izoterma ir lineāra un to sauc par *Henri izoterma*.
 Ja $K_{11} > 1$, izoterma ir izliekta. Ja $K \rightarrow \infty$, tad, ja $K_{11} > 10$, izoterma sauc par taisnstūra izoterma. Ja $K_{11} < 1$, tad izoterma ir ieliekta.

Jonu apmaiņas mehānismā var izdalīt šādus posmus: 1) sorbējamā (saistāmā) jona difūzija no šķīduma (caur robežkārtu) līdz grauda virsmai (*ārējā difūzija*); 2) sorbējamā jona difūzija jonīta graudā līdz aktivajām grupām (*iekšējā difūzija*); 3) jona apmaiņa — *ķīmiskā reakcija*; 4) apmainītā pretjona difūzija jonīta graudā līdz virsmai (*iekšējā difūzija*); 5) pretjona difūzija (caur robežkārtu) šķīdumā (*ārējā difūzija*).

Vairākposmu procesos kopējo procesa norises ātrumu nosaka (limitē) vislēnākā posma ātrums. Limitējošā posma noteikšana ir pirmais uzdevums, noskaidrojot jonu apmaiņas kinētiku. Jonu apmaiņas procesā pirmais un piektais posms, otrs un ceturtais posms ir vienādi pēc difūzijas rakstura un atšķiras tikai ar apmaināmo jonu plūsmas virzieniem. Tādēļ jonu apmaiņas procesa limitējošā posma noteikšanai nepieciešams aplūkot pirmos trīs posmus (vai arī pēdējos trīs).

Trešo posmu raksturo ķīmiskās reakcijas kinētika. Daudzē eksperimentālie pētījumi rāda, ka ķīmiskā reakcija jonu apmaiņā notiek momentāni, tādēļ jonu apmaiņas ātrumu ķīmiskā reakcija neietekmē. Tātad limitējošie posmi ir difūzijas posmi.

Ārējās difūzijas kinētika. Ārējā difūzija ir vielas (jona) pārvietošanās uz jonīta graudu (vai arī otrādi) caur graudu aptverošo robežkārtu vai caur adhēzijas spēkiem saistīto šķīduma slāni, kas ir nekustīgs, pat pārvietojoties graudam un šķīdumam.

Koncentrācijas izmaiņu jonītā bezgalīgi īsā laikā izsaka vienādojums

$$\partial Y / \partial \tau = \beta_{\text{ār}} (X - X^*); \quad \beta_{\text{ār}} = 3D_{\text{ār}} / (r\delta),$$

kur $\beta_{\text{ār}}$ — ārējais masas atvešanas koeficients (no šķīduma uz jonīta grauda virsmu); ∂Y — koncentrācijas izmaiņa jonītā laikā $\partial \tau$; X^* — šķīduma līdzsvara koncentrācija, kas atbilst šķīduma koncentrācijai X ; r — jonīta grauda rādiuss; $D_{\text{ār}}$ — ārējais difūzijas koeficients; δ — robežkārtas biezums. Robežkārtas biezums δ ir 100...10 μm atkarībā no plūsmas rakstura. Spēcīgas turbulizācijas (lieli ātrumi) gadījumos δ samazinās pat līdz 1 μm . Ārējais masas atvešanas koeficients $\beta_{\text{ār}}$ atkarīgs no hidrodinamiskiem parametriem (šķīduma plūsmas ātruma, maisīšanas).

Iekšējās difūzijas kinētika. Jonam (vielai) difundējot grauda iekšienē, pārvietošanās ātrums atkarīgs no grauda struktūras. Neporainiem, neuzbrīstošiem graudiem, piemēram, metāliem difūzijas koeficients aptuveni 10^{-10} cm^2/s .

Porainos sorbentos (jonītos) izšķir *difūziju porās*, *Knudsena difūziju* —, ja poru diametrs mazāks par molekulu (jonu) brīvā nokrējuma garumu, un *Folmēra difūziju* — difūzija pa poru virsmu. Difūzijas koeficients porainiem sorbentiem aptuveni 10^{-5} cm^2/s .

Iekšējās difūzijas jonu apmaiņas (sorbcijas) ātruma kinētiskais vienādojums

$$\partial Y / \partial \tau = \beta_{\text{iek}} (Y^* - Y); \quad \beta_{\text{iek}} = 3D_{\text{iek}} / r^2,$$

kur β_{iek} — iekšējās difūzijas masas pārejas koeficients; Y^* — sorbējamo jonu līdzsvara koncentrācija uz grauda virsmas; Y — sorbējamo jonu koncentrācija grauda centrā; D_{iek} — difūzijas koeficients jonītā.

Koeficients β_{iek} nav atkarīgs no šķīduma plūsmas ātruma.

Ja $\beta_{\text{ār}} \ll \beta_{\text{iek}}$, jonu apmaiņas ātrumu limitē iekšējā difūzija, ja $\beta_{\text{ār}} \gg \beta_{\text{iek}}$, to limitē ārējā difūzija.

Jonu apmaiņas ātruma noteikšana saistīta ar šādas vienādojumu sistēmas atrisināšanu:

$$\frac{Y_j^{1/u_j}}{Y_1^{1/v_1}} = K_{1j} \frac{X_j^{1/u_j}}{X_1^{1/v_1}};$$

$$\partial Y / \partial \tau = f(Y_{1j}, X_{1j});$$

$$Y_0 = \sum Y_{1j}, \quad X_0 = \sum X_{1j}.$$

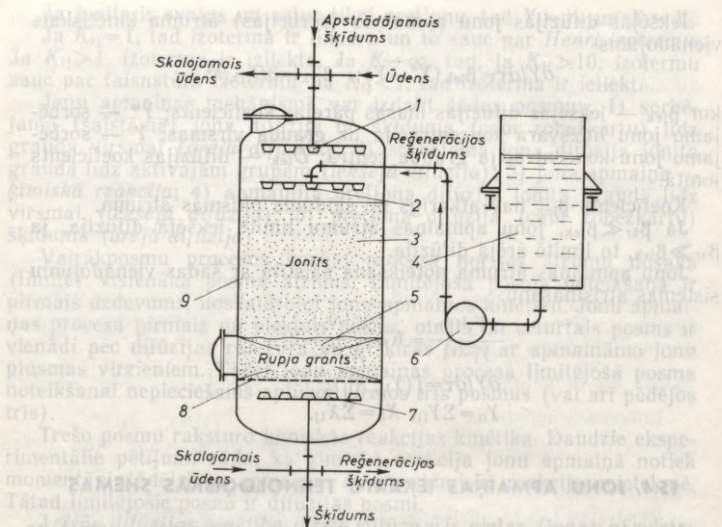
15.4. JONU APMAIŅAS IEKĀRTU TEHNOLOĢISKĀS SHĒMAS

Ķīmiskajā rūpniecībā plaši izplatīti jonu apmaiņas aparāti ar stacionāru graudainu slāni (filtra veidā) vai arī ar suspendētu graudainu slāni. Graudaino slāni veido jonīta graudi. Šķīduma plūsmu aparātos var virzīt dažādi (no augšas vai no apakšas). Filtrējošie jonīta slāņi var būt arī vairāki; tad tie novietoti cits virs cita.

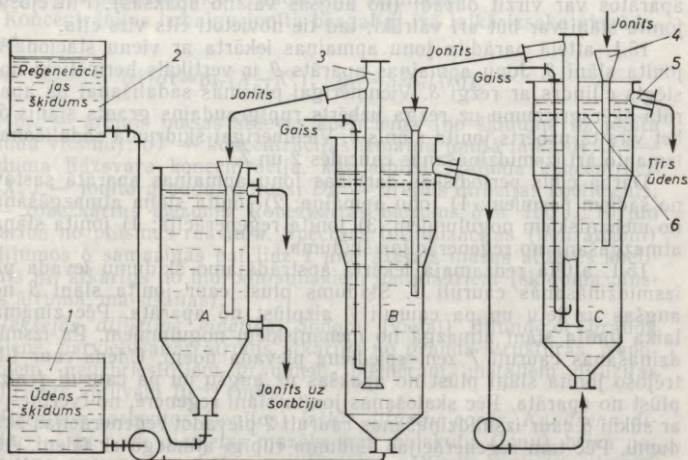
15.1. attēlā parādīta jonu apmaiņas iekārta ar vienu stacionāru jonīta slāni 3. Jonu apmaiņas aparāts 9 ir vertikāls hermētiski noslēgts cilindrs ar režģi 8. Vienmērīgai plūsmas sadalīšanai pa aparāta šķērsgrīzumu uz režģa uzbērts rupjgraudains grants slānis 5, bet virs tā uzbērts jonīta slānis 3. Vienmērīgai šķīduma sadalīšanai izmanto arī izsmidzināšanas caurules 2 un 7.

Darba cikls periodiskas darbības jonu apmaiņas aparātā sastāv no šādiem posmiem: 1) jonu apmaiņa; 2) jonīta slāņa atmazgāšana no mehāniskiem nogulumiem; 3) jonīta reģenerācija; 4) jonīta slāņa atmazgāšana no reģenerācijas šķīduma.

15.1. attēlā redzamajā iekārtā apstrādājamo šķīdumu ievada pa izsmidzināšanas cauruli 1. Šķīdums plūst caur jonīta slāni 3 no augšas uz leju un pa cauruli 7 aizplūst no aparāta. Pēc zināma laika jonīta slāni atmazgā no mehāniskiem nogulumiem. Pa izsmidzināšanas cauruli 7 zem spiediena pievada ūdeni. Ūdens caur filtrējošo jonīta slāni plūst no apakšas uz augšu un pa cauruli 1 aizplūst no aparāta. Pēc skalošanas jonīta slāni reģenerē, no tvertnes 4 ar sūkni 6 caur izsmidzināšanas cauruli 2 pievadot reģenerācijas šķīdumu. Pēc tam reģenerācijas šķīdumu rūpīgi atmazgā ar ūdeni. Atmazgāšanas ūdeni pievada no augšas pa izsmidzināšanas cauruli 1. Līdz ar to cikls beidzas un seko nākamais.



15.1. att. Periodiskas darbības jonu apmaiņas iekārtas shēma.



15.2. att. Jonu apmaiņas iekārta ar suspensētu jonīta slāni.

Augstākas attīrīšanas pakāpes sasniegšanai periodiskas darbības jonu apmaiņas aparātus saslēdz virknē.

Bez aparātiem ar stacionāru jonīta slāni lieto arī kolonnas ar šķīvjiem, ar plūstošu un suspendētu jonīta slāni.

15.2. attēlā redzama jonu apmaiņas iekārta, kas sastāv no divām virknē saslēgtām jonu apmaiņas kolonnām, kurās ir suspendēts jonīta slānis un kuras darbojas nepārtraukti.

Apstrādājamo ūdens šķīdumu no tvertnes 1 ar sūkni aizvada uz kolonnu B, kuras augšējā daļā no kolonnas C pievada jonītu. Plūsmas ātrumi ir tādi, ka jonīts jonu apmaiņas aparātos atrodas suspendētā stāvoklī. Jonīta aizvadišana no aparātiem notiek pa cauruli 3, ko izmanto par gaisa liftu, jo caurules apakšā pievada saspiestu gaisu. No jonu apmaiņas kolonnas B daļēji apstrādātais šķīdums aizplūst uz kolonnu C, no kuras pa izvadu 5 aizplūst tīrais ūdens. Siets 6 aiztur sīkos jonīta graudus. Svaigo jonītu (pēc reģenerācijas kolonnā A) ievada kolonnā C pa cauruli 4. Jonīts no kolonnas B ar gaisa liftu 3 tiek aizvadīts uz reģenerācijas kolonnu A. Kolonnā A no apakšas no tvertnes 2 pievada reģenerācijas šķīdumu. Reģenerētais jonīts pēc atmazgāšanas (15.2. attēlā nav parādīts) aizplūst no kolonnas A apakšas uz kolonnu C.

16. ŽĀVĒŠANA

16.1. ŽĀVĒŠANAS PROCESA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS

Ķīmiskajā rūpniecībā lieto izejvielas un pusfabrikātus ar dažādu mitruma saturu. Vajadzīgās kvalitātes produkta iegūšanai nepieciešams tajā samazināt mitrumu. Šā procesa rezultātā palielinās materiāla mehāniskā izturība, samazinās masa, tiek novērsti vai aizkavēti fizikālķīmiskie, bioloģiskie un citi procesi, kas var bojāt materiālu, un iegūst produktu ar vēlamām īpašībām.

Mitrumu rada jebkurš šķidrums. Parasti tas ir ūdens. Šajā nodaļā dotas aprēķinu formulas, pieņemot, ka materiāla mitrumu veido ūdens. Procesa būtība nav atkarīga no mitruma veida. Ieviešot formulas attiecīgus fizikālos lielumus, tās lietojamas jebkuram mitruma veidam.

Mitruma samazināšanai pakļauti dažādi materiāli: *cieti, šķidri un gāzveida*. Tā samazināšanai lieto vairākus paņēmienus:

1) *mehāniskos paņēmienus* — spiežot, filtrējot, centrifugējot. Šos paņēmienus lieto, ja ir augsts mitruma saturs;

2) *fizikālķīmiskos paņēmienus* — mitrumu saista ar higroskopiskām vielām: koncentrētu sērskābi, fosfora(V) oksīdu, kalcija hlorīdu, silikagelu u. c. Šis paņemiens ir dārgs, tādēļ to lieto gāzu žāvēšanai, ja ir niecīgs mitruma saturs;

3) *siltuma paņēmieni* — izgarošana, iztvaicēšana un kondensācija (samazina gāzu mitrumu, atdzesējot tās zemāk par rāsas temperatūru). Sildot mitrumu var pilnīgi aizvadīt no materiāla. Mitruma samazināšanu, izmantojot siltuma paņēmienus, plaši lieto tehnikā un sauc par *žāvēšanu (kaltēšanu)*.

Starp minētajiem mitruma samazināšanas paņēmieniem ir būtiskas atšķirības. Abos pirmajos paņēmienos mitrumu no materiāla aizvada, nemainot mitruma agregātstāvokli. Žāvējot ar siltumu, mitrumu pārvērš tvaikā un aizvada no materiāla.

Izšķir *dabisko un mākslīgo žāvēšanu*. *Dabisko žāvēšanu* realizē atklātā gaisā (kūdras žāvēšana), zem nojumēm (ķieģeļu, ārstniecības augu žāvēšana u. c.) bez īpašas siltuma enerģijas pievadišanas. Šis žāvēšanas veids atkarīgs no laika apstākļiem, ir ilgstošs, un tajā iegūst produktu ar augstu un mainīgu mitruma saturu.

Ķīmiskajā rūpniecībā galvenokārt lieto *mākslīgo žāvēšanu*. Siltuma enerģijas pievadītājs ir karsts gaiss, dūmgāzes, inertās gāzes, ūdens tvaiks. Mitrumu no materiāla uzņem žāvētavas vide, kuru nosūc ventilators vai vakuumsūkņi.

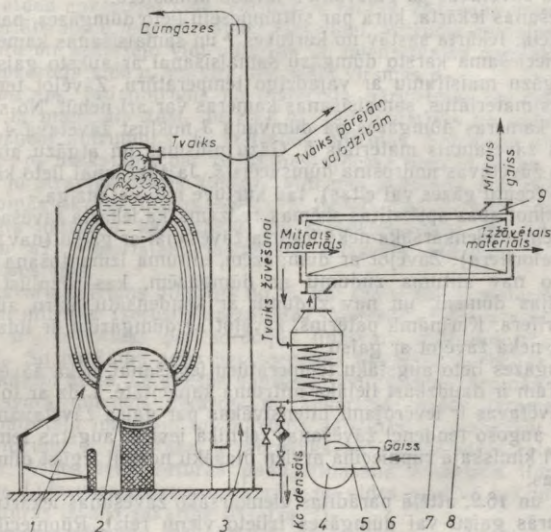
Žāvēšanas pamatveidi. Ķīmiskajā rūpniecībā lieto vairākus mākslīgās žāvēšanas veidus.

Konvektīvā žāvēšana. To plaši lieto dažādu materiālu žāvēšanai. Konvektīvo žāvēšanu izdara ar gaisu (vai dūmgāzēm) paaugstinātā temperatūrā. Konvektīvajā žāvēšanā viegli uzturēt žāvēšanai nepieciešamo režīmu (temperatūru, gaisa mitrumu, plūsmas ātrumu u. c.) un iegūt materiālu ar vēlamo mitrumu. Šajās žāvētavās sasniedz augstu ražīgumu.

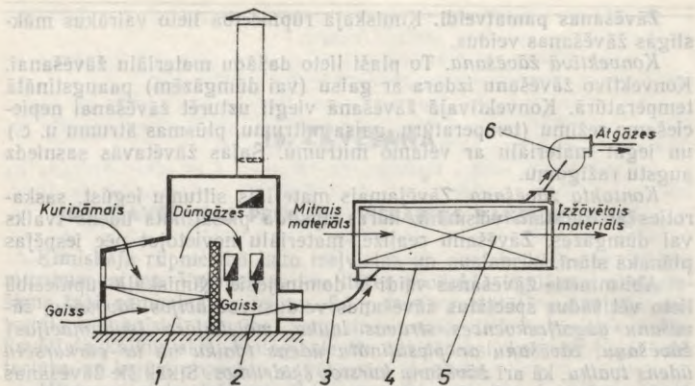
Kontakta žāvēšana. Žāvējamais materiāls siltumu iegūst, saskaroties ar karstām virsmām, kuras apsilda piesātināts ūdens tvaiks vai dūmgāzes. Žāvēšanu realizē, materiālu novietojot pēc iespējas plānākā slānī.

Abi minētie žāvēšanas veidi ir dominējošie. Ķīmiskajā rūpniecībā lieto vēl šādus speciālus žāvēšanas veidus: *radiācijas žāvēšanu, žāvēšanu augstfrekvences strāvas laukā, molekulāro (sublimācijas) žāvēšanu, žāvēšanu ar piesātinātu ūdens tvaiku un ar pārkarētu ūdens tvaiku, kā arī žāvēšanu karstos šķidrumos.* Sīkāk šie žāvēšanas veidi aplūkoti nodaļas beigās.

Žāvēšana ar gaisu un dūmgāzēm. Parastas žāvēšanas iekārtas shēma, kurā par siltumnesēju lieto gaisu, redzama 16.1. attēlā. Šāda iekārta sastāv no kurtuves 1, tvaika katla 2 un dūmeņa 3. Žāvēšanas vajadzībām lieto arī attvaiku no spēkmašīnām vai ekstra tvaiku no ietvaices iekārtām. Tvaiks nepieciešams gaisa sasildīšanai. Ventilā-



16.1. att. Iekārta žāvēšanai ar gaisu.



16.2. att. Iekārta žāvēšanai ar dūmgāzēm.

tors 4 pa gaisvadu 5 iesūc ārā gaisu un aizvada uz kaloriferu 6, kur to sasilda līdz vajadzīgajai temperatūrai. Karsto gaisu pa gaisvadu aizvada uz žāvētavu 7, kurā ievietots mitrais materiāls 8. Mitro gaisu no žāvētavas pa gaisvadu 9 izvada atmosfērā.

Žāvēšanas iekārta, kurā par siltumnesēju lieto dūmgāzes, parādīta 16.2. attēlā. Iekārta sastāv no kurtuves 1 un samaisīšanas kameras 2, kas nepieciešama karsto dūmgāzu samaisīšanai ar auksto gaisu, lai iegūtu gāzu maisījumu ar vajadzīgo temperatūru. Žāvējot termiski izturīgus materiālus, samaisīšanas kameras var arī nebūt. No samaisīšanas kameras dūmgāzes pa dūmvadu 3 nokļūst žāvētavā 4, kurā ievietots žāvējamais materiāls 5. Gāzu plūsmas un atgāzu aizvadišanu no žāvētavas nodrošina dūmsūcējs 6. Ja žāvēšanai lieto karstas atgāzes (cepļu gāzes vai citas), tad kurtuve nav vajadzīga.

Salīdzinot abas apskatītās shēmas, redzams, ka iekārta žāvēšanai ar dūmgāzēm ir vienkāršāka nekā iekārta žāvēšanai ar gaisu (nav tvaika katla, kalorifera). Žāvējot ar dūmgāzēm, siltuma izmantošana ir labāka, jo nav siltuma zudumu ar dūmgāzēm, kas aizplūst caur katlumājas dūmeni, un nav zudumu ar kondensātu, kuru aizvada no kalorifera. Kurināmā patēriņš, žāvējot ar dūmgāzēm, ir līdz 30% mazāks, nekā žāvējot ar gaisu.

Dūmgāzes lieto augstāku temperatūru iegūšanai, nekā žāvējot ar gaisu. Tām ir daudzārt lielāka mitruma kapacitāte. Līdz ar to dūmgāzu žāvētavas ir ievērojami intensīvākas par gaisa žāvētavām. Sakarā ar augošo tendenci žāvēšanas tehnikā ieviest augstas temperatūras arī ķīmiskajā rūpniecībā arvien plašāku nozīmi iegūst dūmgāzu žāvētavas.

16.1. un 16.2. attēlā parādītas vienkāršāko žāvēšanas iekārto shēmas, kurās gaisu vai dūmgāzes izlieto vienu reizi. Rūpniecībā izmanto arī citus žāvēšanas variantus, no kuriem daži aplūkoti tālāk.

Cieto vielu žāvēšanas process ietver šādas norises: 1) siltum-pāreju no karstā gaisa (dūmgāzēm, karstām virsmām) uz žāvējamo materiālu; 2) mitruma iztvaicēšanu no materiālu virsmas un tvaika difūziju apkārtējā vidē; 3) mitruma migrāciju no materiāla iekšējiem slāņiem uz virsmu. Minētās norises žāvēšanas procesā aplūko no *statikas, kinētikas un dinamikas* viedokļa.

16.2. ŽĀVĒŠANAS STATIKA

16.2.1. Mitruma apmaiņa starp materiālu un apkārtējo vidi

Pētot žāvēšanu no statikas viedokļa, sakarību starp materiāla mitrumu un vides parametriem (temperatūru, relatīvo mitrumu) aplūko līdzsvara stāvoklī. Statikā pieņem, ka viss no materiāla iztvaicējamais mitrums pārvietojas uz tā virsmu un nokļūst apkārtējā vidē. Mitruma pārvietošanos šeit nesaista ar laiku. Šāds pieņēmums, lietojot žāvēšanas procesa materiālās bilances un siltuma bilances sakarības, vienkāršo žāvēšanai pievadāmā siltuma un gaisa aprēķināšanu.

Žāvēšanas statika aplūko žāvējamā materiāla un apkārtējās vides savstarpējo iedarbību. Atkarībā no apstākļiem materiāls mitrumu vai nu atdo apkārtējai videi vai uzņem no tās. Žāvēšana notiek tad, ja materiāls atdo mitrumu apkārtējai videi. Mitruma apmaiņa starp materiālu un apkārtējo vidi atkarīga no ūdens tvaika parciālā spiediena apkārtējā vidē p_g un virs materiāla virsmas p_m .

Ja $p_m > p_g$, tad mitrums no materiāla pārvietojas uz apkārtējo vidi, t. i., materiāls žūst. Ja $p_m < p_g$, tad materiāls no apkārtējās vides uzņem mitrumu, t. i., materiāls mitrinās. Spiedienu starpība $\Delta p = p_m - p_g$ uzskatāma par žāvēšanas procesa virzošo spēku. Jo Δp lielāks, jo straujāk notiek žūšana. Mitruma atdošana apkārtējai videi turpinās tik ilgi, līdz $p_m = p_g$, t. i., $\Delta p = 0$. Tad iestājas līdzsvars. Materiāla mitrumu, kas atbilst šim stāvoklim, sauc par *līdzsvara mitrumu* u^* . Materiālam sasniedzot līdzsvara mitrumu, žūšanas process apstājas.

Līdzsvara mitrums atkarīgs no tā, vai tas iestājas, materiālu žāvējot vai mitrinot (sorbcijas rezultātā). Materiāla līdzsvara mitrums žāvējot u_z^* ir lielāks par sorbcijas līdzsvara mitrumu u_s^* , t. i., $u_z^* > u_s^*$. Šo parādību sauc par *sorbcijas histerēzi*. Sorbcijas histerēzi izskaidro ar to, ka sausās kapilāru sienīņas vāji slapinās.

Līdzsvara mitrums atkarīgs no apkārtējās vides parametriem, mitrā materiāla īpašībām un mitruma saistības ar materiālu. Līdzsvara mitrums ir augstāks, ja augstāks apkārtējās vides relatīvais mitrums. Vides temperatūras paaugstināšana samazina līdzsvara mitrumu. Līdzsvara mitruma atkarību no vides relatīvā mitruma un temperatūras izsaka sakarība $u^* = f(\varphi, t)$.

Līdzsvara mitrumu, kas atbilst vides pilnīgam piesātinājumam ($\varphi = 100\%$), sauc par *materiāla higroskopisko punktu*.

Ja materiāla mitrums lielāks par mitrumu, kas atbilst higroskopiskajam punktam, tad šādu materiālu sauc par mitru. Šādos apstākļos ūdens tvaika spiediens virs materiāla p_m vienāds ar piesātinātā ūdens tvaika spiedienu p_{pies} dotajā temperatūrā. Šādā stāvoklī materiāls žūst, pastāvot jebkuriem apkārtējās vides parametriem.

Ja materiāla mitrums mazāks par mitrumu, kas atbilst higroskopiskajam punktam, tad materiāls atrodas higroskopiskā stāvoklī, $p_m < p_{pies}$. Šādā gadījumā materiāla žāvēšana atkarīga no ūdens tvaika spiediena apkārtējā vidē un žūšana iespējama, ja materiāla mitrums lielāks par materiāla līdzsvara mitrumu.

Mitruma saistība ar materiālu. Žāvēšanas procesa gaita atkarīga no mitruma saistības ar materiālu. Starp dažādām mitruma saistības klasifikācijām žāvēšanas tehnikā pieņemamākie ir trīs mitruma saistības veidi: *mehāniskais, fizikālķīmiskais un ķīmiskais.*

Ar materiālu *mehāniski saistās* virsmas mitrums un lielākos kapilārus aizpildošais mitrums. Šīs saistības pamatā ir slapināšanas efekts, kura rezultātā materiāls notur nenoteiktu mitruma daudzumu. Mikrokapilāri (rādiuss $r < 10^{-7}$ m) ar mitrumu aizpildās tikai sorbcijas rezultātā no gaisa. Šis ir tā saucamais *ārējais* jeb *brīvais mitrums*. Tas visvājāk saistīts ar materiālu un viegli no tā atdalāms. Mehāniski saistītais mitrums materiālā pārvietojas šķidruma veidā no materiāla centra uz iztvaikošanas joslām un tvaika veidā no iztvaikošanas joslām uz apkārtējo vidi.

Pie *fizikālķīmiski saistītā mitruma* pieder materiāla kapilāros un porās adsorbētais mitrums (*adsorbcijas mitrums*), kā arī mitrums, kurš difūzijas un osmotiskā spiediena rezultātā iekļūst šūnu iekšienē (*osmotiskais mitrums*), un tas, kuru ietver geli, tiem veidojoties (*strukturālais mitrums*).

Adsorbcijas un osmotisko mitrumu sauc par *saistīto mitrumu*. Šis mitrums noturas virsmas ārējo spēku lauka ietekmē. Adsorbcijas mitruma aizvadišanai jāpatērē ievērojams enerģijas daudzums, jo mitrums jāpārvērš tvaikā, tikai tad tas pārvietojas uz materiāla virsmu. Osmotiskais mitrums difundē caur šūnu sienām šķidruma veidā. Fizikālķīmiski saistīto mitrumu ievērojami grūtāk aizvadīt no materiāla nekā mehāniski saistīto mitrumu.

Ķīmiski saistītais mitrums ir kristalizācijas ūdens (piemēram, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ u. c.). Šis mitrums ar materiālu saistīts noteiktā daudzumā un cieši. Kristalizācijas ūdeni var atdalīt, vielu karsējot. Vielas žāvējot, ķīmiski saistīto mitrumu neaizvada, tādēļ žāvētavu aprēķinos to neņem vērā.

Mitrā gaisa svarīgākie parametri. Žāvētavās gaiss (dūmgāzes), apskalojot žāvējamo materiālu, atdod tam siltumu, kas nepieciešams materiāla sasildīšanai un mitruma iztvaicēšanai. Tanī pašā laikā gaiss uzņem mitruma tvaikus un tos aizvada. Gaisu (dūmgāzes), kas vienlaikus pārnes siltumu un uzņem mitrumu, sauc par *siltumnesēju*. Tātad siltumnesējs ir sausa gaisa vai sauso sadegšanas produktu maisījums ar ūdens tvaiku, t. i., mitra gāze.

Svarīgākie parametri, kas raksturo mitru gāzi (gaisu), ir *relatīvais mitrums, mitruma saturs un entalpija*. Apstākļos, kādi sasto-

pami parastās žāvētavās, mitrais gaiss (dūmgāzes) pēc savām īpašībām ir tuvs ideālai gāzei.

Gaisa absolūtais mitrums. Par gaisa absolūto mitrumu sauc ūdens tvaika masu kilogramos, kas atrodas 1 m³ gaisa, t. i., tvaika blīvumu ρ_t , jo tvaiks aizpilda visu gaisa tilpumu.

Maksimālais gaisa absolūtais mitrums ir tad, kad gaiss piesātināts ar tvaiku, jo šajā stāvoklī gaiss mitrumu vairs neuzņem. No minētā izriet, ka piesātinātā ūdens tvaika blīvums ρ_p dotajā temperatūrā un spiedienā ir maksimālais gaisa absolūtais mitrums.

Gaisa relatīvais mitrums. Attiecību starp ρ_t un ρ_p , t. i., attiecību starp esošo absolūto mitrumu un maksimālo absolūto mitrumu tajā pašā temperatūrā, sauc par gaisa relatīvo mitrumu:

$$\varphi = \frac{\rho_t}{\rho_p}.$$

Tvaika blīvums tieši proporcionāls tvaika parciālajam spiedienam, tādēļ var rakstīt, ka

$$\varphi = \frac{p_t}{p_p}, \quad (16.1)$$

kur p_t — ūdens tvaika parciālais spiediens, ja tā blīvums ρ_t ; p_p — ūdens tvaika parciālais spiediens, ja tā blīvums ρ_p .

Relatīvais mitrums raksturo gaisa piesātinātību ar ūdens tvaiku.

Ja relatīvo mitrumu izsaka procentos, tad $\varphi = \frac{\rho_t}{\rho_p} \cdot 100$. Absolūti sausam gaisam, ja $p_t = 0$, arī relatīvais mitrums $\varphi = 0$. Ar ūdens tvaiku piesātinātam gaisam, ja $p_t = p_p$, relatīvais mitrums $\varphi = 1$ jeb $\varphi = 100\%$. Relatīvais mitrums ir viens no svarīgākajiem mitro gaisu raksturojošiem lielumiem.

Gaisa mitruma saturs. Gaisa mitruma saturu apzīmē ar x vai d , un tas rāda to mitruma daudzumu kilogramos vai gramos, ko satur mitrais gaiss, rēķinot uz 1 kg sausa gaisa.

Gaisa mitruma saturs proporcionāls tvaika un sausa gaisa blīvumu attiecībai:

$$x = \frac{\rho_t}{\rho_g} \quad \text{jeb} \quad d = \frac{\rho_t}{\rho_g} \cdot 1000, \quad (16.2)$$

kur ρ_g — sausa gaisa blīvums, kg/m³.

No Klapeirona vienādojuma $p\nu = RT$ iegūst, ka

$$\rho_t = \frac{p_t}{R_t T} \quad \text{un} \quad \rho_g = \frac{p_g}{R_g T},$$

kur ν — gāzes īpatnējais tilpums, t. i., 1 kg gāzes tilpums, m³; $\nu = \frac{1}{\rho}$, m³/kg; R — gāzu konstante, gaisam $R_g = 8,314$ kJ/(mol·K), ūdens tvaikam $R_t = 13,367$ kJ/(mol·K); T — absolūti mitrā gaisa temperatūra, K.

Formulā (16.2) ρ_t un ρ_g vietā ievietojot attiecīgās izteiksmes, kuras iegūtas no Klapeirona vienādojuma, var rakstīt:

$$x = \frac{p_t R_g T}{\rho_g R_t T} = \frac{p_t R_g}{\rho_g R_t} = \frac{8,314}{13,367} \frac{p_t}{\rho_g} = 0,622 \frac{p_t}{\rho_g}.$$

No formulas (16.1) $p_t = \varphi p_p$, bet no Daltona likuma var izteikt, ka gaisa parciālais spiediens $p_g = p - p_t = p - \varphi p_p$, kur p — kopējais spiediens; tad

$$x = 0,622 \frac{\varphi p_p}{p - \varphi p_p} \quad \text{vai} \quad d = 622 \frac{\varphi p_p}{p - \varphi p_p}. \quad (16.3)$$

Mitrā gaisa entalpija. Siltuma daudzumu, kas nepieciešams 1 kg vielas sasildīšanai no 0 līdz $t^\circ\text{C}$ nemainīgā spiedienā, sauc par entalpiju. Mitrām gaisam entalpiju attiecina uz 1 kg sausa gaisa. Mitrā gaisa entalpija summējas no 1 kg sausā gaisa entalpijas H_g un x kg ūdens tvaika entalpijas, h_t , t. i.,

$$H = H_g + h_t. \quad (16.4)$$

1 kg sausa gaisa entalpija H_g izsakāma šādi:

$$H_g = c_g t \cong t, \quad (16.5)$$

kur H_g — sausa gaisa entalpija, kJ/kg; c_g — gaisa īpatnējā siltumietilpība, $c_g = 1,00$ kJ/(kg·K); t — gaisa temperatūra, $^\circ\text{C}$.

x kg ūdens tvaika entalpija

$$h_t = x h', \quad (16.6)$$

kur h' — ūdens tvaika entalpija, kJ/kg.

Ūdens tvaika entalpiju h' nosaka pēc aptuvenas empīriskas formulas:

$$h' = c_t t + r_0 = 1,97t + 2491, \quad (16.7)$$

kur r_0 — koeficients, kas aptuveni vienāds ar ūdens tvaika entalpiju 0°C , $r_0 = 2491$ kJ/kg; c_t — ūdens tvaika īpatnējā siltumietilpība, $c_t = 1,97$ kJ/(kg·K).

Ievietojot vienādojumā (16.6) h' vērtību, iegūst

$$h_t = (1,97t + 2491)x. \quad (16.8)$$

Mitrā gaisa entalpiju, kas attiecināta uz 1 kg sausa gaisa, iegūst, vienādojumā (16.4) ievietojot lielumus no vienādojumiem (16.5) un (16.8):

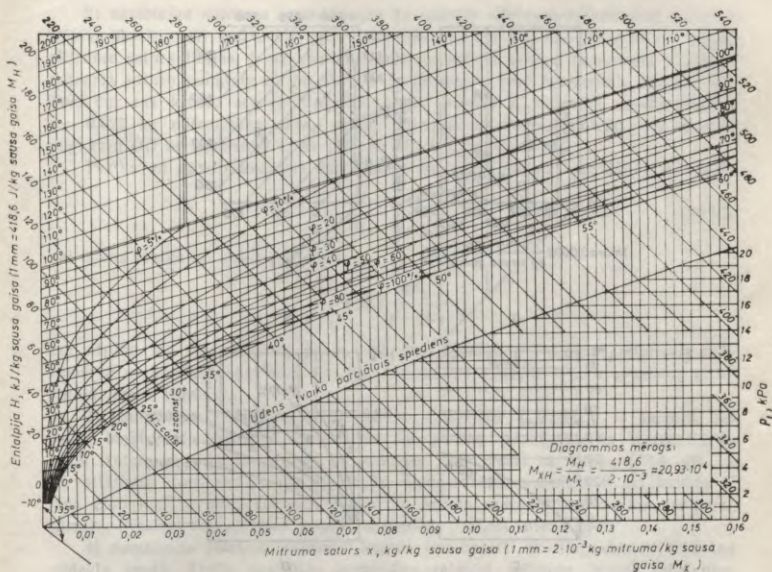
$$H = (1 + 1,97x)t + 2491x, \quad (16.9)$$

kur H — mitrā gaisa entalpija, kJ/kg sausa gaisa.

Entalpija uz 1 kg mitra gaisa ir šāda:

$$H_m = \frac{H}{1+x} = \frac{(1 + 1,97x)t + 2491x}{1+x}.$$

H-x diagramma. $H-x$ (entalpija—mitruma saturs) diagrammu



16.3. att. H - x diagramma.

pirmo reizi publicēja 1918. gadā L. Ramzins, tādēļ šo diagrammu arī sauc par Ramzina diagrammu.

Diagramma (16.3. att.) sastādīta, ņemot par pamatu 1 kg sausa gaisa, kas atrodas mitrajā gaisā barometriskajā spiedienā 0,0993 MPa (745 mm Hg). *Žāvēšanas tehnikā aprēķinus izdara atiecībā uz sausā gaisa masu tāpēc, ka tā žāvēšanas iekārtās ir nemainīga.*

H - x diagramma konstruēta slīpeņķu koordinātās. Temperatūrām līdz 200 °C diagrammā leņķis starp koordinātu asīm ir 135°, bet augsto temperatūru (virs 200 °C) diagrammā tas ir 120°. Uz ordinātu ass atlikta mitrā gaisa entalpija

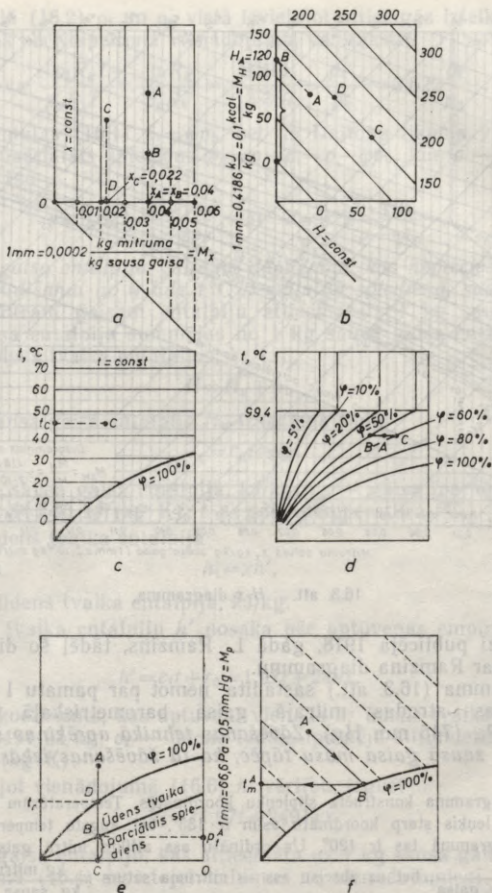
$$H \frac{\text{kJ}}{\text{kg sausa gaisa}}, \text{ bet uz abscisu ass — mitruma saturs } x, \frac{\text{kg mitruma}^1}{\text{kg sausa gaisa}}$$

H - x diagrammā (lai to ērtāk lietot) no koordinātu sākumpunkta 90° leņķī pret ordinātu asi novilkta horizontāla ass, uz kuras no slīpās abscisu ass pārnes tas mitruma satura x vērtības (16.4. att. a — svitrliņijas).

H - x diagrammā ir šādas līnijas:

1) *nemainīgo entalpiju līnijas* ($H = \text{const}$). Visi punkti (C un D) uz vienas

¹ Šajā grāmatā Ramzina diagrammas koordinātas apzīmētas ar H - x . Diagrammu sauc arī par H - d , I - x vai I - d diagrammu atkarībā no tā, kā apzīmēta gaisa entalpija un mitruma saturs.



16.4. att. $H-x$ diagrammas pamatlīnijas.

un tās pašas entalpiju līnijas ir ar vienādu entalpiju $H_C = H_D$ ($H = \text{const}$), kuras vērtības dotas šo līniju galos (16.4. att. b).

Nosakot entalpiju punktam A, no šī punkta paralēli līnijām $H = \text{const}$ velk taisni, līdz tā krusto ordinātu asi, uz kuras nolasa punktam A atbilstošo entalpiju $H_A = 120 \text{ kJ/kg}$ sausa gaisa. Entalpiju H_A iespējams noteikt, arī izmērot attālumu OB un pareizinot to ar mērogu M_H , kas dots $H-x$ diagrammā, t. i., $H_A = OB \cdot M_H$;

2) *nemainīga mitruma satura līnijas* ($x = \text{const}$) vilktas perpendikulāri horizontālajai abscisu asij (16.4. att. a). Visi punkti (A un B), kas izvietoti uz vienas mitruma satura līnijas, ir ar vienādu mitruma saturu $x_A = x_B$ ($x = \text{const}$). Nosakot mitruma saturu punktam C , no tā velk perpendikulu pret horizontālo abscisu asi. Tur, kur tas krusto asi (punkts D), iegūst punkta C mitruma satura vērtību $x_C = 0,022$ kg mitruma/kg sausa gaisa. Mitruma saturu var noteikt, arī izmērot nogriezni OD un pareizinot to ar mērogu M_x , t. i., $x_C = OD \cdot M_x$.

Tvaika un gāzu maisījuma mitruma saturu var aprēķināt pēc šādas formulas:

$$x = \frac{M_t}{M_g} \frac{\varphi p_p}{p - \varphi p_p} \quad (16.10)$$

vai ūdens tvaika un gaisa gadījumā

$$x = 0,622 \frac{\varphi p_p}{p - \varphi p_p}$$

kur M_t un M_g — tvaika un gāzes molmasa, kg/mol; φ — gāzes relatīvais mitrums; p — kopējais spiediens, Pa; p_p — piesātināta ūdens tvaika spiediens attiecīgajā temperatūrā, Pa.

3) *nemainīgas temperatūras līnijas* — *izoterms* ($t = \text{const}$) ir taisnes. Šo līniju leņķis attiecībā pret horizontālo asi pieaug, paaugstinoties temperatūrai, tādēļ izoterms virzienā pa labi no ordinātu ass vērstas uz augšu (16.4. att. c) un attālumus starp izotermām palielinās. Temperatūras noteikšanai no punkta C velk izotermi paralēlu līniju. Tur, kur tā krusto ordinātu asi, nolasa temperatūru t_c . Precīzāk temperatūru iespējams noteikt, grafiski interpolējot;

4) *nemainīga relatīvā mitruma līnijas* ($\varphi = \text{const}$) uz diagrammas attēlotas vēdekļa veidā. Attēlā parādītas nemainīga relatīvā mitruma līnijas mitrumam 5...100% (16.4. att. d). Šīs līnijas iegūtas, savienojot krustpunktus, kur izoterma t krustojas ar mitruma saturu x , kas aprēķināts pēc formulas (16.3), vadoties no temperatūras un relatīvā mitruma. Pieņemot, ka $\varphi = 1$, pēc minētās formulas dažādām temperatūrām aprēķina x vērtības. Aprēķinātajām x līnijām krustojoties ar attiecīgajām izotermām, iegūst punktus, kurus savienojot iegūst relatīvā mitruma līniju, ja $\varphi = 1$. Pēc tam to pašu atkārtoti ar $\varphi = 0,9$; $\varphi = 0,8$ utt.

Temperatūrās virs 99,4 °C (ūdens viršanas temperatūra spiedienā 0,0993 MPa) relatīvā mitruma līnijām ir ass lūzums un tās novirzās uz augšu ar niecīgu slīpumu pa kreisi attiecībā pret vertikāli. Šāds līnijas lūzums rodas tāpēc, ka izdarīts šāds pieņēmums — viršanas temperatūrā piesātināta ūdens tvaika parciālais spiediens vienāds ar barometrisko spiedienu un tas nemainās, paaugstinoties temperatūrai. Arī mitruma saturs paliek nemainīgs. Tā kā tvaika tilpummasa atkarīga no temperatūras, tad līnija φ iegūst niecīgu novirzi pa kreisi no vertikāles.

Virs 99,4 °C izoterms spiedienā 0,0993 MPa ir ūdens tvaika josla. Līnija $\varphi = 100\%$ atbilst maksimālajam mitrumam, kas attiecīgajā temperatūrā gaisā ir tvaika veidā.

Relatīvo mitrumu punktam A (16.4. att. d) nosaka, grafiski interpolējot. Caur punktu A velk horizontālu līniju BC . Zinot, ka līnija BC līdzvērtīga 10% (t. i., $\varphi_C - \varphi_B$), relatīvo mitrumu iegūst, izmantojot formulu

$$\varphi_A = \varphi_B + \frac{10AB}{BC} = \varphi_C - \frac{10AC}{BC}$$

kur φ_B , φ_C — relatīvais mitrums punktos B un C ;

5) ūdens tvaika parciālā spiediena līnijas sākas koordinātu sākumpunktā un turpinās līdz ordinātu asij labajā pusē (16.4. att. e). Ūdens tvaika parciālo spiedienu p_t aprēķina pēc šādas formulas:

$$p_t = \frac{xp}{0,622+x} \quad (16.11)$$

No formulas redzams, ka ūdens tvaika parciālais spiediens atkarīgs no mitruma satura x , bet nav atkarīgs no temperatūras un relatīvā mitruma. Ūdens tvaika parciālo spiedienu punktā A (16.4. att. e) nosaka, velkot no šī punkta perpendikulu pret abscisu asi, līdz tas krusto ūdens tvaika parciālā spiediena taisni punktā B . No punkta B velk horizontāli pret ordinātu asi (pa labi) un nolasa spiedienu p_t^A . Šo spiedienu var noteikt, arī izmērot nogriezni BC un iegūtos milimetrus pareizinot ar diagrammas spiediena mērogu M_p , t. i., $p_t^A = BC \cdot M_p$;

6) mitrā termometra temperatūras līnijas ($t_m = \text{const}$) $H-x$ diagrammā virzās gandrīz paralēli $H = \text{const}$ līnijām. Diagrammā (16.4. att. f) līnijas $t_m = \text{const}$ parādītas ar svītrlīnijām.

Mitrā termometra temperatūras noteikšanai punktā A velk svītrlīnijām paralēlu taisni, līdz tā krusto līniju $\varphi = 100\%$ punktā B . Izoterma, kas vilkta no punkta B , nosaka mitrā termometra temperatūru t_m^A , kura atbilst gaisam ar punkta A parametriem.

Dažās diagrammās (16.3. att.) mitrā termometra temperatūras līnijas neuzrāda. Nosakot mitrā termometra temperatūru, no attiecīgā punkta, kas raksturo gaisu, velk taisni, kura paralēla entalpiju līnijām, līdz tā krusto relatīvā mitruma līniju $\varphi = 100\%$. Krustpunktam atbilstošo izotermu pieņem par mitrā termometra temperatūru.

Lietojot $H-x$ diagrammu, iespējams noteikt arī *rasas punktu*, t. i., *temperatūru, kurā mitrais gaiss kļūst piesātināts* ($\varphi = 100\%$), ja to dzesē, nemainot mitruma saturu ($x = \text{const}$). Rasas punkts diagrammā atrodas tur, kur mitruma satura līnija $x = \text{const}$ krustojas ar relatīvā mitruma līniju $\varphi = 100\%$. Punkta A (16.4. att. e) rasas punkts ir D . Ja zināms rasas punkts, var noteikt rasas temperatūru t_r , kas norāda, līdz kādai temperatūrai jāatdzesē gaiss, lai tas kļūtu piesātināts ar ūdens tvaiku. Gaisa tālāka atdzesēšana saistīta ar mitruma izdalīšanos, jo gaisa atdzesēšana turpināsies piesātinātā stāvoklī, t. i., pa relatīvā mitruma līniju $\varphi = 100\%$.

Kā iepriekš jau norādīts, $H-x$ diagramma sastādīta spiedienam 0,0993 MPa. Mainoties barometriskajam spiedienam, diagramma mainās šādi:

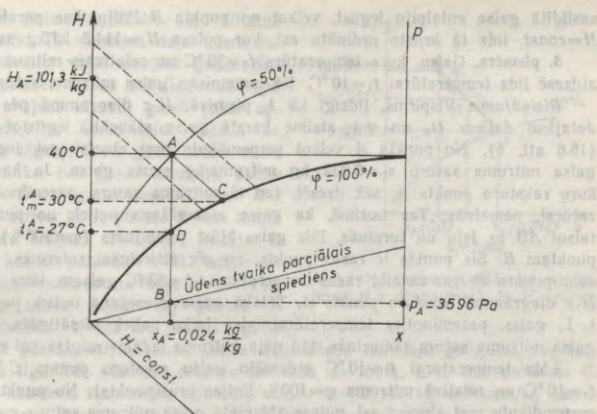
1) samazinoties spiedienam, visa relatīvā mitruma līniju saime ($\varphi = \text{const}$) pārvietojas uz leju, nemainot savstarpējo stāvokli;

2) palielinoties spiedienam, φ līnijas pārvietojas attiecīgi uz augšu, nemainot savstarpējo stāvokli.

Ja, piemēram, spiedienā 0,0993 MPa relatīvais mitrums ir 60%, tad, spiedienam samazinoties uz pusi — līdz 0,0496 MPa, relatīvais mitrums ir 30%. Praktiskajos aprēķinos barometriskais spiediens mainās nelielās robežās, tādēļ $H-x$ diagrammā nekādus labojumus neizdara.

Mitrā gaisa entalpija nav atkarīga no spiediena un dotajā temperatūrā ar attiecīgu mitruma saturu paliek nemainīga.

Mitrā gaisa $H-x$ diagramma lietojama arī dūmgāzēm, jo starpība starp gaisa un dūmgāzu īpatnējām siltumietilpībām ir niecīga (procentu daļas) un to var neievērot.



16.5. att. Gaisa parametru noteikšana, izmantojot $H-x$ diagrammu.

Lai labāk izprastu $H-x$ diagrammas uzbūvi, aplūkosim dažus piemērus.

1. piemērs. Gaisa temperatūra 40°C , relatīvais mitrums $\varphi=50\%$. Pēc $H-x$ diagrammas noteikt pārejos gaisa parametrus.

Risinājums. $H-x$ diagrammā meklē punktu, kur izoterma $t=40^{\circ}\text{C}$ krustojas ar relatīva mitruma līniju $\varphi=50\%$. Iegūst punktu A (16.5. att.). Mitruma satūra noteikšanai no punkta A velk perpendikulu pret abscisu asi un iegūst mitruma saturu $x_A=0,024$ kg mitruma/kg sausa gaisa. No punkta A velkot līniju, kas paralēla līnijām $H=const$, iegūst gaisa entalpiju $H_A=101,3$ kJ/kg sausa gaisa.

Ūdens tvaika daļiālo spiedienu nosaka, ja no punkta B (ūdens tvaika daļiālā spiediena līnijas un no punkta A novilkta perpendikula krustpunkts) velk horizontālu līniju līdz labās puses ordinātu asij, kur nolasa spiedienu $p_A\approx 3596$ Pa.

Mitrā termometra temperatūru punktā A nosaka, ja no tā paralēli mitrā termometra līnijām (svītrlīnijām) velk līniju, līdz tā krusto relatīva mitruma līniju $\varphi=100\%$. Iegūst punktu C . Punktam C atbilstošā temperatūra ir mitrā termometra temperatūra ($t_m^A=30^{\circ}\text{C}$) gaisam ar punkta A parametriem.

Rasas punkts gaisam ar punkta A parametriem nosakāms, pieņemot, ka gaisu dzesē ar konstantu mitruma saturu $x_A\approx const$ līdz relatīvajam mitrumam $\varphi=100\%$ (punkts D). Punkts D ir attiecīgā gaisa rasas punkts. Punktam D atbilstošā temperatūra ir rasas temperatūra $t_r^A=27^{\circ}\text{C}$.

2. piemērs. Cik liela ir gaisa entalpija pēc sasildīšanas kaloriferā (mitrums saturs paliek nemainīgs, t. i., $x=const$) līdz temperatūrai $t_1=90^{\circ}\text{C}$, ja aukstā gaisa temperatūra $t_0=20^{\circ}\text{C}$ un relatīvais mitrums $\varphi_0=60\%$?

Risinājums. Vispirms, tāpat kā 1. piemērā, atzīmē aukstā gaisa stāvokli $H-x$ diagrammā, t. i., tur, kur izoterma (20°C) krustojas ar doto relatīva mitruma līniju (60%), iegūst punktu A (16.6. att. a). Ja gaisa sasildīšana notiek ar $x=const$ (aukstais gaisa kaloriferā saskaras ar karstām virsmām, tādēļ papildu mitrums gaisā neieklūst), tad, no punkta A velkot vertikāli uz augšu līdz izotermai $t_1=90^{\circ}\text{C}$, iegūst punktu B , kas raksturo sasildīto gaisu, jo $x_0=x_1$. Kaloriferā

sasildītā gaisa entalpiju iegūst, velkot no punkta B līniju, kas paralēla līnijām $H=const$, līdz tā krusto ordinātu asi, kur nolasa $H_1=114,3$ kJ/kg sausa gaisa.

3. piemērs. Gaisa, kura temperatūra $t_0=50^\circ\text{C}$ un relatīvais mitrums $\varphi_0=40\%$, atdzesē līdz temperatūrai $t_1=10^\circ\text{C}$. Kā izmainīsies gaisa mitruma saturs?

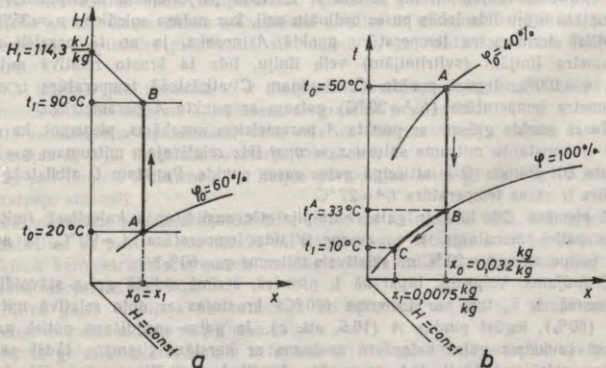
Risinājums. Vispirms, līdzīgi kā 1. piemērā, $H-x$ diagrammā pēc uzdevumā dotajiem datiem (t_0 un φ_0) atzīmē karstā gaisa stāvokli, iegūstot punktu A (16.6 att. *b*). No punkta A velkot perpendikulu pret abscisu asi, iegūst karstā gaisa mitruma saturu $x_0=0,032$ kg mitruma/kg sausa gaisa. Ja karsto gaisu, kuru raksturo punkts A , sāk dzesēt, tad tā mitruma saturs, pazeminoties temperatūrai, nemainās. Tas nozīmē, ka gaisa atdzesēšana notiek no punkta A pa taisni AB uz leju un turpinās, līdz gaisa kļūst piesātināts ($\varphi=100\%$), t. i., līdz punktam B . Šis punkts ir rasas punkts, un pēc attiecīgās izoterma, kas virzīta caur punktu B , var noteikt rasas temperatūru $t_r^A=33^\circ\text{C}$ gaisam, kura parametrus $H-x$ diagrammā raksturo punkts A . Tālāk gaisa dzesēšana notiek pa līniju BC , t. i., gaisa, pazeminoties temperatūrai, visu laiku paliek piesātināts, bet, tā kā gaisa mitruma saturs samazinās, tad daļa mitruma izdalās miglas vai rasas veidā.

Līdz temperatūrai $t_1=10^\circ\text{C}$ atdzesēto gaisu raksturo punkts C (izoterma $t_1\approx 10^\circ\text{C}$ un relatīvā mitruma $\varphi=100\%$ līnijas krustpunkts). No punkta C velkot perpendikulu pret abscisu asi, nolasa atdzesētā gaisa mitruma saturu $x_1=0,0075$ kg mitruma/kg sausa gaisa.

Karsto gaisu atdzesējot, tā mitruma satura izmaiņa ir $x_0-x_1=0,032-0,0075=0,0245$ kg mitruma/kg sausa gaisa. Iegūtais rezultāts norāda, ka katram kilogramam sausā gaisa atdzīstot no 50°C līdz 10°C , dotajā gadījumā no gaisa, kuru raksturo punkts A , izdalās 0,0245 kg ūdens miglas vai rasas veidā.

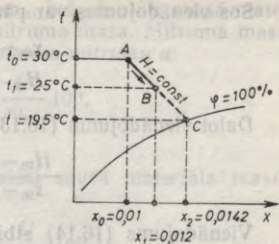
4. piemērs. Gaisa parametri: temperatūra $t_0=30^\circ\text{C}$ un mitruma saturs $x_0=0,01$ kg mitruma/kg sausa gaisa. Kā izmainīsies gaisa temperatūra, ja ūdens iztvaikošanas rezultātā gaisa mitruma saturs izmainīsies līdz $x_1=0,012$ kg mitruma/kg sausa gaisa?

Risinājums. $H-x$ diagrammā (16.7. att.) atzīmē punktu A (t_0 un x_0 krustpunkts), kas raksturo gaisa sākotnējo stāvokli. Pieņem, ka iztvaikošana notiek



16.6. att. Gaisa sildīšanas un dzesēšanas attēlojums $H-x$ diagrammā.

bez siltuma zudumiem. Gaisa daļu siltuma atdod ūdenim. Tā rezultātā daļa ūdens iztvaiko un tvaika veidā nokļūst gaisā. Siltums, kas paterēts ūdens iztvaikošanai, kopā ar tvaiku nokļūst atpakaļ gaisā (tikai apslēptā veidā, jo, kondensējot tvaiku, šo siltumu var atgūt), tādēļ gaisa temperatūra gan pazeminās, bet gaisa entalpija paliek nemainīga. Šādu gaisa mitrināšanu H - x diagrammā attēlo, ja no punkta A velk līniju, kas paralēla līnijām $H=const.$ Punktu B iegūst tur, kur no punkta A vilktā entalpijas līnija krusto mitruma satūra līniju $x_1=0,012$ kg mitruma/kg sausa gaisa. No punkta B vilktā izoterma $t_1 \approx 25^\circ\text{C}$ parāda gaisa temperatūru pēc tā mitrināšanas. Gaisa mitrināšana minētajā gadījumā var turpināties tik ilgi, līdz sasniedz relatīvo mitrumu $\varphi=100\%$, t. i., līdz punktam C . Tad gais sasniedz maksimālo mitruma saturu $x_2=0,0142$ kg mitruma/kg sausa gaisa un ūdens iztvaikošana izbeidzas. Gaisa temperatūra $t=19,5^\circ\text{C}$ un ūdens temperatūra kļūst vienādas.



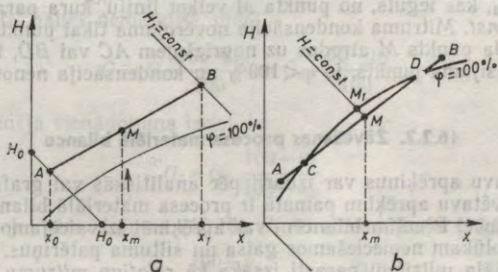
16.7. att. Gaisa dzesēšanas attēlojums H - x diagrammā, ja $H=const.$

Dažādu parametru gaisa samaisīšana. Pieņem, ka L_0 kg gaisa, kura parametri x_0 un H_0 , samaisa ar L_1 kg gaisa, kura parametri x_1 un H_1 .

H - x diagrammā (16.8. att. a) vispirms atzīmē punktus A un B , kuri raksturo gaisa sākuma parametrus. Attiecību $L_1/L_0=n$ sauc par *recirkulācijas pakāpi*, un tā parāda, ka n kg sausā gaisa ar punkta B parametriem samaisa ar 1 kg sausā gaisa ar punkta A parametriem. Kopējā sausā gaisa masa pirms un pēc samaisīšanas ir $1+n$ kg. Kopējais mitruma saturs un entalpija pirms un pēc samaisīšanas ir nemainīgi, t. i.,

$$x_0 + nx_1 = x_m(1+n) \quad \text{un} \quad H_0 + nH_1 = H_m(1+n),$$

kur x_m un H_m — gāzu maisījuma mitruma saturs un entalpija.



16.8. att. Gaisa samaisīšanas attēlojums H - x diagrammā.

Sos vienādojumus var pārrakstīt šādi:

$$x_m - x_0 = n(x_1 - x_m), \quad (16.12)$$

$$H_m - H_0 = n(H_1 - H_m). \quad (16.13)$$

Dalot vienādojumu (16.13) ar vienādojumu (16.12), iegūst, ka

$$\frac{H_m - H_0}{x_m - x_0} = \frac{H_1 - H_m}{x_1 - x_m}. \quad (16.14)$$

Vienādojums (16.14) atbilst taisnei, kas vilkta caur punktiem ar koordinātām x_0, H_0 un x_1, H_1 . No minētā izriet, ka gaisa maisījuma parametru raksturo punkts M , kas atrodas uz taisnes, kura vilkta caur punktiem ar koordinātām x_0, H_0 (punkts A) un x_1, H_1 (punkts B). Punkta M atrašanās vietu uz taisnes AB viegli noteikt, ja zināma recirkulācijas pakāpe n vai mitruma saturs x_m (vai entalpija H_m).

No vienādojuma (16.12) izriet, ka

$$x_m = \frac{x_0 + nx_1}{1 + n}. \quad (16.15)$$

Aprēķināto mitruma satura x_m vērtību atliek uz abscisu ass un no šī punkta velk vertikāli uz augšu, līdz tā krusto taisni AB . Pēc iegūtā krustpunkta M var noteikt gaisa maisījuma parametrus.

No vienādojuma (16.15) iegūst, ka

$$n = \frac{x_m - x_0}{x_1 - x_m} = \frac{AM}{BM}.$$

Jo lielāka recirkulācijas pakāpe n , jo punkts M atrodas tuvāk punktam B — un otrādi.

Ja punkts M atrodas zem līnijas $\varphi = 100\%$ (16.8. att. *b*), tad tas neatbilst īstajam maisījuma punktam. Zem līnijas $\varphi = 100\%$ notiek mitruma kondensācija, un īstos maisījuma parametru raksturo punkts M_1 , kas iegūts, no punkta M velkot līniju, kura paralēla līnijai $H = \text{const}$. Mitruma kondensācija novērojama tikai punktu C un D robežās. Ja punkts M atrodas uz nogriežņiem AC vai BD , tad tas ir īstais maisījuma punkts, jo $\varphi < 100\%$ un kondensācija nenotiek.

16.2.2. Žāvēšanas procesa materiālā bilance

Žāvētavu aprēķinus var izdarīt pēc analītiskās vai grafiskās metodes. Žāvētavu aprēķinu pamatā ir procesa materiālā bilance un siltuma bilance. Pēc šīm bilancēm var aprēķināt iztvaicējamo mitrumu un šim nolūkam nepieciešamos gaisa un siltuma patēriņus.

Materiāla mitrumu parasti izsaka kā *relatīvo mitrumu*, bet dažreiz kā *absolūto mitrumu*.

Ja mitrā materiāla masu apzīmē ar m_m , bet absolūti sausā materiāla masu ar m_s , tad $m_m - m_s = U$ ir mitruma masa. Mitruma masu U attiecinot pret sākuma masu, iegūst *relatīvo mitrumu* u :

$$u = \frac{m_m - m_s}{m_m} \cdot 100 = \frac{U}{m_m} \cdot 100,$$

kur u izteikts procentos.

Mitruma masu attiecinot pret absolūti sausā materiāla masu, iegūst *absolūto mitrumu* u_a :

$$u_a = \frac{m_m - m_s}{m_s} \cdot 100 = \frac{U}{m_s} \cdot 100,$$

kur u_a izteikts procentos.

No viena mitruma izteiksmes veida pārejot uz otru, lieto šādas formulas:

$$u = \frac{100u_a}{100 + u_a} \quad \text{un} \quad u_a = \frac{100u}{100 - u}.$$

Uzskatāmākai žūšanas kinētikas un dinamikas raksturošanai materiāla mitrumu izsaka kā absolūto mitrumu.

Ja žāvētavā ievadītā mitrā materiāla masu sekundē apzīmē ar G_1 , bet no žāvētavas izvadītā materiāla masu sekundē ar G_2 un materiāla relatīvo mitrumu, ievadot žāvētavā, ar u_1 , bet, izvadot no žāvētavas, — ar u_2 , tad iztvaicētā mitruma masa sekundē

$$U = G_1 - G_2, \quad (16.16)$$

kur lielumi U , G_1 un G_2 izteikti kilogramos sekundē.

Žāvētavā ievadītā materiāla sausne ir $100 - u_1$, bet no žāvētavas izvadītā materiāla sausne — $100 - u_2$.

Sausnes masa sekundē pirms žāvēšanas $G_1 \frac{100 - u_1}{100}$, bet pēc žāvēšanas — $G_2 \frac{100 - u_2}{100}$. Žāvēšanas procesā materiāla sausnes masa sekundē G_s paliek nemainīga, tādēļ

$$G_s = G_1 \frac{100 - u_1}{100} = G_2 \frac{100 - u_2}{100}.$$

No pēdējā vienādojuma izriet, ka

$$G_2 = G_1 \frac{100 - u_1}{100 - u_2}. \quad (16.17)$$

Ievietojot vienādojumā (16.16) G_2 no vienādojuma (16.17), iegūst

$$U = G_1 - G_1 \frac{100 - u_1}{100 - u_2} = G_1 \frac{u_1 - u_2}{100 - u_2}.$$

Līdzīgi iegūst vienādojumu

$$U = G_2 \frac{u_1 - u_2}{100 - u_1} = \frac{G_1 u_1 - G_2 u_2}{100}.$$

Gaisa patēriņa aprēķināšana. Žāvētavā siltumnesējs, saskaroties ar mitro materiālu, uzņem visu no materiāla iztvaicēto mitrumu un aizvada to no žāvētavas.

Apzīmējot žāvētavā ievadītā sausā gaisa patēriņu¹ ar L kg sausa gaisa/s un tā mitruma saturu ar x_1 kg mitruma/kg sausa gaisa, bet no žāvētavas aizvadāmā mitrā gaisa mitruma saturu ar x_2 kg mitruma/kg sausa gaisa, var sastādīt materiālo bilanci attiecībā uz mitrumu.

Žāvētavā ievadītais mitrums: 1) ar mitro materiālu $G_1 \frac{u_1}{100}$; 2) ar ievadāmo gaisu Lx_1 .

No žāvētavas aizvadāmais mitrums: 1) ar izžāvēto materiālu $G_2 \frac{u_2}{100}$; 2) ar mitro gaisu Lx_2 .

Ievērojot matērijas nezūdamības likumu, var rakstīt

$$G_1 \frac{u_1}{100} + Lx_1 = G_2 \frac{u_2}{100} + Lx_2 \quad \text{vai}$$

$$\frac{G_1 u_1}{100} - \frac{G_2 u_2}{100} = L(x_2 - x_1) \quad \text{vai} \quad \frac{G_1 u_1}{100} - \frac{G_2 u_2}{100} = U,$$

tādēļ

$$L(x_2 - x_1) = U.$$

Lai sekundē iztvaicētu U kg mitruma, sekundē nepieciešamā sausā gaisa masa

$$L = \frac{U}{x_2 - x_1}.$$

Ipatnējā gaisa masa b , t. i., tā sausā gaisa masa kilogramos, kas nepieciešama 1 kg mitruma iztvaicēšanai žāvētavā, aprēķināma šādi:

$$b = \frac{L}{U} = \frac{1}{x_2 - x_1}. \quad (16.18)$$

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

$$b = \frac{1}{x_2 - x_0}. \quad (16.19)$$

Ipatnējā gaisa masa ir jo lielāka, jo mazāks no žāvētavas aizplūstošā mitrā gaisa mitruma saturs x_2 un jo lielāks āra gaisa mit-

¹ Sausā gaisa patēriņš L visā žāvēšanas procesā paliek nemainīgs.

ruma saturs x_0 . Āra gaisa mitruma saturs ir mainīgs: ziemā mazāks, vasarā lielāks, tādēļ, aprēķinot gaisa patēriņu žāvēšanas vajadzībām, jāvadās no vasaras gaisa parametriem. Žāvēšanai patērē vairāk āra gaisa, nekā ir aprēķinātais sausais gaiss, jo 1 kg sausā gaisa atbilst $1+x_0$ kilogramiem āra gaisa.

Ipatnējā āra gaisa masa aprēķināma šādi:

$$b_a = b(1+x_0) = \frac{1+x_0}{x_2-x_0}$$

16.2.3. Žāvēšanai nepieciešamā siltuma noteikšana

Žāvēšanai nepieciešamo siltumu aprēķina, pamatojoties uz žāvēšanas procesa siltuma bilanci. Siltuma bilanci sastāda 1 kg iztvaicētā mitruma.

Žāvētavā ievadītais siltums. 1. Ar siltumnesēju L ievadītā siltuma plūsma ir LH_1 , kur H_1 — gaisa entalpija, ieplūstot žāvētavā, J/kg sausa gaisa. Tā summējas no āra gaisa (aukstā) siltuma plūsmas LH_0 un kaloriferā pievadītās siltuma plūsmas Φ_k , t. i.,

$$LH_1 = LH_0 + \Phi_k. \quad (16.20)$$

kur H_0 — āra gaisa entalpija, J/kg sausa gaisa; Φ_k — siltuma plūsma kaloriferā, W.

2. Ar mitro materiālu ievadītā siltuma plūsma

$$\Phi_m = G_1 c_1 t_m, \quad (16.21)$$

kur G_1 — mitrā materiāla patēriņš, kg/s; c_1 — materiāla vidējā īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K); t_m — mitrā materiāla temperatūra, °C.

No formulas (16.16)

$$G_1 = G_2 + U.$$

Tādēļ ar mitro materiālu ievadīto siltuma plūsmu Φ_m var izteikt arī šādi:

$$\Phi_m = G_2 c_1 t_m + U c t_m,$$

kur c — mitruma īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K).

3. Ar transportiekārtu ievadītā siltuma plūsma

$$\Phi_t = G_t c_t t_t,$$

kur G_t — laika vienībā ievadītā transportiekārtas masa, kg/s; c_t — transportiekārtas materiāla īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K); t_t — transportiekārtas sākuma temperatūra, °C.

4. Pašā žāvēšanas kamerā var būt siltuma avots papildu siltuma ievadīšanai (žāvētavā papildus ievadītā siltuma nozīme aplūkota tālāk). Žāvētavā papildus ievadītā siltuma plūsma ir Φ_p .

No žāvētavas aizvadītais siltums. 1. Ar mitro gaisu aizvada siltuma plūsmu LH_2 , kur H_2 — mitrā gaisa entalpija, J/kg sausa gaisa.

2. Ar izžāvēto materiālu aizvadītā siltuma plūsma

$$\Phi'_m = G_2 c_1 t'_m,$$

kur t'_m — no žāvētavas izvadāmā izžāvētā materiāla temperatūra, °C.

3. Ar transportiekārtu aizvadītā siltuma plūsma

$$\Phi''_t = G_t c_t t'_t,$$

kur t'_t — no žāvētavas izvadāmās transportiekārtas temperatūra, °C.

4. Siltuma zudumi caur žāvētavas ārējām virsmām apkārtējā vidē:

$$\Phi_z = k(t_v - t_g)S,$$

kur k — siltumpārejas koeficients caur žāvētavas sienām uz apkārtējo vidi, $W/(m^2 \cdot K)$; t_v — siltumnesēja vidējā temperatūra, kuru aprēķina pēc žāvētavā ieplūstošā un no žāvētavas izplūstošā siltumnesēja temperatūrām t_1 un t_2 , t. i., $t_v = (t_1 + t_2)/2$, °C; t_g — ap žāvētavu esošās vides temperatūra, °C; S — kopējā žāvētavas virsma, kur kuru notiek siltumapmaiņa, m^2 .

Siltuma bilances vienādojums, ievērojot ievadītās un izvadītās siltuma plūsmas, ir šāds:

$$\begin{aligned} LH_0 + \Phi_k + \Phi_p + G_2 c_1 t_m + U c t_m + G_t c_t t_t &= \\ = LH_2 + G_2 c_1 t'_m + G_t c_t t'_t + \Phi_z. \end{aligned}$$

Attiecinošā siltuma bilanci uz 1 kilogramu iztvaicētā mitruma, iegūst

$$\begin{aligned} LH_0/U + \Phi_k/U + \Phi_p/U + G_2 c_1 t_m/U + U c t_m/U + G_t c_t t_t/U &= \\ = LH_2/U + G_2 c_1 t'_m/U + G_t c_t t'_t/U + \Phi_z/U. \end{aligned}$$

Siltums, kas ievadīts žāvētavā, summējas no kalorifera siltuma $\Phi_k/U = q_k$ un no žāvētavā papildus ievadītā siltuma $\Phi_p/U = q_p$. Apzīmējot Φ_z/U ar q_z , no siltuma bilances iegūst, ka

$$\begin{aligned} q = q_k + q_p = b(H_2 - H_0) + G_2 c_1 (t'_m - t_m)/U + \\ + G_t c_t (t'_t - t_t)/U - c t_m + q_z. \end{aligned} \quad (16.22)$$

Ja $G_2 c_1 (t'_m - t_m)/U$ apzīmē ar q_m , bet attiecību $G_t c_t (t'_t - t_t)/U$ — ar q_t , tad

$$q = q_k + q_p = b(H_2 - H_0) + q_m + q_t + q_z - c t_m. \quad (16.23)$$

Žāvēšanas tehnikā lielumu q sauc par īpatnējo siltuma daudzumu. Tas ir siltums, kas nepieciešams 1 kilograma mitruma iztvaicēšanai žāvētavā. Izmantojot īpatnējo siltuma daudzumu, var salīdzināt dažādas žāvētavas.

Saskaņā ar vienādojumu (16.23)

$$q_k = b(H_2 - H_0) - [(q_p + c t_m) - (q_m + q_t + q_z)]. \quad (16.24)$$

Kvadrātiekvāš esošo starpību apzīmē ar Δ , t. i.,

$$(q_p + c t_m) - (q_m + q_t + q_z) = \Delta, \quad (16.25)$$

kur Δ parāda starpību starp žāvētavā papildus ievadīto siltumu un siltuma zudumiem attiecībā uz 1 kg iztvaicētā mitruma.

Ievērojot minēto, vienādojumu (16.24) var izteikt arī šādi:

$$q_k = b(H_2 - H_0) - \Delta. \quad (16.26)$$

Vienādojumu (16.20) attiecinot uz 1 kg iztvaicētā mitruma, iegūst, ka $bH_1 = bH_0 + q_k$. Tad $q_k = b(H_1 - H_0)$. Saskaņā ar vienādojumu (16.26) var rakstīt, ka

$$bH_2 - bH_0 - \Delta = b(H_1 - H_0).$$

Lieluma b vietā ievietojot izteiksmi (16.18), iegūst, ka

$$\Delta = \frac{H_2 - H_1}{x_2 - x_1}. \quad (16.27)$$

Žāvētavās, kur neievada papildu siltumu ($q_p = 0$), vienādojuma (16.25) locekļu summa $q_m + q_t + q_z > ct_m$, tādēļ šādās žāvētavās $\Delta = ct_m - (q_m + q_t + q_z) < 0$.

No vienādojuma (16.27) redzams, ja $\frac{H_2 - H_1}{x_2 - x_1} < 0$ un $H_2 - H_1 < 0$, tad šādās žāvētavās siltumnesēja entalpija žāvēšanas laikā samazinās, t. i., $H_2 < H_1$.

Ja žāvētavas kamerā ievada papildu siltumu ($q_p > 0$), tad vienādojumā (16.25) $q_p + ct_m > q_m + q_t + q_z$ un $\Delta > 0$. Tātad siltumnesēja entalpija žāvēšanas laikā pieaug, t. i., $H_2 > H_1$.

Ja $q_m + q_t + q_z = 0$, $q_p + ct_m = 0$, tad $\Delta = 0$ un $H_2 = H_1$.

Tādu žāvētavu sauc par *teorētisko žāvētavu* atšķirībā no *reālās žāvētavas*, kurā ir siltuma zudumi ar materiālu, ar transportiekārtu un apkārtējā vidē. Teorētiskajā žāvētavā siltumnesēja siltumu izlieto tikai mitruma iztvaicēšanai, bet radies tvaiks pārvietojas siltumnesējā un ievada tajā atpakaļ iztvaicēšanai patērēto siltumu. Siltumnesēja entalpija šādā žāvētavā nemainās ($H = \text{const}$). Tādēļ šādu žūšanu sauc arī par *adiabātisku žūšanu*.

Formula (16.27) izmantojama konvektīvajām žāvētavām.

Kontakta žāvētavām gaiss nav siltumnesējs. Vienādojuma (16.23) locekli $b(H_2 - H_0)$ pārveido šādi:

$$b(H_2 - H_0) = bc_g(t_2 - t_0) + h_t,$$

kur h_t — ūdens tvaika entalpija temperatūrā t_2 , J/kg; c_g — gaisa īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K).

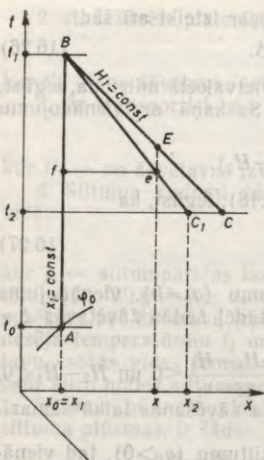
Ievietojot pārveidoto locekli vienādojumā (16.23), iegūst, ka

$$q = bc_g(t_2 - t_0) + h_t + q_m + q_t + q_z - ct_m. \quad (16.28)$$

Vienādojumā (16.28) locekļi $bc_g(t_2 - t_0)$ ir siltuma daudzums, kas nepieciešams gaisa sasildīšanai no t_0 līdz t_2 . Kontakta žāvētavās $b = 0$, tādēļ $bc_g(t_2 - t_0) = 0$. Vienādojums īpatnējā siltuma daudzuma noteikšanai kontakta žāvētavām iegūst šādu veidu:

$$q = h_t + q_m + q_t + q_z - ct_m.$$

Aprēķinot žāvētavas pēc analītiskās metodes, īpatnējo gaisa masu b un īpatnējo siltuma daudzumu q aprēķina pēc formulām (16.19)



16.9. att. Žāvēšanas procesa attēlojums $H-x$ diagrammā.

Lai varētu attēlot žāvēšanas procesu $H-x$ diagrammā, jābūt zināmiem vismaz šādiem gaisa parametriem: āra gaisa temperatūrai t_0 un relatīvajam mitrumam φ_0 , gaisa temperatūrai aiz kalorifera t_1 un no žāvētavas aizplūstošā mitrā gaisa temperatūrai t_2 (vai φ_2) vai arī t_0 , φ_0 un t_2 , φ_2 . Attēlojot žāvēšanas procesu $H-x$ diagrammā, jāatceras, ka gaisa mitruma saturs kaloriferā nemainās, t. i., $x_0 = x_1$.

Vispirms $H-x$ diagrammā (16.9. att.) atzīmē punktu A (kur t_0 krustojas ar φ_0), kas raksturo āra gaisu. No punkta A velk vertikāli uz augšu (jo $x_0 = x_1$), līdz tā krusto izotermu t_1 , iegūstot punktu B .

Teorētiskajā žāvētavā $H_1 = H_2$, tādēļ darba taisne šādai žāvētavai attēlojama, ja no punkta B (žāvēšanas procesa sākuma punkts) velk līniju $H = const$, līdz tā krusto doto izotermu t_2 (vai φ_2).

Ja doti āra gaisa parametri t_0 un φ_0 un mitrā gaisa parametri t_2 un φ_2 , tad žāvēšanas procesa attēlošanai $H-x$ diagrammā atzīmē punktu A (t_0 un φ_0 krustpunkts) un punktu C (t_2 un φ_2 krustpunkts). Tur, kur no punkta A vilktā vertikāle krusto līniju $H = const$, kura vilkta no punkta C , iegūst punktu B , kas raksturo žāvētavā iepļūstošo gaisu.

Teorētiskās žāvētavas gaisa sasildīšanu kaloriferā (līnija AB) un žāvēšanas procesu (līnija BC) $H-x$ diagrammā attēlo laužtā līnija $AB-BC$.

Reālām žāvētavām gaisa sasildīšanas līnija AB (16.9. att.) paliek bez izmaiņām, ja pieņem, ka sākuma parametri āra gaisam ir t_0 un φ_0 , bet aiz kalorifera sasildītā gaisa temperatūra ir t_1 . Žāvētavā

(16.26), vispirms nosakot q_m , q_1 , q_2 un pēc vienādojuma (16.25) aprēķinot Δ .

Gaisa entalpija kaloriferā mainās no H_0 līdz H_1 , tādēļ īpatnējo siltuma daudzumu kaloriferam nosaka pēc formulas

$$q_k = b(H_1 - H_0) \quad (16.29)$$

un salīdzina ar vienādojuma

$$q_k = b(1 + 1,97x_0) 10^3 (t_1 - t_0) \quad (16.30)$$

rezultātu, jo gaiss kaloriferā sasilst no t_0 līdz t_1 .

Vienādojumu (16.26), (16.29) un (16.30) risināšana saistīta ar t_2 vai φ_2 (viens no tiem ir zināms) izraudzīšanos, līdz aprēķinātie īpatnējie siltuma daudzumi sakrīt.

Ērtāka žāvētavas aprēķina metode ir grafiskā metode.

Žāvēšanas procesa attēlojums $H-x$ diagrammā. Žāvētavu aprēķināšanas grafiskā metode pamatojas uz žāvēšanas procesa attēlošanu $H-x$ diagrammā.

ieplūstošo gaisu raksturo punkts B . Izmainās tikai darba taisne BC . Reālās žāvētavas darba taisnes noteikšanai aprēķina lielumus q_m , q_1 un q_2 un nosaka Δ vērtību.

Ja iegūts, ka $\Delta < 0$, tad $H_2 < H_1$, un darba taisne BC_1 tādai žāvētavai ir novirzīta zemāk par teorētiskās žāvētavas darba taisni. Taisnes BC_1 virziena noteikšanai izmanto izteiksmi (16.27)

$$\Delta = \frac{H_2 - H_1}{x_2 - x_1}.$$

Žāvēšanas procesā $\Delta = \text{const}$, tādēļ jebkuram darba taisnes punktam (uz taisnes BC_1) ir spēkā sakarība

$$\Delta = \frac{H - H_1}{x - x_1}.$$

H - x diagrammā (16.9. att.) no jebkura brīvi izraudzīta taisnes BC_1 punkta (pieņem punktu e) velk vertikāli līdz teorētiskās žāvētavas darba taisnei BC ($H_1 = \text{const}$), iegūstot punktu E . Reizinājums $eE \cdot M_H$ (diagrammas mērogā) atbilst entalpiju starpībai starp izraudzītā punkta e entalpiju H un taisnes $H_1 = \text{const}$ punkta E entalpiju H_1 , t. i., $eE \cdot M_H = H - H_1$.

Attālums pa horizontāli (diagrammas mērogā) no punkta e līdz vertikālei $x_1 = \text{const}$ (līnija AB) atbilst mitrumu starpībai starp izraudzītā punkta e mitruma saturu x un vertikāles $x_1 = \text{const}$ mitruma saturu x_1 , t. i., $ef \cdot M_x = x - x_1$. Tādēļ jebkuram brīvi izraudzītam punktam (dotajā gadījumā punktam e) uz taisnes BC_1 var rakstīt sakarību

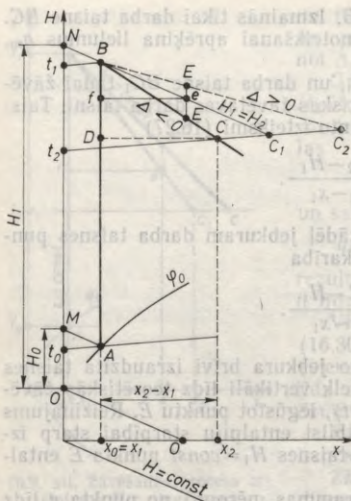
$$\Delta = \frac{H - H_1}{x - x_1} = \frac{eE \cdot M_H}{ef \cdot M_x} = \text{const}.$$

H - x diagrammās temperatūrām līdz 200°C entalpijas mērogs M_H ir $1 \text{ mm} = 418,6 \text{ J/kg}$ sausa gaisa, bet mitruma satura mērogs M_x ir $1 \text{ mm} = 0,002 \text{ kg}$ mitruma/kg sausa gaisa, tad

$$\Delta = \frac{418,6}{0,002} \frac{eE}{ef} \approx 2,09 \cdot 10^5 \frac{eE}{ef} \quad \text{un} \quad eE = \frac{\Delta \cdot ef}{2,09 \cdot 10^5}.$$

Lai iegūtu reālas žāvētavas darba taisni, žāvētavu aprēķinos rīkojas šādi (16.10. att.):

- 1) no punkta B novelk teorētiskās žāvētavas darba taisni ($H_1 = \text{const}$);
- 2) uz šīs taisnes brīvi izraugās punktu e (lai mērījumos būtu mazāka kļūda, tad šo punktu izraugās pēc iespējas tālāk no punkta B);
- 3) no izraudzītā punkta e novelk horizontālu līniju, līdz tā krusto taisni $x_1 = \text{const}$, iegūstot punktu f , un izmēra attālumu ef (milimetros);
- 4) pēc formulas (16.25) aprēķina Δ vērtību;



16.10. att. Reālas žāvētavas darba taisnes konstruēšana un lielumu b un q noteikšana.

Ja $\Delta = 0$, tad reālās žāvētavas darba taisne sakrīt ar teorētiskās žāvētavas darba taisni. Kad iegūta reālās žāvētavas darba taisne, tad nosaka īpatnējo gaisa masu un īpatnējo siltuma daudzumu.

Perpendikuls DC no punkta C (16.10. att.) pret vertikāli AB $H-x$ diagrammas mērogā izsaka mitruma saturu starpību $x_2 - x_1$, t. i.,

$$CD \cdot M_x = x_2 - x_0 = x_2 - x_1,$$

kur x_0 , x_1 un x_2 — āra, sasildītā un mitrā (no žāvētavas aizplūstošā) gaisa mitruma saturs, kg mitruma/kg sausa gaisa. Nogriezni CD mēra milimetros.

Īpatnējo gaisa masu aprēķina pēc formulas $b = \frac{1}{x_2 - x_1}$. Izteiksmes $x_2 - x_1$ vietā ievietojot $CD \cdot M_x$, iegūst

$$b = \frac{1}{CD \cdot M_x} = \frac{1}{CD \cdot 0,002} = \frac{500}{CD}. \quad (16.31)$$

Īpatnējā siltuma daudzuma noteikšanai izmanto vienādojumu

$$q = q_k = b(H_1 - H_0). \quad (16.32)$$

Ja no punktiem A un B velk līnijas, kas paralēlas līnijai $H = \text{const}$, tad uz ordinātu ass iegūst nogriezni MN , kas vienāds ar

5) izmantojot vienādojumu

$$eE = \frac{\Delta \cdot ef}{2,09 \cdot 10^5},$$

aprēķina nogriežņa eE garumu; 6) no punkta e pa vertikāli uz leju atliek nogriezni eE ;

7) no punkta B caur iegūto punktu E velk taisni, līdz tā krusto izotermu t_2 (vai φ_2) un iegūst punktu C .

Lauztā līnija $AB-BC$ raksturo reālo žāvētavu.

Ja $ct_1 + q_p > q_m + q_t + q_z$, tad $\Delta > 0$. Reālās žāvētavas darba taisnes noteikšanas metode nemainās. Ja Δ ir pozitīvs, arī nogrieznis eE kļūst pozitīvs; tas nozīmē, ka, atliekot no brīvi izraudzītā punkta e nogriezni eE , to atliek uz augšu (16.10. att. svītrlīnija). Savienojot punktus B un E (svītrlīnija) un taisni turpinot, līdz tā krusto izotermu t_2 (vai φ_2), iegūst punktu C_2 , kas raksturo reālās žāvētavas gaisu aiz žāvētavas.

nogriezni AB (jo līnijas paralēlas). Nogrieznis MN ekvivalents starpībai $H_1 - H_0$, tādēļ var rakstīt

$$MN \cdot M_H = AB \cdot M_H = H_1 - H_0.$$

Nogriezni AB mēra milimetros. Vienādojumā (16.32) ievietojot attiecīgās b un $H_1 - H_0$ izteiksmes, iegūst, ka

$$q = \frac{AB \cdot M_H}{CD \cdot M_x} = \frac{AB \cdot 418,6}{CD \cdot 0,002} = 2,09 \cdot 10^5 \frac{AB}{CD}.$$

Izmantojot īpatnējo gaisa masu b un īpatnējo siltuma daudzumu q , var salīdzināt dažādus žāvēšanas režīmus (žāvētavas). Labāks ir tas žāvēšanas režīms (žāvētava), kas nodrošina procesa realizēšanu ar mazākām b un q vērtībām.

Ja zināma īpatnējā gaisa masa, kopējo gaisa patēriņu aprēķina šādi:

$$L = bU,$$

kur L — kopējais sausa gaisa patēriņš, kg/s; U — laika vienībā žāvētavā iztvaicētais mitrums, kg/s.

Āra gaisa patēriņš

$$L_a = L(1 + x_0),$$

kur L_a izteikts kilogramos sekundē.

Pēc īpatnējā siltuma daudzuma iegūšanas aprēķina kopējo siltuma plūsmu:

$$\Phi = qU,$$

kur Φ izteikta vatos.

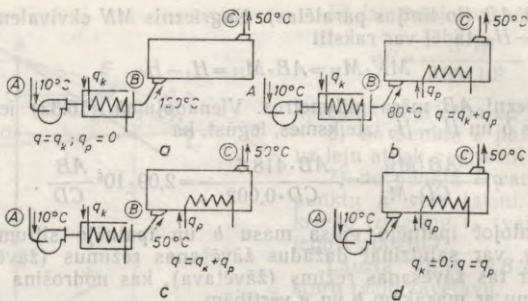
Ja zināma kopējā siltuma plūsma, aprēķina žāvēšanai nepieciešamo tvaika patēriņu:

$$D = \frac{\Phi}{h - c_k t_k},$$

kur D — tvaika patēriņš, kg/s; h — sildošā tvaika entalpija, J/kg; c_k — kondensāta īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K); t_k — kondensāta temperatūra, °C.

16.2.4. Žāvēšanas varianti

Līdz šim aplūkots vienkāršākais žāvēšanas veids, kad āra gaiss plūst caur kaloriferu un žāvētavu, saņem siltumu tikai vienreiz un visu gaisu aiz žāvētavas izvada atmosfērā. Šādi žāvējot, karstais gaiss žāvētavā ieplūst ar zemu relatīvo mitrumu φ un žāvētavā ir liela starpība starp ieplūstošā gaisa temperatūru t_1 un izplūstošā gaisa temperatūru t_2 . Minētais žāvēšanas režīms daudziem materiāliem nav pieļaujams.



16.11. att. Žāvēšanas varianti ar papildu siltuma padevi.

Maigāka žāvēšanas režīma iegūšanai lieto dažādus žāvēšanas variantus: *žāvēšanu ar papildu siltuma padevi žāvētavā, žāvēšanu ar gaisa recirkulāciju, žāvēšanu ar starpgaisa sildīšanu žāvētavā* u. c.

Sajā nodaļā aplūkota arī žāvēšana ar dūmgāzēm.

Žāvētavas ar papildu siltuma padevi. Šim žāvēšanas veidam raksturīgs tas, ka visu žāvēšanu nepieciešamo siltumu vai daļu no tā ievada žāvēšanas kamerā, t. i., $q_p > 0$. 16.11. attēlā redzama parastā žāvēšanas shēma (a) un dažādi varianti ar papildu siltuma padevi pašā žāvētavā (b, c un d).

Parādītos žāvēšanas variantus attēlojot $H-x$ diagrammā, tie ērti savā starpā salīdzināmi (16.12. att.). No $H-x$ diagrammas redzams, ka, žāvējot bez papildu siltuma padeves (16.12. att. a), ja sākumā gaisam ir punkta A parametri, tad, lai no žāvētavas gaisu izvadītu ar punkta C parametriem, tas kaloriferā jāsasilda līdz 100°C . Ja lieto papildu siltuma padevi pašā žāvēšanas kamerā (16.12. att. b un c), tad ar tādu pašu siltuma un gaisa patēriņu kā pirmajā gadījumā žāvēšanu var realizēt 80°C temperatūrā un pat nemainīgā 50°C temperatūrā. Lietojot papildu siltuma padevi pašā žāvēšanas kamerā (16.12. att. d), var pat pilnīgi atteikties no kalorifera un žāvēšanu realizēt pakāpeniski augošā temperatūrā (no 10 līdz 50°C).

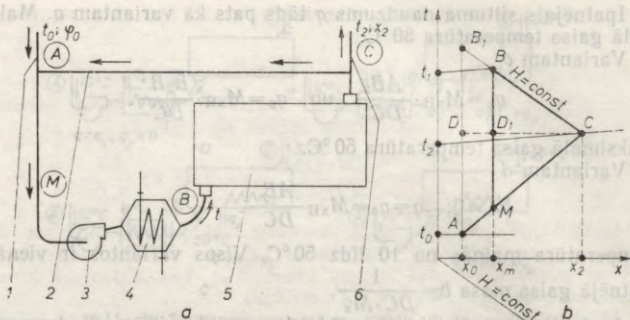
Variantam a

$$\text{īpatnējais siltuma daudzums } q = q_k = M_{xH} \cdot \frac{AB}{DC},$$

kur M_{xH} — $H-x$ diagrammas mērogs $M_{xH} = \frac{M_H}{M_x} = 2,09 \cdot 10^5$; $q_p = 0$.
Maksimālā gaisa temperatūra 100°C .

Variantam b

$$q_k = M_{xH} \cdot \frac{AB_1}{DC} \quad \text{un} \quad q_p = M_{xH} \cdot \frac{B_1B}{DC}.$$



16.13. att. Žāvētava ar gaisa recirkulāciju.

4) aprēķina vienu gaisa maisījuma parametru. Ja āra gaisa mitruma saturs x_0 , bet no žāvētavas izplūstošā gaisa mitruma saturs x_2 , tad gaisa maisījuma mitruma saturs pēc vienādojuma (16.15) ir

$$x_m = \frac{x_0 + nx_2}{1 + n};$$

5) uz abscisu ass atliek x_m un, no šī punkta velkot perpendikulu, līdz tas krusto taisni AC , iegūst punktu M . Gaisa maisījumu ar punkta M parametriem ievada kaloriferā. Kaloriferā gaisa mitruma saturs nemainās ($x_m = x_1$), tādēļ gaisa sildīšana $H-x$ diagrammā attēlojama ar vertikāli, kas vilkta no punkta M , līdz tā krusto izotermu t_1 , iegūstot punktu B . Taisne BC ir žāvētavas darba taisne.

No $H-x$ diagrammas iespējams noteikt īpatnējo āra gaisa masu (tādu pašu mitrā gaisa masu izvada atmosfērā):

$$b = \frac{1}{DC \cdot M_x} = \frac{1}{x_2 - x_0},$$

kur b — īpatnējā āra gaisa masa, kg sausa gaisa/kg iztvaicētā mitruma.

Kopējā (caur žāvētavu cirkulējošā) īpatnējā gaisa masa

$$b_k = \frac{1}{D_1 C \cdot M_x} = \frac{1}{x_2 - x_m} \quad \text{vai arī} \quad b_k = b(1+n).$$

Īpatnējo siltuma daudzumu nosaka šādi:

$$q = b(H_1 - H_0) = \frac{M_H}{M_x} \cdot \frac{AB_1}{DC}$$

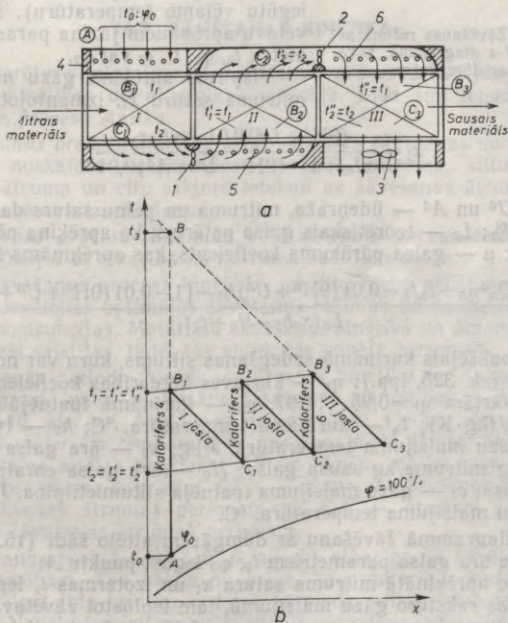
Žāvētavās ar gaisa recirkulāciju iespējams 1) pazemināt gaisa sākuma temperatūru žāvēšanas kamerā, 2) mainīt darba režīmu,

3) ievērojami palielināt žāvētavā cirkulējošā gaisa ātrumu, 4) žāvēt materiālus, kas jutīgi pret strauju žāvēšanu, 5) realizēt žāvēšanu ar nelielu temperatūru starpību.

Žāvētavas ar starpgaisa sildīšanu. Žāvētavās ieplūstošā gaisa temperatūru (salīdzinājumā ar vienkāršo žāvēšanu) var pazemināt arī tad, ja žāvētavu sadala joslās un starp joslām izveido gaisa sildīšanu, kā tas parādīts 16.14. attēlā *a*.

Āra gaisu pirmajai joslai pievada caur kaloriferu 4, kur tā parametri mainās no t_0, φ_0 uz t_1 . Ventilators 1 gaisu izvada cauri pirmajai joslai I un aizvada to uz otro joslā. Pirms gaisa ievadīšanas otrajā joslā kaloriferā 5 tas sasilst no temperatūras t_2 līdz $t'_1 = t_1$.

Otrajā joslā pēc iedarbības uz mitro materiālu gaisa temperatūra pazeminās līdz $t'_2 = t_2$. Gaisa cirkulāciju otrajā joslā nodrošina ventilators 2. Tālāk gaiss nokļūst kaloriferā 6, kur tas sasilst līdz temperatūrai $t''_1 = t_1$. Ventilators 3 izvada gaisu cauri trešajai joslai un izsviež to atmosfērā ar temperatūru $t''_2 = t_2$. *H-x* diagrammā (16.14. att. *b*) vienkāršības dēļ šis process attēlots teorētiskajam žāvēšanas režīmam.



16.14. att. Žāvētava ar starpgaisa sildīšanu.

3) no punkta B_1 velk taisni $H = \text{const}$. Tur, kur tā krustojas ar izotermu t_2 (vai φ_2), iegūst punktu C_0 , kas raksturo atgāzu maisījuma parametrus teorētiskajai žāvētavai;

4) aprēķina lielumus q_m , q_1 , q_2 un Δ ;

5) uz taisnes B_1C_0 izvēlas punktu e un no tā velk perpendikulu pret vertikāli $x_1 = \text{const}$ un izmēra iegūto nogriezni ef (milimetros);

6) aprēķina nogriezni $eE = \frac{ef \cdot \Delta}{M_{xH}}$.

Nogriezni eE no punkta e atliek uz leju (ja eE negatīvs). Savieno punktus B_1 un E un turpina taisni, līdz tā krusto izotermu t_2 , iegūstot punktu C . Punkts C raksturo gāzu maisījumu, tam izplūstot no žāvētavas.

Formulas lielumu b un q aprēķināšanai iegūst analogi kā žāvētavām ar gaisu. Izmēra nogriežņu AB un CD garumu un aprēķina lielumus b un q :

$$b = \frac{1}{CD \cdot M_x} = \frac{500}{CD} \quad \text{un} \quad q = \frac{M_H}{M_x} \cdot \frac{AB}{CD} = 2,09 \cdot 10^5 \frac{AB}{CD}.$$

16.3. ŽĀVĒŠANAS KINĒTIKA

Lai varētu pilnīgi izprast žāvēšanas procesus, tie jāaplūko no statikas, kinētikas un dinamikas viedokļa. Līdz šim iepazīta tikai žāvēšanas procesu statika.

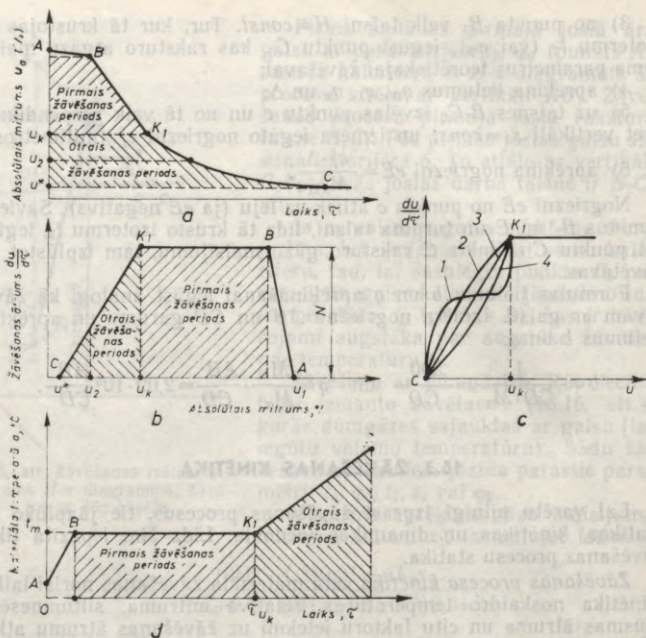
Žāvēšanas procesa kinētika pēta materiāla žāvēšanas norisi laikā. Kinētika noskaidro temperatūras, relatīvā mitruma, siltumnesēja, plūsmas ātruma un citu faktoru ietekmi uz žāvēšanas ātrumu atkarībā no žāvētavu izveidojuma.

Žāvēšanas procesa dinamika pēta mitruma pārvietošanos materiālā, aplūkojot to atkarībā no mitruma saistības veida.

Pēc žāvēšanas procesa kinētisko un dinamisko pētījumu rezultātiem var izvēlēties optimālos žāvēšanas režīmus un racionālākās žāvētavu konstrukcijas. Materiālu žāvēšanas kinētika un dinamika savā starpā cieši saistītas, tādēļ tās aplūkotas kopējā paragrāfā.

Žāvēšanas periodi. Žāvēšanas procesa kinētiku un dinamiku var labāk izprast, pētot materiālu žāvēšanas pamatlīknes: *žāvēšanas līkni* (16.16. att. *a*), *žāvēšanas ātruma līkni* (16.16. att. *b, c*) un *žāvējamā materiāla temperatūras izmaiņas līkni* (16.16. att. *d*). Visos minētajos attēlos nogriežņi AB uz līknēm atbilst materiāla sasilšanas periodam, nogriežņi BK_1 — pirmajam žāvēšanas (nemainīga žāvēšanas ātruma) periodam un K_1C — otrajam žāvēšanas (mainīga žāvēšanas ātruma) periodam.

Sasilšanas periods AB (16.16. att. *b*) atkarīgs no žāvējamā materiāla īpašībām. Tas sākas no brīža, kad materiālu ievieto žāvētavā, un ilgst līdz brīdim, kad tas sasniedz mitrā termometra temperatūru. Nelielu izmēru materiāliem šis periods ir īsāks, lielu izmēru materiāliem tas ievērojami garāks. Šajā periodā mitruma atdeve ir



16.16. att. Žāvēšanas procesa liknes.

niecīga. Žāvēšanas ātrums mainās no nulles perioda sākumā (punkts A) un sasniedz maksimumu perioda beigās (punkts B).

Aiz punkta B sākas *pirmais žāvēšanas jeb nemainīgā žāvēšanas ātruma periods* un aiz punkta K_1 — *otrais žāvēšanas jeb mainīgā žāvēšanas ātruma periods*. Punktā C materiālam iestājas līdzsvara mitrums, tādēļ posmu aiz punkta C sauc par *līdzsvara mitruma periodu*.

Žāvēšanas ātruma likne (16.16. att. c) otrā periodā ir mainīga (liknes — 1, 2, 3, 4) un atkarīga no žāvējamā materiāla. Likne 1 attiecas uz kapilāri porainiem materiāliem; liknes 2 un 3 — uz plāniem plakaniem materiāliem (papīru, audumu u. c.); likne 4 — uz keramiskiem materiāliem.

Žāvēšanas praksē materiāla sasilšanas periods salīdzinājumā ar pārējiem ir ļoti īss, bet līdzsvara mitruma periods izpaliek, jo žāvēšanu realizē, nesasniedzot līdzsvara mitrumu. Tādēļ tālāk sīkāk aplūkots pirmais un otrais žāvēšanas periods.

Pirmo žāvēšanas (nemainīgā žāvēšanas ātruma) periodu (16.16. att. a, b, d) attēlo nogrieznis BK_1 . Pirmajā žāvēšanas periodā no materiāla izdalās brīvais (mehāniski saistītais) mitrums. Sajā pe-

riodā tvaika spiedienu uz materiāla virsmas vienāds ar tvaika spiedienu virs šķidrums limeņa, kurš iztvaiko tādos pašos apstākļos. Mitrums no materiāla iekšējiem slāņiem pietiekamā daudzumā nokļūst līdz virsmai, lai to uzturētu mitru. Žāvēšanas ātrums šajā periodā ir nemainīgs, tādēļ to sauc par *nemainīgu žāvēšanas ātruma periodu*.

Ja bezgalīgi īsā laika sprīdī $d\tau$ materiālā mitrums samazinās par lielumu du , tad žāvēšanas ātrumu v izsaka šāda attiecība:

$$v = \frac{du}{d\tau}.$$

Žāvēšanas ātrumu aprēķina, žāvēšanas līkni (16.16. att. b) grafiski diferencējot.

Mitruma iztvaikošanas intensitāte. Mitruma iztvaikošanas intensitāti U_i izsaka ar to mitruma masu U , kas no žāvējamā materiāla virsmas laukuma vienības iztvaiko laika vienībā.

Mitruma iztvaikošanas intensitāte atkarīga no siltuma apmaiņas un masas apmaiņas starp žāvējamo materiālu un apkārtējo vidi. Mitruma iztvaikošanas intensitāti U_i nosaka, izmantojot masas pārejas pamatvienādību $U = k\Delta_{vid}S\tau$:

$$U_i = \frac{U}{S\tau} = k\Delta_{vid},$$

kur k — masas (mitrums) pārejas koeficients; Δ_{vid} — vidējais procesa virzošais spēks; S — iztvaikošanas virsma; τ — procesa ilgums.

Aizvadītā mitrums masa U tieši proporcionāla pievadītajam siltuma daudzumam Q , t. i.,

$$U = iQ, \quad (16.33)$$

kur i — proporcionalitātes koeficients.

Žāvējamam materiālam pievadītais siltuma daudzums Q izsakāms ar siltuma atdeves vienādību

$$Q = \alpha(t - t_m)S\tau. \quad (16.34)$$

Ievietojot vienādībā (16.33) Q izteiksmi, tas pārveidojams šādi:

$$U = i\alpha(t - t_m)S\tau \text{ jeb} \\ U = k_i(t - t_m)S\tau, \quad (16.35)$$

kur $k_i = i\alpha$ — masas (mitrums) pārejas koeficients, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s})$; t , t_m — vides un materiāla temperatūras, $^{\circ}\text{C}$; S — iztvaikošanas virsma, m^2 ; τ — pirmā perioda ilgums, s.

No vienādība (16.35) procesa mitrums iztvaikošanas intensitāti var aprēķināt šādi:

$$U_i = \frac{U}{S\tau} = k_i(t - t_m), \quad (16.36)$$

kur U_i — mitrums iztvaikošanas intensitāte, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; $t - t_m = \Delta t$ ir pirmā žāvēšanas perioda virzošais spēks.

Virzošo spēku vēl var izteikt ar spiedienu starpību $p_m - p_g = \Delta p$, kur p_m — piesātinātā ūdens tvaika spiediens, kas atbilst materiāla temperatūrai; p_g — ūdens tvaika parciālais spiediens siltumnesējā.

Žāvēšanas procesa virzošo spēku raksturo arī ar siltumnesēja mitruma saturu starpību: $\Delta x = x_{p_{ies}} - x$, kur $x_{p_{ies}}$ — siltumnesēja mitruma saturs piesātinātā stāvoklī, t. i., ja $\varphi = 100\%$, materiāla temperatūrā, kg mitruma/kg sausa gaisa; x — siltumnesēja mitruma saturs jebkurā brīdī žāvēšanas temperatūrā, kg mitruma/kg sausa gaisa.

Žāvēšanas procesa vidējo virzošo spēku (pirmajam periodam), ja siltumnesēja parametri ir mainīgi, aprēķina šādi:

$$\Delta t_{vid} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,3 \lg \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}},$$

$$\Delta p_{vid} = \frac{\Delta p_1 - \Delta p_2}{2,3 \lg \frac{\Delta p_1}{\Delta p_2}}, \quad \Delta x_{vid} = \frac{\Delta x_1 - \Delta x_2}{2,3 \lg \frac{\Delta x_1}{\Delta x_2}}, \quad (16.37)$$

kur $\Delta t_1 = t_1 - t_m$, $\Delta t_2 = t_2 - t_m$; t_1 , t_2 un t_m — iekļūstošā un izplūstošā gaisa un mitrā materiāla temperatūras, °C; $\Delta p_1 = p_{p_{ies}} - p_g$, $\Delta p_2 = p'_{p_{ies}} - p'_g$; $p_{p_{ies}}$ un $p'_{p_{ies}}$ — piesātinātā ūdens tvaika spiedieni temperatūrās t_1 un t_2 , Pa; p_g un p'_g — ūdens tvaika parciālie spiedieni siltumnesēja temperatūrās t_1 un t_2 , Pa; $\Delta x_1 = x_{p_{ies}} - x_1$, $\Delta x_2 = x_{p_{ies}} - x_2$; x_1 un x_2 — siltumnesēja mitruma saturs, tam iekļūstot žāvētavā un izplūstot no tās, kg mitruma/kg sausa gaisa.

Ievērojot minēto, vienādojumu (16.36) izsaka šādi:

$$U_1 = \frac{U}{S\tau} = k_p (p_{p_{ies}} - p_g),$$

kur k_p — masas pārejas koeficients, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s})$.

Ja siltumnesēja plūsma paralēla žāvējamā materiāla virsmai, tad $k_p = 5,59 \cdot 10^{-4} (\omega \rho)^{0,8}$, kur ω — siltumnesēja plūsmas ātrums, m/s; ρ — siltumnesēja blīvums, kg/m^3 .

Mitruma iztvaikošanas intensitāte pirmajam žāvēšanas periodam izsakāma šādi:

$$U_1 = 5,59 \cdot 10^{-4} (\omega \rho)^{0,8} (p_{p_{ies}} - p_g), \quad (16.38)$$

Pirmajā žāvēšanas periodā, kā redzams no vienādojuma (16.38), iztvaikošanas intensitāte atkarīga no siltumnesēja parametriem — temperatūras, relatīvā mitruma (šie lielumi nosaka pievadītā siltumnesēja blīvumu ρ) un plūsmas ātruma ω . Procesu limitē tvaika difūzija no materiāla virsmas apkārtējā vidē, t. i., ārējā difūzija. Tvaika difūzija atkarīga no tvaika spiedienu starpības uz materiāla virsmas un apkārtējā vidē, t. i., no $p_{p_{ies}} - p_g$.

Pirmais žāvēšanas periods analogs siltuma atdevei, tādēļ to sauc par *mitruma atdeves periodu*.

Zāvējamā materiāla temperatūra pirmajā zāvēšanas periodā (sk. 16.16. att. d) praktiski ir nemainīga un vienāda ar mitrā termometra temperatūru t_m . Pirmais zāvēšanas periods turpinās, līdz materiāls sasniedz pirmo kritisko mitrumu u_k (pirmais kritiskais punkts K_1).

Otrais zāvēšanas (mainīga zāvēšanas ātruma) periods (nogrieznis K_1C) sākas pēc pirmā kritiskā mitruma sasniegšanas. Šā perioda sākumā atsevišķi zāvējamā materiāla virsmas laukumi nav pārklāti ar mitrumu. Zāvēšanai turpinoties, visa virsma un iekšējie slāņi kļūst sausi. Otrajā periodā zāvēšanas ātrums nepārtraukti samazinās, un tas atkarīgs galvenokārt no iekšējās mitruma difūzijas, t. i., no tā, cik strauji mitrums materiālā no iekšējiem slāņiem pārvietojas uz virsmu.

Otrajā periodā iztvaikošanas intensitāti raksturo šāds vienādojums:

$$U_1 = \frac{U}{S\tau} = k_u(u - u^*),$$

kur $u - u^*$ — starpība starp materiāla absolūto mitrumu dotajā momentā un mitrumu līdzsvara stāvoklī, %, ja $u = u^*$, tad $U/S\tau = 0$; k_u — mitruma pārejas koeficients, kas raksturo mitruma pārvietošanas materiālā (iekšējo difūziju), kā arī no tā virsmas apkārtējā vidē (analogi siltumpārejas koeficientam).

Atkarībā no zāvējamā materiāla izveidojuma un uzbūves zāvēšanas ātruma samazināšanās otrajā periodā bieži vien ir vienmērīga, līdz sasniedz līdzsvara mitrumu, kas vienāds ar nulli (punkts C 16.16. att. b).

Atšķirībā no pirmā perioda, kur zāvēšanu ievērojami ietekmē tvaika spiediens uz materiāla virsmas un apkārtējā vidē ($p_{pies} - p_g$), otrajā periodā zāvēšana galvenokārt atkarīga no mitruma gradienta materiālā ($u - u^*$). Mitruma gradienta ietekmē mitrums pārvietojas materiālā no vietas ar augstāku mitruma gradientu, t. i., no zāvējamā materiāla iekšējiem slāņiem uz perifēriju. Mitruma pārvietošanās gradienta ietekme analoga siltumvadišanai, tādēļ šādu mitruma migrāciju sauc par *mitruma vadišanu*. Mitruma vadišana ietver šķidruma un tvaika difūziju un kapilāro mitruma pārvietošanos.

Bez mitruma gradienta mitruma vadišanā liela nozīme ir termodifūzijas parādībai, kuru rada temperatūru starpība materiālā, t. i., temperatūras gradients. Tas jūtami ietekmē mitruma pārvietošanos materiālā. Temperatūras gradienta ietekmē mitrums pārvietojas no materiāla virsmas uz centru, t. i., virzienā, kas pretējs mitruma pārvietošanās virzienam mitruma gradienta ietekmē.

Otrajā periodā zāvēšanas ātrumu limitē materiāla temperatūra. Iekšējā difūzijā materiālā pieaug, samazinoties mitruma viskozitātei un paaugstinoties materiāla temperatūrai. Tādēļ otrajā periodā zāvēšanas ātrumu būtiski ietekmē nevis siltumnesēja relatīvais mitrums un ātrums, kā tas ir pirmajā zāvēšanas periodā, bet gan materiāla temperatūra. Otrajā zāvēšanas periodā materiāla temperatūra paaugstinās virs mitrā termometra temperatūras, kāda tā ir perioda

sākumā (no punkta K_1 16.16. att. *d*), un tuvojas siltumnesēja temperatūrai.

Žāvēšanas periodu ilgums. Dažādiem materiāliem atsevišķie žāvēšanas periodi pēc ilguma ir dažādi.

Pirmā žāvēšanas perioda taisnes BK_1 (sk. 16.16. att. *b*) vienādojums ir

$$-du/d\tau = N. \quad (16.39)$$

Integrējot šo vienādojumu pirmā žāvēšanas perioda mitruma maiņas robežās no u_1 līdz u_k , iegūst

$$-\int_{u_1}^{u_k} du = N \int_{\tau_1}^{\tau_1} d\tau \quad \text{jeb}$$

$$\int_{u_k}^{u_1} du = N \int_{\tau_1}^{\tau_1} d\tau \quad \text{vai} \quad u_1 - u_k = N\tau_1.$$

Pirmajam žāvēšanas periodam žāvēšanas ilgums

$$\tau_1 = \frac{1}{N}(u_1 - u_k), \quad (16.40)$$

kur τ_1 izteikts minūtēs.

Žāvēšanas ilgumu otrajam žāvēšanas periodam iegūst no trijstūra $u^*K_1u_k$ (sk. 16.16. att. *b*). Hipotenūzas u^*K_1 vienādojums ir $-du/d\tau = Au - B$, tādēļ

$$A = \operatorname{tg} \alpha = \frac{N}{u_k - u^*} \quad \text{vai} \quad A(u_k - u^*) = N. \quad (16.41)$$

No vienādojumiem (16.39) un (16.41) iegūst, ka

$$-\frac{du}{d\tau} = A(u_k - u^*).$$

Integrējot pēdējo vienādojumu otrā žāvēšanas perioda mitruma maiņas robežās no $u_k - u^*$ līdz $u_2 - u^*$, var rakstīt

$$\int_{u_2 - u^*}^{u_k - u^*} \frac{du}{u_k - u^*} = A \int_{\tau_1}^{\tau_2} d\tau \quad \text{vai} \quad A\tau_2 = \ln \frac{u_k - u^*}{u_2 - u^*}.$$

Ievietojot A vietā izteiksmi no vienādojuma (16.41), iegūst formulu otrā žāvēšanas perioda ilguma aprēķināšanai

$$\tau_2 = \frac{1}{N} \left[(u_k - u^*) 2,3 \lg \frac{u_k - u^*}{u_2 - u^*} \right], \quad (16.42)$$

kur τ_2 — otrā žāvēšanas perioda ilgums, min.

Kopējo žāvēšanas ilgumu τ , kāds nepieciešams materiāla mitruma izmaiņai no u_1 līdz u_2 , iegūst kā summu, t. i.,

$$\tau = \frac{1}{N} \left[u_1 - u_k + (u_k - u^*) 2,3 \lg \frac{u_k - u^*}{u_2 - u^*} \right], \quad (16.43)$$

kur u_1, u_2, u^* un u_k — žāvējamā materiāla sākuma, beigu, līdzsvara un kritiskais mitrums; N — žāvēšanas ātruma koeficients. Koeficientu N nosaka eksperimentāli vai aprēķinu rezultātā, izejot no masas atdeves vienādājuma.

Ievērojot žāvēšanas nevienmērīgumu un citus faktoros, žāvēšanas ilgums, kas aprēķināts pēc vienādājuma (16.43), jāpalielina 1,5... ..2 reizes.

Jāatzīmē, ka ne visi žāvēšanas kinētikas un dinamikas jautājumi pietiekami izpētīti. Bieži vēl tagad žāvēšanas ilgumu, žāvētavu pamatizmērus un žāvēšanas režīmus izvēlas, vadoties no eksperimentāliem rezultātiem, kas iegūti rūpnieciskos vai pusrūpnieciskos apstākļos.

16.4. ŽĀVĒTAVU VEIDI

Ķīmiskajā rūpniecībā sastopamas ļoti dažādas žāvētavas. Tās izvēlas atkarībā no žāvējamā materiāla veida, īpašībām un žāvēšanas režīma.

Pēc darbības veida žāvētavas iedala *periodiskas* un *nepārtrauktas darbības žāvētavās*.

Periodiskas darbības žāvētavām raksturīgs pārtraukts žāvēšanas process, kas izveidojas, žāvējamo materiālu ievietojot žāvētavā un izņemot no tās. Šādas žāvētavas izmanto nelielu materiāla daudzumu žāvēšanai, kā arī tad, ja bieži jāmaina žāvēšanas režīms. Periodiskas darbības žāvētavu galvenie trūkumi: ievērojams žāvēšanas ilgums, liels enerģijas patēriņš, strādniekiem smagi un nehygiēniski darba apstākļi.

Nepārtrauktas darbības žāvētavās procesu realizē nepārtraukti. Šādām žāvētavām ir liels ražīgums, žāvēšana ir vienmērīgāka, procesu viegli automatizēt un mehanizēt, mazāks enerģijas patēriņš, kā arī strādniekiem vieglāki darba apstākļi.

Atkarībā no siltumnesēja plūsmas virziena un žāvējamā materiāla pārvietošanās virziena izšķir *līdzplūsmas*, *pretplūsmas* un *pendikulāras plūsmas žāvētavas*.

Līdzplūsmas žāvētavās siltumnesēja plūsmas virziens sakrīt ar žāvējamā materiāla pārvietošanās virzienu. Žāvēšanas sākumā karstais siltumnesējs, kuram ir niecīgs mitruma saturs, saskaras ar mitro materiālu, bet žāvēšanas beigās mitrais gaiss, kuram ir augsts mitruma saturs, apskalo izžāvēto materiālu. Līdzplūsmas žāvētavas izmanto, ja pieļaujama mitrā materiāla strauja žāvēšana, ja sausais materiāls jutīgs pret augstu temperatūru un ja izžāvētais materiāls nav higroskopisks. Līdzplūsmas žāvētavās žāvēšanas procesa virzošais spēks un žāvēšanas ātrums samazinās žāvēšanas aģenta plūsmas virzienā.

Pretplūsmas žāvētavās sausais materiāls saskaras ar siltumnesēju, kuram ir augsta temperatūra un mazs mitruma saturs. Mitro materiālu šādās žāvētavās ievada zemā temperatūrā (salīdzinājumā ar tālāko temperatūru žāvētavā) un ar augstu siltumnesēja

mitruma saturu. Žāvēšana šajās žāvētavās notiek vienmērīgāk nekā līdzplūsmas žāvētavās.

Lai novērstu siltumnesēja piesātināšanos līdzplūsmas žāvētavās un mitruma kondensāciju uz aukstā mitrā materiāla pretplūsmas žāvētavās, vienā žāvētavā *apvieno līdzplūsmu ar pretplūsmu*. To panāk, aizvadot mitro siltumnesēju no žāvētavas vidus un ievadot svaigo siltumnesēju no abiem žāvētavas galiem.

Perpendikulāras plūsmas žāvētavās siltumnesēja plūsmas virziens perpendikulārs žāvējamā materiāla pārvietošanās virzienam. Šīs ir intensīvas darbības žāvētavas. Perpendikulāru plūsmu žāvētavās lieto, žāvējot termiski izturīgus materiālus, ja žāvēšana jāizdara ātri un jāiegūst izžāvētais produkts ar zemu mitruma saturu, kā arī ja konstruktīvi nav iespējams izveidot citu plūsmu.

Žāvētavas var iedalīt pēc spiediena žāvēšanas kamerā: *atmosfēras* (parastā spiediena) *žāvētavas* un *vakuumžāvētavas*; pēc siltuma pievadīšanas veida: *konvektīvās, kontakta, radiācijas, tvaika žāvētavas* un pēc konstruktīvā izveidojuma: *tuneļžāvētavas, kameras, lentes, cilpveida, cilindriskās žāvētavas* u. c.

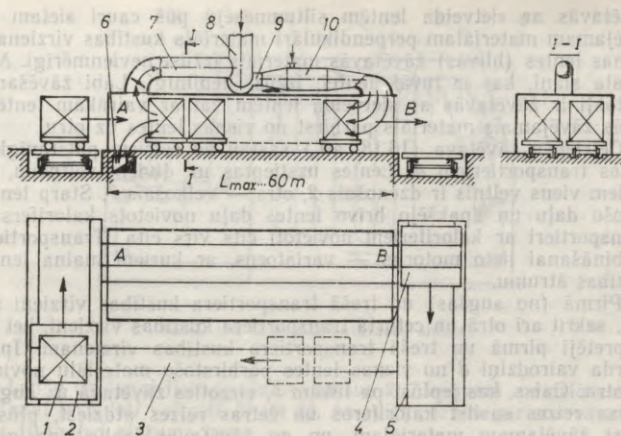
16.4.1. Konvektīvās žāvētavas

No nepārtrauktas darbības žāvētavām šajā paragrāfā aplūkotas tuneļžāvētavas, lentes, cilpveida, cilindriskās, pneimatiskās žāvētavas, žāvētavas ar žāvējamā materiāla izsmidzināšanu un suspendēta slāņa žāvētavas. Visas minētās žāvētavas darbojas spiedienā, kas tuvs atmosfēras spiedienam.

Tuneļžāvētavas. Tuneļžāvētavas iekārtas shēma redzama 16.17. attēlā. Tuneļveida žāvētavas pamatā ir viens vai vairāki tuneļi, kuru garums sasniedz 60 m (parasti 30...40 m). Garākus tuneļus nelieto tāpēc, ka tādos novērojama gaisa atslāņošanās, t. i., siltākais gaiss plūst gar tuneļa griestiem, bet vēsākais gaiss — gar tuneļa grīdu, bez tam gariem tuneļiem ir liela pretestība. Žāvētavas ražīguma palielināšanai izveido divus vai vairākus paralēlus tuneļus. Var arī izveidot vienu platāku tuneli ar diviem sliežu ceļiem (16.17. att. 1-1).

Pa tuneļa galu *A* ievada vagonetes *I* ar mitro materiālu. Vagonēšu konstrukcija atkarīga no žāvējamā materiāla veida (gabalmateriāls, plāksnes u. c.). Vagonetes ar mitro materiālu žāvētavas tunelī ievada pēc zināmiem laika intervāliem. Pirms ievada tunelī mitro materiālu, pa tuneļa galu *B* izvada vagoneti ar izžāvēto materiālu. Vagonēšu sastāva pārbīdīšanai tunelī lieto dažādus mehānismus: elektrokārus, dažāda veida bīdītājus u. c. Tuneļa abi gali noslēgti ar hermētiskām durvīm, kuras atver, vagonetes iebīdot žāvētavā un izbīdot no tās. Bez atbalstītām vagonetēm lieto arī pakarinātās vagonetes.

Labākai siltumnesēja sadalīšanai pa žāvētavas šķēlumu tuneļa abos galos atstāj brīvu telpu (vienas vagonetes garumā katrā galā). Tuneļžāvētavās nedrīkst būt lielas atstarpes starp vagonetēm un



16.17. att. Tuneļžāvētavas iekārtas shēma.

tunela sienu griestiem, jo citādi iespējama gaisa plūsmas novirzīšanās gar sienu, griestiem ar žāvētavām. Gaisa ātrums tunelī ir 2...6 m/s. Ja gaisa ātrums mazāks par 2 m/s, tad iespējama gaisa atslāņošanās.

Vagoneti ar izžāvēto materiālu uzbīda uz platformas 4, kuru kopā ar vagoneti pa sliežu ceļu 5 pārvieto uz priekšu, līdz sliedes uz platformas sakrīt ar žāvētavai blakus esošo sliežu ceļu 3. Uz šīm sliedēm uzbīdīto vagoneti atbrīvo no izžāvētā materiāla un piepilda ar mitro materiālu. Vagoneti ar mitro materiālu pa sliedēm 3 aizved uz žāvētavas otru galu A un novieto uz pārbīdāmās platformas 2, no kuras pēc zināma laika vagoneti ar mitro materiālu ievada tuneli. Pārbīdāmo platformu vietā ir arī pagriežami diski.

Žāvēšanai nepieciešamo gaisu pievada ventilators 9, kas pa gaisvadu 8 iesūc āra gaisu, bet pa gaisvadu 7 — daļu atgaisa (shēmā parādīta žāvēšanas iekārta ar gaisa recirkulāciju). Gaisa maisījumu silda kaloriferā 10 un tunela galā B ievada žāvētavā. Atlikušo mitrā gaisa daļu nosūc ventilators (attēlā nav parādīts) pa kanālu 6.

Tuneļžāvētavas darbojas kā pretplūsmas žāvētavas vai kombinētās žāvētavas ar mitrā siltumnesēja nosūkšanu tunela vidū, jo līdzplūsmas žāvētavās novērojama gaisa atslāņošanās. Efektīvākai tuneļžāvētavas darbībai tuneli sadala joslās ar gaisa sildīšanu starp joslām, izmantojot cirkulācijas ventilatorus.

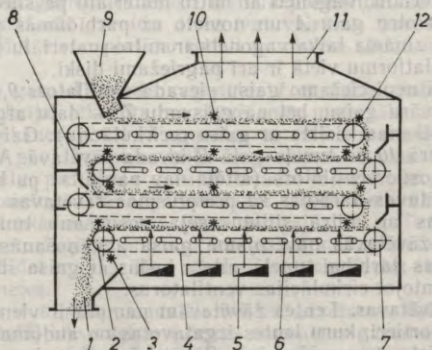
Lentes žāvētavas. Lentes žāvētavām pamatā ir viens vai vairāki lentes transportieri, kuru lentes izgatavotas no auduma (blīvās) vai no metāla sieta (caurpūšamās). Žāvētavās ar auduma lentēm siltumnesējs virzās gar žāvējamo materiālu pēc pretplūsmas principa.

Žāvētavās ar sietveida lentēm siltumnesēju pūš cauri sietam un žāvējamam materiālam perpendikulāri materiāla kustības virzienam. Vienas lentes (blīvās) žāvētavās materiāls izžūst nevienmērīgi. Materiāla slāņi, kas ir tuvāk lentei, izžūst nepilnīgi. Labi žāvēšanas apstākļi ir žāvētavās ar sietveida lentēm vai ar vairākām lentēm, kurās žāvējamais materiāls pārbirst no vienas lentes uz otru.

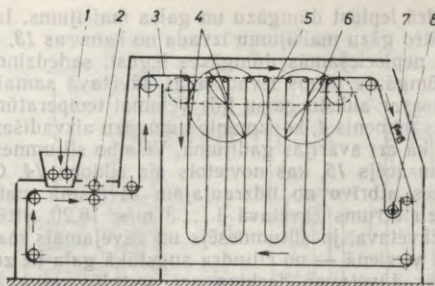
Cetrleņģu žāvētava (16.18. att.) sastāv no četriem patstāvīgiem lentes transportieriem 4. Lentes uzstieptas uz diviem veltniem, no kuriem viens veltnis ir dzenošais 2, otrs — velkošais 7. Starp lentes nesošo daļu un apakšējo brīvo lentes daļu novietots kalorifers 6. Transportieri ar kaloriferiem novietoti cits virs cita. Transportieru darbināšanai lieto motorus — variatorus, ar kuriem maina lentes kustības ātrumu.

Pirmā (no augšas) un trešā transportiera kustības virzieni sakrīt, sakrīt arī otrā un ceturtā transportiera kustības virzieni, bet tie ir pretēji pirmā un trešā transportiera kustības virzienam. Ipaši skārda vairodziņi 8 no vienas lentes pārbirstošo materiālu novirza uz otru. Gaiss, kas ieplūst pa lūkām 5, virzoties žāvētavā uz augšu, četras reizes sasilst kaloriferos un četras reizes atdziest, plūstot cauri žāvējamam materiālam, un no žāvētavas izplūst pa gaisvadu 11.

Mitro materiālu caur piltuvi 9 uzber uz pirmās lentes, kur nožūst aptuveni viena trešā daļa no iztvaicējamā mitruma. No pirmās lentes gala apžāvētais materiāls nobirst uz otrās lentes, kuras kustība lēnāka, un uz šīs lentes materiāls zaudē atkal vienu trešo daļu mitruma. Tālāk materiāls pārbirst uz trešo lenti, kuras kustība vēl lēnāka. Uz trešās lentes žāvēšana praktiski izbeidzas (ja ir normāls žāvētavas darbības režīms). Gandrīz sauss materiāls nokļūst uz ceturtās lentes, kur aizvada atlikušo mitrumu. No ceturtās lentes sausais produkts pa tekni 1 birst krātuvē.



16.18. att. Lentes žāvētavas shēma.



16.19. att. Cilpveida žāvētavas shēma.

Lenšu tīrīšanai lieto īpašus veltnišus 3. Žāvējamā materiāla irdināšanai izveidoti veltniši 10 un 12. Atsevišķu lenšu garums sasniedz līdz 10 m, bet platums 2 m.

Gaisa ātrums žāvētavā, caurplūstot materiālam, ir 0,25... 0,5 m/s, plūstot gar materiāla slāni, — līdz 3 m/s. Lentes ātrums ievērojami mazāks — 0,005... 0,008 m/s.

Cilpveida žāvētavas. Pastas veida materiālu (pēc filtrēšanas) žāvē vertikālā lentes žāvētavā (16.19. att.). Lente 3 žāvētavas darba daļā veido cilpas 4. Transportieris 5 cilpas pārvieto uz otru žāvētavas galu. Izžāvēto materiālu ar veserišiem 7 no lentes izdauza, un tas sabirst gliemežveida transportierī 8, kas izžāvēto materiālu izvada no žāvētavas. Cilpveida žāvētavās lente ir sietveida ar 5... 25 mm dziļām acīm. Žāvējamais materiāls caur padevēja veltnišiem 1 nonāk uz lentes. Veltņītis 2 pastu iespiež sieta acīs un izlīdzina.

Žāvētavā ir vairākas joslas, un tajā realizē siltumnesēja starpsildīšanu. Nepieciešamo siltumnesēja cirkulāciju panāk ar ventilatoriem 6. Šāda veida žāvētavās mitruma atdeve notiek intensīvāk, jo siltumnesējs materiāla plāno slāni apskalo no abām pusēm, līdz ar to palielinās iztvaikošanas virsma. Žāvēšanas laikā materiālam sarūkot, tas viegli atdalās no sieta.

Cilindriskās žāvētavas. Dažādus materiālus (ogles, fosforītu, mālus, kūdru, pīrītu u. c.), kuru gabalu lielums 50... 100 mm, žāvē cilindriskās žāvētavās. Šādas žāvētavas (16.20. att.) pamatā ir rotējošs cilindrs 5, kas novietots nedaudz slīpi (5... 6°) pret horizontālo virzienu. Cilindrs balstās uz diviem pāriem rullišu 6, pa kuriem veļas tērauda bandžas 7. Lai cilindrs nenoslīdētu, divi vertikāli rullīši 12 no abām pusēm piespiežas bandžai un fiksē cilindra stāvokli. Cilindra apgriezienu skaits ir 0,1... 0,8 s⁻¹. Cilindra rotāciju nodrošina zobrats 8, kas ir sazobē ar zobratu 9, kuru caur reduktoru 10 griež elektromotors 11. Cilindra gali atrodas kamerās 3 un 13.

Žāvējamo materiālu ar padevēju 16 ievada teknē 17, pa kuru tas iebirst cilindra augstākajā galā. Caur gāzu maisījuma kameru 2

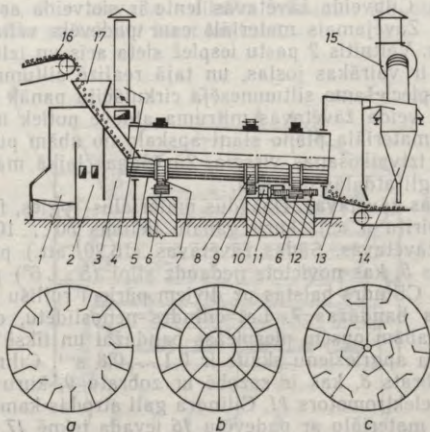
rotējošā cilindrā iepļūst dūmgāzu un gaisa maisījums. Izžāvēto produkciju un mitro gāzu maisījumu izvada no kameras 13.

Žāvēšanai nepieciešamās dūmgāzes iegūst, sadedzinot kurināmo kurtuvē 1. Dūmgāzes pirms ievadīšanas žāvētavā samaisīšanas kamerā 2 samaisa ar auksto gaisu līdz vēlamai temperatūrai. Pie kurtuves izveidots dūmenis 4, ko izmanto dūmgāzu aizvadišanai, iedarbinot žāvētavu, kā arī avārijas gadījumā. Vēlamo siltumnesēja plūsmu nodrošina dūmsūcējs 15, kas novietots aiz ciklona 14. Ciklonā aizvadāmās gāzes atbrīvo no līdzrautajām žāvējamā materiāla daļiņām. Dūmgāzu ātrums žāvētavā 1...3 m/s. 16.20. attēlā redzama līdzplūsmas žāvētava, jo siltumnesējs un žāvējamais materiāls pārvietojas vienā virzienā — no cilindra augstākā gala uz zemāko.

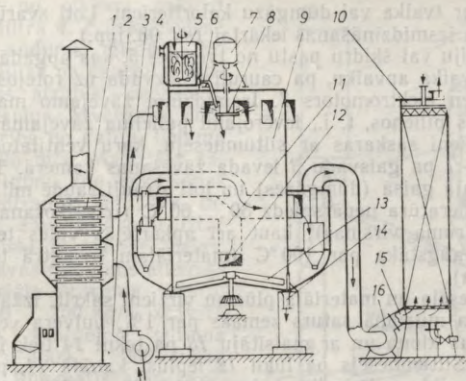
Cilindriskās žāvētavas darbina arī pretplūsmas režīmā un kā netiešas vai jauktas darbības žāvētavas. *Pretplūsmas cilindriskās žāvētavās* materiālu ievada žāvētavas augstākajā galā, bet karstās gāzes — zemākajā galā. *Netiešas darbības cilindriskās žāvētavās* karstās dūmgāzes apskalo cilindru, nokļūst caurulē žāvētavas centrā un caur to tiek aizvadītas no žāvētavas. Žāvējamais materiāls nenonāk kontaktā ar dūmgāzēm. *Jauktas darbības cilindriskās žāvētavās* dūmgāzes (kamēr tās karstas) netieši apsilda žāvējamo materiālu (caur rotējošā cilindra sienu). Pēc tam tās tieši saskaras ar materiālu.

Žāvēšanas procesu intensificē, uzlabojot saskari starp gāzu maisījumu un žāvējamo materiālu, tādēļ rotējošā cilindra iekšpusē izvieto dažādas konstrukcijas.

Lāpstiņas (16.20. att. a) lieto, žāvējot rupjgraudainu materiālu, kuram piemīt tieksme salīpt. Sūnveida konstrukcija (16.20. att. b)



16.20. att. Cilindriskās žāvētavas un cilindra iekšējo izveidojumu shēmas.



16.21. att. Zāvētavas iekārta žāvēšanai ar materiāla izsmidzināšanu.

piemērotā materiāliem, kas jutīgi pret bārstišanu. Sektoriālās konstrukcijas (16.20. att. c) lieto vāji birstoša, rupjgraudaina, blīva materiāla žāvēšanai. Iespējams arī citāds cilindra iekšējais veidojums.

Rotējošā cilindra zemākajā galā novietots metāla gredzens vai sektors, ar kuru regulē materiāla daudzumu jeb *pildījuma pakāpi*. *Pildījuma pakāpe rāda, cik procentu cilindra tilpuma aizpilda žāvējamais materiāls*. Cilindriskām žāvētavām pildījuma pakāpe ir 15... 25%.

Sā veida žāvētavu raksturošanai un aprēķiniem izmanto ipatņejo tilpuma slodzi. *Ipatnējā tilpuma slodze $\frac{U}{V\tau}$ rāda, cik kilogramu mērums no attiecīgā materiāla iespējams izvaicēt 1 stundā, rēķinot uz 1 m³ cilindra tilpuma*. Ipatņejo tilpuma slodzi nosaka eksperimentāli, un dažiem materiāliem tā sasniedz vairāk nekā 100 kg/(m³·h).

Cilindriskās žāvētavas izgatavo ar cilindra diametru 0,5, 1,0, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8, 2,0, 2,2, 2,4 un 2,8 m. Cilindra garuma attiecība pret cilindra diametru $\frac{L}{D}=3,5 \dots 7$.

Zāvētavas ar žāvējamā materiāla izsmidzināšanu. Žāvēšanas iekārta žāvēšanai ar materiāla izsmidzināšanu redzama 16.21. attēlā. Sā veida žāvēšanas iekārta sastāv no cilindriskas (retāk taisnstūrainas) žāvēšanas kameras 9, kuras sienas veidotas no tērauda vai betona. Kameras dibens ir konisks vai plakans, un virs tā atrodas maisītājs 13 izžāvētā materiāla pārbīdīšanai uz tekni 14. Dažreiz izžāvēto materiālu nosūc ar vakuumu. Siltumnesējs ir gaiss vai dūmgāzes ar temperatūru, kas augstāka pat par 600 °C. Siltumne-

sēju silda ar tvaika vai dūmgāzu kalorifieriem. Ļoti svarīga nozīme ir materiāla izsmidzināšanas iekārtai (sk. 98. lpp.).

Suspensiju vai šķidrū pastu no tvertnes 5, kas apgādāta ar maisītāju un tvaika apvalku, pa cauruli 6 aizvada uz rotējošo disku 8, kuru piedzen elektromotors 7. Izsmidzinot žāvējamo materiālu, to sadala sīkos pilienos, t. i., ievērojami palielina žāvējamā materiāla virsmu. Pilieni saskaras ar siltumnesēju, kuru ventilators 2 cauri kaloriferam 1 pa gaisvadu 3 ievada žāvēšanas kamerā. Tur tie nokļūst karstajā gaisā (dūmgāzēs) un ļoti strauji zaudē mitrumu. Materiāla temperatūra nepārsniedz 50...60 °C (iztvaikošana notiek no brīvas šķidrums virsmas), kaut arī apkārtējās vides temperatūra ievērojami augstāka par 100 °C (materiālam ir mitrā termometra temperatūra).

Siltumnesēja un materiāla plūsmu virzieni sakrīt. Izzāvētais materiāls, kura mitruma saturs zemāks par 1%, pulvera veidā krājas uz žāvētavas klona un ar maisītāju 13 pa tekni 14 tiek izvadīts no žāvētavas. Siltumnesējs pa lūku 12 ieplūst kanālā 11, pa kuru to aizvada uz ciklonu bateriju 4, kur paliek 80...85% līdzrauto daļiņu. No pēdējām cieto daļiņu paliekām mitro gāzi attīra skruberā 10, kur gāzi pa gāzsvadu 15 pievada ventilators 16.

Žāvētavas ar žāvējamā materiāla izsmidzināšanu, līdzīgi kā cilindriskās žāvētavas, raksturo īpatnējā tilpuma slodze, kas atkarīga no siltumnesēja temperatūras.

Žāvētavas ar žāvējamā materiāla izsmidzināšanu lieto pārtikas rūpniecībā, piemēram, želatīna, piena, olu, asiņu, līmes un citu produktu žāvēšanā; farmaceutiskajā, krāsvielu, organiskās sintēzes rūpniecībā un citur. So žāvētavu priekšrocība ir vēl arī tā, ka iegūst pulverveidīgu galaproduktu.

So žāvētavu trūkumi: lieli izmēri, liels enerģijas un siltuma patēriņš un sarežģīta atputekļošanas sistēma.

Pneimatiskās žāvētavas. Pneimatiskās žāvētavas lieto birstošu materiālu (salicilskābes, kūdras, mālu, ogļu, krāsvielu u. c.) žāvēšanai. Žāvējamam materiālam jābūt ar nelielu mitruma saturu vai tādām, kas viegli atdod mitrumu, jo tas žāvētavā atrodas tikai dažas sekundes. Šajās žāvētavās siltumnesējs materiālu vienlaikus žāvē un transportē.

16.22. attēlā parādīta ķīmiskajā rūpniecībā plaši lietojamās pneimatiskās žāvētavas shēma. Mitro materiālu vienmērīgi pievada pavedējā 7, no kura tas nokļūst uz dobumaina veltnīša 8, kas žāvējamo materiālu ievada žāvētavas apakšējā daļā. Patī žāvētava sastāv no vertikālas caurules 9, kuras augstums ir pat lielāks par 20 m, bet diametrs — aptuveni 250 mm. No ārpuses caurule izolēta.

Ventilators 11 iesūc āra gaisu un ievada to kaloriferā 10. Karstais gaiss ar lielu ātrumu ieplūst žāvētavas caurulē un rauj līdzī mitro materiālu. Izzāvētais materiāls nokļūst amortizatorā 1, kas ir no augšas noslēgta caurule. Amortizatora apakšā pievienota otra caurule 3, pa kuru izžāvētais materiāls kopā ar mitro gaisu nokļūst ciklonā 5. No ciklona izžāvēto materiālu izvada dozators 6.

Gaiss no ciklona nokļūst auduma filtrā 4. Filtra iekšienē ievietoti auduma cilindri. No auduma filtra pa cauruli 2 mitrais gaiss aizplūst atmosfērā. Gaisa ātrums žāvēšanas caurulē atkarībā no daļiņu lieluma ir 10...25 m/s. Materiāla žāvēšanas ilgums (no ievadīšanas līdz izvadišanai) 5...7 s, tādēļ šādu žāvēšanu labi iztur pat termiski nestabilas vielas.

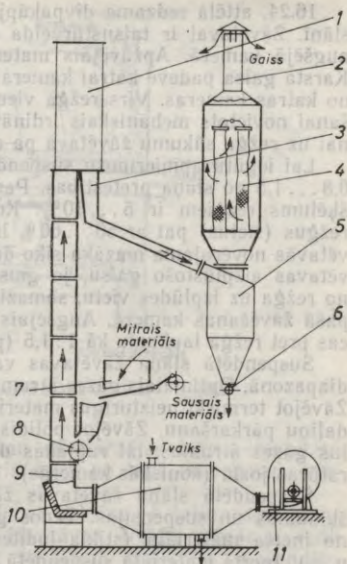
Žāvētavas ražīgums atkarīgs no materiāla mitruma satura; iegūst 150...250 kg/h izžāvētā materiāla. Ipatnējais siltuma daudzums 4600...5000 kJ/kg mitruma. Pneimatiskajās žāvētavās iespējama tikai līdzplūsma.

Lieto arī sarežģītākas žāvētavas, kurās rupjākās daļiņas pēc pirmās žāvēšanas smalcina. Sasmalcinātais materiāls atgriežas atpakaļ atkārtotai žāvēšanai. Dažreiz smalcināšanu veic ventilators, kas pievada gaisu žāvētavā. Gaisa vietā par siltumnesēju lieto arī dūmgāzes.

Žāvēšana suspendētā (pseudosašķidrinātā) slānī. Dažādu materiālu žāvēšanai lieto suspendētā slāņa žāvētavas. Šajās žāvētavās žāvē beramus, kristāliskus un pastas veida materiālus, kā arī suspensijas vai šķīdumus. Atkarībā no materiāla dispersitātes un gaisa (gāzes) temperatūras šajās žāvētavās no 1 m² režģa (sietā) laukuma var aizvadīt līdz 1000 un vairāk kilogramu mitruma stundā.

Suspendētā slāņa žāvētavas ir ar apaļu un taisnstūrains šķersgriezumu. Tās iedala *vienpakāpes* un *vairāpkāpju žāvētavās*. Vienpakāpes žāvētavās parasti žāvē termiski izturīgu materiālu. Divpakāpju vai vairāpkāpju žāvētavas lieto termiski neizturīgu materiālu, dabas produktu (ar augstu mitruma saturu) žāvēšanai, kā arī tad, ja žāvēšanu apvieno ar dehidratāciju vai apdedzināšanu. Žāvētavas pakāpes novieto vienu virs otras vai arī vienu blakus otrai.

16.23. attēlā parādīta vienkameras koniskās suspendētā slāņa žāvētavas shēma. Žāvējamo materiālu ievada tvertnē 2, no kuras gliemežveida transportieris 3 to aizvada uz žāvēšanas kameru 4. Caur režģi 5 pievada kaloriferā 1 sasildīto gaisu. Mitro gaisu no žāvētavas augšas pa izvadu 6 aizvada uz ciklonu 7 un tālāk caur auduma filtru 8 izvada atmosfērā. Sausais materiāls no žāvētavas birst laukā pa cauruli 10, un to izvada arī no ciklona tvertnes 9 un no filtra 8.



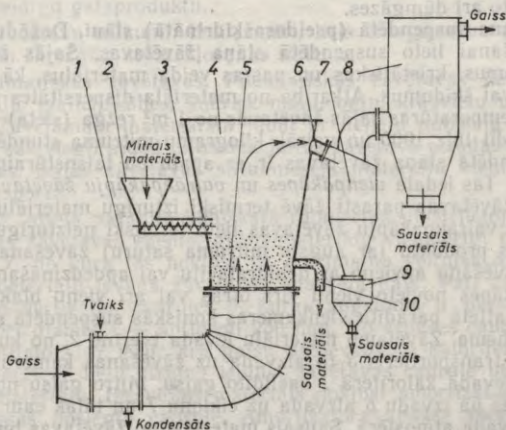
16.22. att. Pneimatiskās žāvētavas shēma.

16.24. attēlā redzama divpakāpju žāvētava žāvēšanai suspendētā slānī. Žāvētavai ir taisnstūrveida šķelums. Mitro materiālu ievada augšējā kamerā. Apžāvētais materiāls pārbirst uz apakšējo režģi. Karstā gaisa padeve katrai kamerai ir sava. Arī mitro gaisu aizvada no katras kameras. Virs režģa vienmērīgāka suspendētā slāņa iegūšanai novietots mehāniskais irdinātājs 1. Mitrā materiāla novadišanai uz režģa sākumu žāvētavā pa cauruli 2 pievada saspiebtu gaisu.

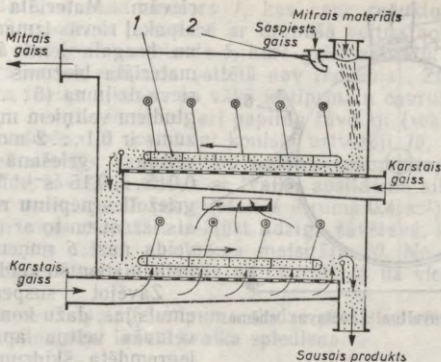
Lai iegūtu apmierinošu suspendēto slāni, režģa pretestībai jābūt 0,8...1,5 no slāņa pretestības. Parasti šā veida žāvētavām aktīvais šķelums režģiem ir 5...10%. Koniskām žāvētavām dažreiz lieto režģus (sietus) pat ar 50...60% lielu aktīvo šķelumu. Koniskās žāvētavās novērojama mazāka siko daļiņu līdzraušana ar mitro, no žāvētavas aizplūstošo gaisu, jo gaisa kustības ātrums, pārvietojoties no režģa uz izplūdes vietu, samazinās. Tas veicina gaisa separāciju pašā žāvēšanas kamerā. Augšējais kameras šķeluma laukums attiecās pret režģa laukumu kā 1:1,5 (pat līdz 1:3).

Suspendētā slāņa žāvētavas var darboties plašā gāzes ātruma diapazonā. Optimālais gāzes ātrums atkarīgs no daudziem faktoriem. Žāvējot termiski neizturīgus materiālus, tie labi jājauc, lai aizkavētu daļiņu pārkaršanu. Žāvējot polidispersus materiālus, izmanto nelielus gāzes ātrumus, lai rupjākās daļiņas atrastos augstākās temperatūras joslā (koniskās kamerās).

Suspendētā slāņa žāvētavās žāvē arī pastas veida materiālus, šķīdumus un suspensijas. Tādos gadījumos suspendēto slāni veido no inerta materiāla (stikla lodītes, grants, graudains fluoroplasts u. c.). Inertā materiāla suspendētā slānī iesmidzina šķīdumu (pastu). Šķīdums pārklāj inerto daļiņu ārējo virsmu. Izžūstot veidojas plāna



16.23. att. Vienkameras koniskās suspendētā slāņa žāvētavas shēma.



16.24. att. Divpakāpju suspensētā slāņa žāvētavas shēma.

žāvējamā materiāla kārtiņa. Daļiņu savstarpējās berzes rezultātā veidojas izžāvēta materiāla pulveris, kuru no žāvētavas izvada aizplūstošais gaiss.

Žāvējot smalkdispersu materiālu ar tieksmi uz daļiņu aglomerāciju, lieto vibrosuspensētā slāņa žāvētavas. Režģa vibrācija rada iespēju darba laikā uzturēt labu žāvējamā materiāla suspensēto slāni.

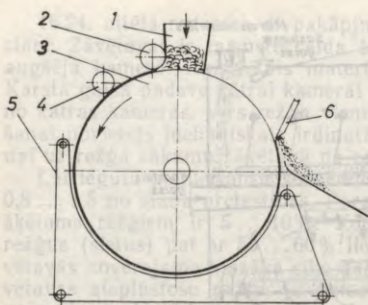
Suspensētā slāņa žāvētavas ir vienas no efektīvākām un perspektīvākām. Nelielam ražīgumam lieto periodiskas darbības žāvētavas. Suspensētā slāņa žāvētavas viegli automatizējamas un mehānizējamas.

16.4.2. Kontakta žāvētavas

Kontakta žāvētavās žāvējamais materiāls nepieciešamo siltumu saņem, saskaroties ar karstu virsmu.

Veltņu žāvētavas. Veltņu žāvētavas ir kontakta žāvētavas. Rūpniecībā lieto vienveltņa, divveltņu, kā arī vairākveltņu žāvētavas. Vienveltņa un divveltņu žāvētavas lieto šķidra materiāla un pastas veida materiāla žāvēšanai. Vairākveltņu žāvētavas sastopamas tur, kur iegūst izstrādājumus nepārtrauktas lentes veidā (papīrrūpniecībā, tekstilrūpniecībā u. c.). Šā veida žāvētavas darbojas gan atmosfēras spiedienā, gan vakuumā.

Vienveltņa žāvētava parādīta 16.25. attēlā. Tā sastāv no lēni rotējoša rievota vai gluda veltņa 3, kuru no iekšpuses apsilda ar piesātinātu ūdens tvaiku. Žāvējamo materiālu ievada pa piltuvi 1. Veltņītis 2 izlīdzina materiālu un iespiež žāvējamā veltņa rievās. Mitrumam iztvaikojot, tvaiks izspiež žāvējamo materiālu no veltņa

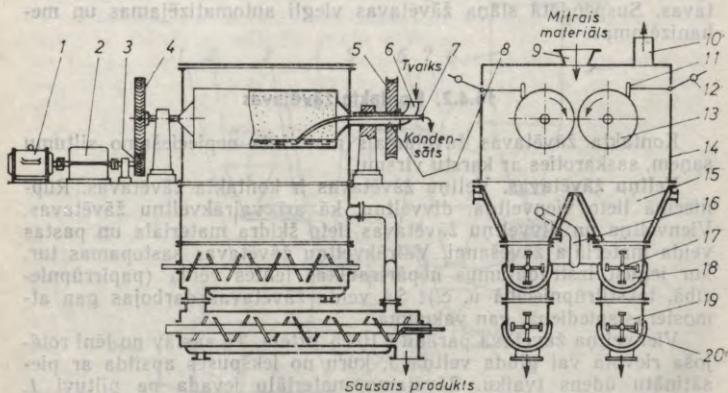


16.25. att. Vienveltņa žāvētavas shēma.

rievām. Materiāla iespiešanai atpakaļ rievās izmanto veltnīti 4 un bezgala lenti 5. Žāvējamā materiāla biezums atkarīgs no rievu dziļuma (6...12 mm). Uz gludiem veltniem materiāla biezums ir 0,1...0,2 mm. Žāvējamā veltna griešanās ātrums 0,015...0,15 s⁻¹. Veltnim apgriezoties nepilnu reizi, materiāls izžūst un to ar īpašu ķemmeveida nazi 6 noņem no veltna nelielu stienīšu veidā.

Žāvējot suspensijas vai emulsijas, dažu konstrukciju žāvētavās veltna apakšējā daļa iegremdēta šķidrumā. Vienveltņa žāvētavas lieto lielaudas ražotnēs dažādu produktu žāvēšanai.

Divveltņu žāvētava redzama 16.26. attēlā. Tā sastāv no diviem čuguna veltniem 13. Veltni griežas pretējos virzienos (0,2...1,0 s⁻¹). Jo augstāks tvaika spiediens, jo lielāks veltna apgriezienu skaits. Veltnu galos ir dobās vārpstas 8. Pa pievadu 6 ievada tvaiku. Caur vārpstu ievadīta caurulīte 7 kondensāta novadīšanai. Abi veltni ievietoti apvalkā 14. Viena veltna gultņi izveidoti kustīgi, lai nejauši materiālā iekļuvis ķermenis (uzgrieznis, skrūves u. c.) izietu starp veltniem, nebojājot iekārtu. Parasti attālumš starp veltniem aptuveni 1 mm. Mitro materiālu pievada pa lūku 9. Tērauda nažus 11, ar kuriem noņem izžāvēto materiālu, pie veltniem piespiež pretsvars 12.



16.26. att. Divveltņu žāvētavas shēma.

Žāvētavu darbina elektromotors 1, kas caur reduktoru 2 piedzen zobratu 3. Sis zobrats ir sazobē ar dzenošā veltna zobratu 4. Dzenošā veltna otrā galā ir zobrats 5, kurš griež zobratu, kas nostiprināts uz otra veltna vārpstas (attēlā nav redzams). Žāvēšanas procesā radušos tvaiku aizvada pa vākā iestiprinātu cauruļvadu 10.

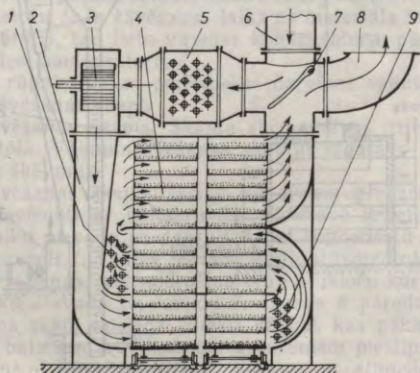
Divveltnu žāvētavām ir vēl arī papildu žāvētāji (sekundārie žāvētāji). Zem veltniem ir apsildāmi koniski uztvērēji 15, kuros sabirst apžāvētais materiāls, kas pēc tam nokļūst sekundārajos žāvētājos. Pirmā papildu žāvēšana notiek ar tvaiku apsildāmā silē 18, kurā ir lāpstņveida maisītājs 17 (tā griešanās ātrums $0,4 \text{ s}^{-1}$). Pēc pirmās papildu žāvēšanas materiāls nokļūst līdzīgā žāvētavā, kas sastāv no apsildāmas siles 19 un apsildāma maisītāja 20. No otrā papildu žāvētāja mitruma tvaiku aizvada pa cauruli 16 uz vienu no uztvērējiem.

Sādu žāvētavu īpatnējā tilpuma slodze pēc iztvaicētā mitruma ir atkarīga no sildīšanai lietotā tvaika spiediena.

16.4.3. Periodiskās darbības žāvētavas

No periodiskās darbības žāvētavām plašāk lieto dažādas kameru žāvētavas.

Kameru žāvētavas. Ķīmiskajā rūpniecībā sastopamā kameras žāvētava parādīta 16.27. attēlā. Žāvējamo materiālu ar vagonetēm 4 iebīda žāvēšanas kamerā un noslēdz durvis. Iedarbinot ventilatoru 3, pa gaisvadu 6 iesūc āra gaisu, kuru sasilda kaloriferā 5, un pa gaisvadu 2 tas nokļūst kameras apakšējā daļā. Plūzdams gar mitro materiālu, gaiss atdziest, tādēļ žāvētavā paredzēti papildu kaloriferi 1 un 9 gaisa sildīšanai. Mitro gaisu izvada pa gaisvadu 8. Ja



16.27. att. Kameras žāvētavas shēma.

maina aizvara 7 stāvokli, daļa mitrā gaisā atgriežas atpakaļ žāvēšanas procesā.

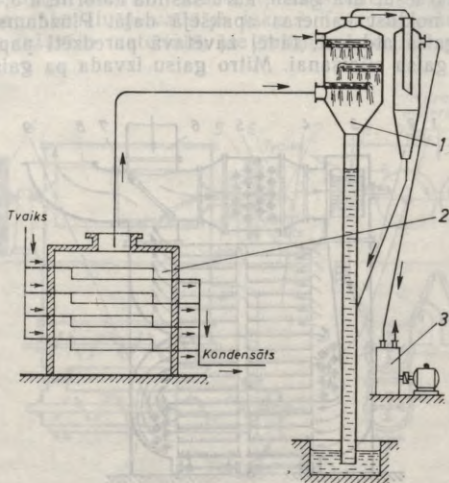
Gaisu pūš cauri kamerai tik ilgi, līdz materiāls izžuvis. Tad aptādina ventilatoru un vagonetes ar sauso materiālu izbīda no žāvēšanas kameras.

16.4.4. Vakuumžāvētavas

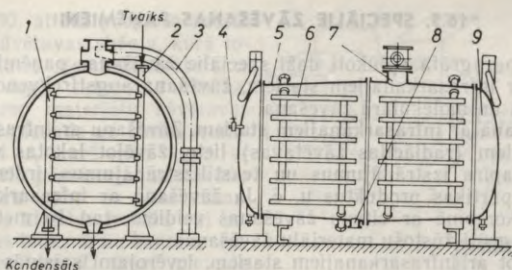
Žāvēšana vakuumā līdzīga žāvēšanai atmosfēras spiedienā. Tajā izdalāmi trīs periodi: materiāla sasilšanas periods un pirmais un otrais žāvēšanas periods. Paaugstinot retinājumu, žāvēšanas ātrums pirmajā žāvēšanas periodā ievērojami pieaug, tādēļ perioda ilgums saīsinās. Pirmajā periodā žāvēšanas ātrums ir 1,5...2,5 reizes lielāks par procesa vidējo žāvēšanas ātrumu.

Vakuumžāvētavas ir kontakta žāvētavas.

Materiāla temperatūra, žāvējot vakuumā, pirmajā žāvēšanas periodā vienāda ar mitruma viršanas temperatūru. Paaugstinot vakuumu, materiāla temperatūra pazeminās. Daudziem materiāliem pirmajā žāvēšanas periodā novērojama mitruma viršana materiāla porās. Tādēļ pirmajā žāvēšanas periodā sildošo virsmu temperatūru var uzturēt ievērojami augstāku par materiālu žāvēšanas robežtemperatūru. Perioda beigās kontaktvirsmu temperatūru pazemina līdz pieļaujamai robežai. Otrajā žāvēšanas periodā materiāla temperatūra paaugstinās, žāvēšanas beigās sasniedz maksimālo un paliek ne-



16.28. att. Vakuumžāvēšanas iekārtas shēma.



16.29. att. Vakuumžāvēšanas skapja shēma.

mainīga. Šajā periodā materiāla temperatūra nav atkarīga no retiņājuma, bet tikai no sildvirsmu temperatūras.

Vakuumā žāvē termiski neizturīgus, viegli oksidējamus materiālus, kā arī tādus, kuriem tieksme veidot putekļus. Vakuumžāvētavu apsildei var izmantot zemspiediena tvaiku vai kondensātu.

Ipatnējais siltuma daudzums vakuumžāvētavās ir mazāks nekā atmosfēras žāvētavās. Vakuumžāvētavām ir kondensators un vakuumsūkni, tādēļ enerģijas patēriņš lielāks nekā atmosfēras žāvētavām. Vakuumžāvētavās nosūcamais gaiss tilpums atkarīgs no iekārtas blīvuma un ir aptuveni 1 m^3 (žāvēšanas spiedienā) uz 1 kg iztvaicētā mitruma.

Vakuumžāvēšanas iekārtas shēma parādīta 16.28. attēlā. Tā sastāv no žāvētavas 2, kuru pēc mitrā materiāla ievietošanas hermētiski noslēdz. Žāvētavā rada vakuumu ar vakuumsūkni 3. Vakuumsūkņa patērējamās jaudas samazināšanai starp žāvētavu un sūkni novieto kondensatoru 1. Ja žāvēšanas laikā no materiāla izdalās vērtīgi tvaiki (šķīdinātāji), tad lieto virsmas kondensatoru, pārējos gadījumos — saplūdes kondensatoru.

Ķīmiskajā rūpniecībā no periodiskas darbības vakuumžāvētavām plašāk lieto žāvēšanas skapi.

Vakuumžāvēšanas skapis. Skapja shēma divos griezumos parādīta 16.29. attēlā. Vakuumžāvēšanas skapjus izgatavo ar apaļu vai taisnstūrveida šķēlumu.

Vakuumžāvēšanas skapis sastāv no diviem gredzeniem 5, kuri savā starpā savienoti ar bultskrūvēm. Žāvētavā ievietoti apsildāmi plaukti 6. Tvaiku pievada pa cauruli 2, bet kondensātu aizvada pretējā pusē pa cauruli 1. Tvaika siltuma pilnīgai izmantošanai plauktu iekšienē ir šķērssienu, kas nodrošina tvaika likoču kustību plauktā. Mitruma tvaiku aizvada pa izvadu 7. Izvads 8 paredzēts kameras tīrīšanai. Galos skapī noslēdz izliekti vāki 9, kas pakārti uz kustīgiem tērauda balstiem 3. Vākus pie gredzeniem piestiprina ar bultskrūvēm. Krāns 4 skapja iekšstelpu savieno ar atmosfēru. Siltuma zudumu samazināšanai cilindriskā daļa un vāki pārklāti ar 40... 50 mm biezu siltumizolācijas kārtu.

16.5. SPECIĀLIE ŽĀVĒŠANAS PAŅĒMIENI

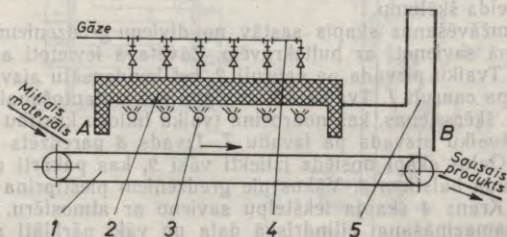
Sajā paragrāfā aplūkoti daži speciālie žāvēšanas paņēmieni: žāvēšana ar infrasarkanajiem stariem, žāvēšana augstfrekvences strāvas laukā un molekulārā žāvēšana.

Žāvēšana ar infrasarkanajiem stariem. Žāvēšanu ar infrasarkanajiem stariem (radiācijas žāvētavas) lieto, žāvējot lakotas virsmas, plānus papīra izstrādājumus un tekstilizstrādājumus, irdenus materiālus, pārtikas produktus u. c. Ja žāvēšanu ar infrasarkanajiem stariem kombinē ar citiem žāvēšanas veidiem, tad šo metodi var lietot arī grūti žūstošu materiālu žāvēšanai.

Žāvējot ar infrasarkanajiem stariem, ievērojami saīsinās žāvēšanas ilgums. Pēc literatūras datiem, dažiem krāsotiem metāla izstrādājumiem, žāvējot tos kamerās, nepieciešamais žāvēšanas ilgums sasniedz 24 stundas; izmantojot žāvēšanu ar infrasarkanajiem stariem, tas pats efekts sasniegts pēc 7 minūtēm. Žāvējot ar infrasarkanajiem stariem tekstilijas, žāvēšanas ilgumu izdodas saīsināt 30 ... 100 reizi. Līdzīga aina novērojama arī ar citiem materiāliem, žāvējot tos radiācijas žāvētavās.

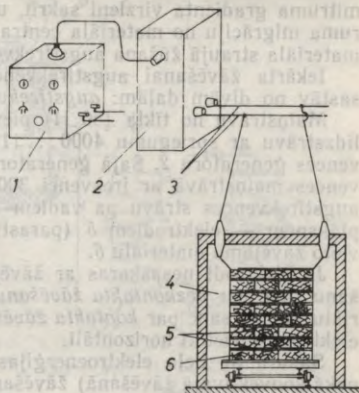
Žāvēšanas procesa intensificēšanās daļēji izskaidrojama ar to, ka radiācijas veidā materiālam var pievadīt lielākus siltuma daudzumus nekā konvekcijas rezultātā. Pēc literatūras datiem, pirmajā žāvēšanas periodā, ja gaisa temperatūra 100 °C, relatīvais mitrums 5% un ātrums 2 m/s, tad materiāla temperatūra (mitrā termometra temperatūra) ir 40 °C un siltuma plūsmas blīvums $q=870 \text{ W/m}^2$. Lietojot žāvēšanai infrasarkanā izstarotāju ar virsmas temperatūru 600 °C, siltuma plūsmas blīvums $q_1=26\,100 \text{ W/m}^2$, t. i., apmēram 30 reizi lielāks. Ja izstarotāja virsmas temperatūru paaugstina līdz 800 °C, tad siltuma plūsmas blīvums palielinās 70 reizi salīdzinājumā ar konvektīvo žāvēšanu. Žāvēšanas intensitāti radiācijas žāvētavās veicina arī tas, ka siltuma stari iekļūst žāvējamā materiālā aptuveni 0,1 ... 2,0 mm dziļumā.

Infrasarkanā starojuma avoti radiācijas žāvētavās ir elektriskās spuldzes, elektriskās spirāles, metāla un keramikas ekrāni, kurus apsilda ar gāzi vai dūmgāzēm.



16.30. att. Radiācijas žāvētavas shēma.

16.30. attēlā parādīta radiācijas žāvētavas shēma, kurā infrasarkanā staru ģenerators ir gāzes degļu sakarsēta virsma. Žāvējamo materiālu žāvētavas galā A pievada uz lentes transportieri 1, kurš lēni kopā ar materiālu pārvietojas uz žāvētavas otru galu B. Virs transportiera atrodas metāla vai keramikas bloks 2, ko karsē ar gāzes degļiem 3. Gāzi pievada pa gāzesvadu 4. Degšanas produktus un mitrumu aizvada pa dūmeni 5. Izžāvēto materiālu izvada caur žāvētavas galu B.



16.31. att. Iekārta žāvēšanai augstfrekvences strāvas laukā.

Intensīvais starojums rada žāvējamā materiāla virsmā ievērojamu temperatūras gradientu, kas traucē mitruma pārvietošanos materiālā. Temperatūras gradienta novēršanai ieteicams lietot periodisku apstarošanu. Žāvējamo materiālu apstaro 2...4 s, pēc tam 20...80 s neapstaro. Šādi žāvējot, žāvēšanas ilgums nepalielinās, bet samazinās patērētā enerģija.

Radiācijas žāvētavu priekšrocības: vienkāršs un kompakts izveidojums, procesa ērta regulēšana, īss žāvēšanas cikls un lēts siltuma avots (dūmgāzes, dabasgāze). Šo žāvētavu trūkums — liels elektroenerģijas patēriņš (ja lieto spuldzes). Bez tam šīs žāvētavas nav lietojamas biezu materiālu žāvēšanai (jālieto kombinētā žāvēšana).

Žāvēšana augstfrekvences strāvas laukā. Žāvēšana augstfrekvences strāvas laukā atsevišķos gadījumos ievērojami paaugstina žāvēšanas procesa intensitāti un samazina žāvēšanas brāķi (materiālu plaisāšanu, deformāciju).

Žāvējot koksnī (dēļus, baļķus u. c.) augstfrekvences strāvas laukā, žāvēšanas ilgums saīsinās desmitām un pat simtām reizi salīdzinājumā ar konvektīvo žāvēšanu. Bez tam bieži materiāli izžūst bez defektiem.

Žāvējot augstfrekvences strāvas laukā, žāvējamo materiālu novieto starp divām plāksnēm — elektrodiem, kuriem pievada augstfrekvences strāvu (16.31. att.). Starp elektrodiem rada mainīgu elektrisko lauku. Siltuma rašanās izskaidrojama ar materiāla molekulu polarizāciju, kas rada molekulu svārstības, bet tās savukārt izraisa materiāla sasilšanu visā masā. Augstfrekvences strāvas lauks žāvējamo materiālu tikai silda, bet citādi neietekmē.

Materiāla ārējās virsmas atdod siltumu apkārtējai videi, tādēļ temperatūra žāvējamā materiāla centrā augstāka nekā ārējos slāņos (pretēji citiem žāvēšanas veidiem). Temperatūras gradienta un

mitruma gradienta virzieni sakrīt, un abi šie gradienti veicina mitruma migrāciju no materiāla centra uz virsmu. Ar to izskaidrojama materiāla straujā žūšana augstfrekvences strāvas laukā.

Iekārta žāvēšanai augstfrekvences strāvas laukā (16.31. att.) sastāv no divām daļām: *augstfrekvences ģeneratora* un *žāvētavas*.

Mainstrāvu no tīkla (50 H) pievada taisngriezi 1. No tā iegūst līdzstrāvu ar spriegumu 4000...11 000 V, ar kuru baro augstfrekvences ģeneratoru 2. Šajā ģeneratorā līdzstrāvu pārveido augstfrekvences mainstrāvā ar frekvenci 300...3000 kHz. Ģeneratorā iegūto augstfrekvences strāvu pa vadiem 3 aizvada uz žāvētavu 4. Starp plāksnēm — elektrodiem 5 (parasti izveidoti no misiņa sieta) novieto žāvējamo materiālu 6.

Ja elektrodi nesaskaras ar žāvējamo materiālu, tad šādu žāvēšanu sauc par *bezkontakta žāvēšanu*. Ja elektrodi saskaras ar materiālu, tad to sauc par *kontakta žāvēšanu*. Žūšana ir vienmērīgāka, ja elektrodi novietoti horizontāli.

Sakarā ar lielo elektroenerģijas patēriņu (četras reizes vairāk nekā konvektīvajā žāvēšanā) žāvēšanu augstfrekvences strāvas laukā nelieto plaši.

Pēdējā laikā lieto kombinēto žāvēšanu, kurā apvieno konvektīvo žāvēšanu ar žāvēšanu augstfrekvences strāvas laukā. Tā ievērojami ietaupa elektroenerģiju, un žāvēšanas ilgums saīsinās 2...5 reizes salīdzinājumā ar konvektīvo žāvēšanu.

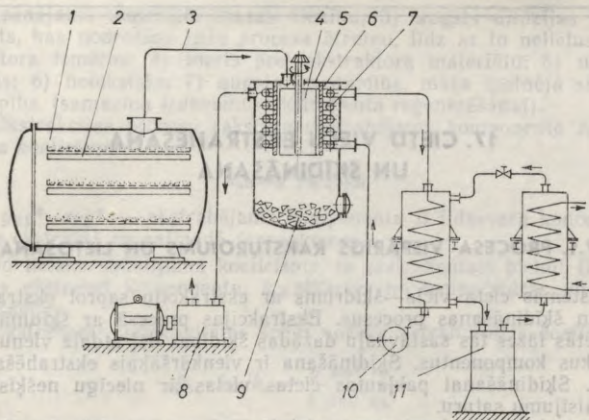
Molekulārā (sublimācijas) žāvēšana. Molekulārā žāvēšana jeb sublimācijas žāvēšana (to sauc arī par liofilo žāvēšanu) notiek retinājumā, kur absolūtais spiediens ir tikai 15 Pa un zemāks.

Molekulāro žāvēšanu lieto, iegūstot penicilīnu, streptomicīnu, serumus, kā arī žāvējot pārtikas produktus — augļus, sulas, pienu, gaļu, raugu u. c.

Lietojot molekulāro žāvēšanu, produkti saglabā sākotnējās īpašības (garšu, krāsu, smaržu, tilpumu u. c.). Saglabājas vitamīni, hormoni, fermenti u. c. Ātrā mitruma aizvadišana lielā retinājumā nonāvē mikroorganismus, tādēļ molekulārās žāvēšanas rezultātā atūdeņotie produkti, ilgstoši uzglabājot parastajos apstākļos, nebojājas. Sādi izžāvēti produkti, tos iegremdējot ūdenī, ātri to uzsūc līdz pirmatnējam mitrumam.

Celtniecības un ekspluatācijas izdevumi molekulārai žāvēšanai ir lielāki nekā žāvēšanai atmosfēras spiedienā. Tādēļ šīs žāvētavas lieto tikai ļoti vērtīgu termiski neizturīgu materiālu žāvēšanai.

Viena no iespējamām molekulārās žāvēšanas iekārtas shēmām parādīta 16.32. attēlā. Žāvēšanas iekārta sastāv no žāvēšanas kamerās jeb sublimatora 1, kas savienots ar kondensatoru 5 un vakuum-sūkni 8. Principā tā neatšķiras no parastās vakuumžāvēšanas iekārtas. Atšķirība ir tā, ka retinājuma uzturēšanai temperatūrai kondensatorā jābūt -25°C un pat zemākai. Kondensatora dzesēšanai jālieto dzesējoši maisījumi, kuru dzesēšanai molekulārās žāvēšanas iekārtas shēmā ir vēl aukstuma iekārta, piemēram, kompresijas iekārta 11.



16.32. att. Molekulārās žāvēšanas iekārtas shēma.

Žāvējamo materiālu novieto uz sietiem. Atverot žāvētavas priekšējo vāku, sietus ar materiālu saliek apsildāmos plauktos 2. Pēc tam hermētiski noslēdz žāvētavas vāku, iedarbina vakuumsūkni 8 un kamerā rada attiecīgu retinājumu.

Sakarā ar intensīvu iztvaikošanu (materiāls atrodas augstā retinājumā) siltumu iztvaikošanai iegūst no apkārtējās vides, tādēļ žāvējamais materiāls atdziest un sasaldē. Šo periodu sauc par *sasaldēšanas periodu*. Lielākajai daļai materiālu šajā periodā temperatūra pazeminās līdz $-5 \dots -20^\circ\text{C}$. Antibiotikām un dažām citām vielām tā pazeminās līdz -25°C un zemāk. Daži žāvēšanai paredzētie materiāli pirms ievietošanas žāvētavā jāsasaldē, citi jāatgāzē (ja tie vakuumā rada putas). Visā šajā periodā sublimatora plauktiem nepievada siltumu. Šajā laikā no materiāla iztvaiko 10...15% mitruma. Žāvēšanas ātrums sasaldēšanas periodā pakāpeniski samazinās.

Gaisu un tvaiku, kas izdalās no materiāla, pa cauruli 3 aizvada uz kondensatoru. Sakarā ar zemo temperatūru kondensatorā (-25°C un zemāka) ūdens tvaiks kondensējas un piesalst pie kondensatora dzesējošās virsmas 6, no kuras ledu notīra rotējošais skrāpis 4. Ledus sabirst krātuvē 9, no kuras tas pēc žāvēšanas procesa pabeigšanas tiek aizvākts. Lieto arī divus paralēli saslēgtus kondensatorus, — kamēr no viena kondensatora izvāc ledu, tikmēr darbojas otrs. Kondensatorā vēlama zemo temperatūru sasniedz, kondensatora dzesinātājā 7 ievadot dzesējošo maisījumu, kuru no aukstumiekārtas kondensatoram pievada cirkulācijas sūkni 10.

Pēc materiāla sasaldēšanas sākas *sublimācijas periods*, un mitrums iztvaiko no sasaldētā materiāla (no ledus tieši pāriet tvaikā).

17. CIETU VIELU EKSTRAHĒŠANA UN ŠĶĪDINĀŠANA

17.1. PROCESA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS UN LIETOŠANA

Sistēmās cieta viela—šķidrums ar ekstrakciju saprot ekstrakcijas un šķīdināšanas procesus. Ekstrakcijas procesā ar šķīdinātāju no cietās fāzes tās sastāvdaļu dažādas šķīdības dēļ atdala vienu vai vairākus komponentus. Šķīdināšana ir vienkāršākais ekstrahēšanas veids. Šķīdināšanai pakļautas cietas vielas ar niecīgu nešķīstošo piemaisījumu saturu.

Ekstrahējamais komponents cietajā fāzē var būt cietā vai šķidrā stāvoklī, iespējamas arī ķīmiskas reakcijas starp ekstrahējamo materiālu un šķīdinātāju.

Cietās vielas atkarībā no struktūras iedalāmas 1) blīvās viendabīgās vielās un 2) porainās vielās.

Blīvos, viendabīgos materiālus parasti šķīdina. Porainos materiālus ekstrahē. Sos materiālus raksturo poru izmērs un to veids. Ja poras ievērojami lielākas par šķīdinātāja molekulām, tad šķīdinātāja kustība ir intensīva, un komponenta pāreja notiek *konvektīvās difūzijas veidā*. Poru izmēriem tuvojoties šķīdinātāja molekulu izmēriem, to kustība ir apgrūtināta, un vielu pāreja porās pakļaujas *molekulārās difūzijas likumiem*.

Cieto fāzi ar viendabīgu poru struktūru un visos virzienos vienādu difūziju sauc par *izotropu fāzi*, pretējā gadījumā — par *anizotropu fāzi*.

Ķīmijas tehnoloģijā cieto vielu ekstrahēšanu lieto metālu, sāļu, sēra un citu vielu izdalīšanai no rūdām vai iežiem; mākslīgo mēsļu, miecvielu, krāsvielu un citu produktu iegūšanai; celulozes izdalīšanai no koksnes; cukura, augu eļļu, smaržvielu un dažādu ārstniecības vielu iegūšanai.

Ekstrakcijas procesa ātrums atkarīgs no daudziem faktoriem, piemēram, no ekstrahējamā komponenta saistības ar cieto vielu, ekstrahenta selektivitātes, procesa temperatūras, spiediena u. c.

17.2. EKSTRAHENTA IZVĒLE

Ekstrahentam jāatbilst šādām prasībām: 1) augsta selektivitāte (spēj ekstrahēt vienu vai vairākus komponentus); 2) augsts sadalījuma koeficients k_s , kas nodrošina nelielu ekstrahenta patēriņu uz

apstrādājamā materiāla masas vienību; 3) augsts difūzijas koeficients, kas nodrošina lielu procesa ātrumu, līdz ar to nelielus ekstraktora izmērus; 4) inerts pret ekstraktora materiālu; 5) ugunsdrošs; 6) netoksisks; 7) augsta gaistamība, maza īpatnējā siltumietilpība (samazina izdevumus ekstrahenta reģenerēšanai).

Ekstrakcijas procesu raksturo ekstrahējamā komponenta *sadalījuma koeficients*

$$k_{sB} = y_{EB}^* / x_{RB}^*$$

kur y_{EB}^* , x_{RB}^* — ekstrahējamā komponenta *B* līdzsvara koncentrācijas ekstraktā un rafinādē (spraukumos).

Jo lielāks sadalījuma koeficients, jo ekstrahentam piemīt lielāka spēja ekstrahēt komponentu; k_{sB} atkarīgs no temperatūras un koncentrācijas.

Ekstrahenta selektivitātes spēju nosaka *selektivitātes koeficients*

$$\beta_s = k_{sB} / k_{sA} = \frac{y_{EB}^* x_{RA}^*}{x_{RB}^* y_{EA}^*},$$

kur k_{sA} , k_{sB} — sadalījuma koeficienti attiecībā uz komponentiem *A* un *B*.

Jo vairāk selektivitātes koeficienta skaitliskā vērtība pārsniedz 1, jo labāk notiek ekstrakcija. Labai ekstrakcijai nepieciešams, lai $\beta_s > 1,5 \dots 2$.

Ekstrahēto vielas daudzumu raksturo *ekstrakcijas koeficients* ϵ_E :

$$\epsilon_E = \frac{G_E (\bar{Y}_b - \bar{Y}_s)}{G_F \bar{X}_s}, \text{ ja } \bar{Y}_s \neq 0;$$

$$\epsilon_E = \frac{G_E \bar{Y}_b}{G_F \bar{X}_s}, \text{ ja } \bar{Y}_s = 0,$$

kur G_E , G_F — ekstrakta un sākuma materiāla plūsma nepārtrauktas darbības ekstraktorā, kg/s, vai masa (periodiskas darbības ekstraktorā), kg; \bar{Y}_b , \bar{Y}_s — ekstrahenta beigu un sākuma koncentrācija, kg/kg; \bar{X}_s — sākuma koncentrācija materiālā, kg/kg.

Ekstrahējamā komponenta atlikumu rafinādē (spraukumos) raksturo attiecība

$$\varphi_R = \frac{G_R \bar{X}_b}{G_F \bar{X}_s},$$

kur G_R — rafinādes plūsma (nepārtrauktas darbības ekstraktorā), kg/s, vai masa (periodiskas darbības ekstraktorā), kg; \bar{X}_b — ekstrahējamā komponenta beigu koncentrācija rafinādē, kg/kg.

Ekstrakcijas procesam $\epsilon_E + \varphi_R = 1$.

Ķīmiskajā rūpniecībā plaši lieto šādus šķīdinātājus: ūdeni, etilspirtu, benzolu, tetrahloroglekli, acetonu, benzīnu, trihloretilēnu, hloroformu, dietilēteri u. c.

17.3. EKSTRAKCIJAS PROCESA VIRZOŠAIS SPĒKS

Ekstrakcijas procesa virzošais spēks sistēmās cietā viela—šķidrums ir koncentrāciju starpība starp koncentrāciju uz daļiņas virsmas \bar{C} un vidējo koncentrāciju šķīdumā \bar{C}_0 .

Pieņemot, ka koncentrācija uz fāžu saskares virsmas vienāda ar piesātināta šķīduma koncentrāciju $\bar{C}=\bar{C}^*$ (uz fāžu saskares virsmas ātri iestājas līdzsvars), procesa virzošo spēku var izteikt kā $\bar{C}^*-\bar{C}_0$, kur \bar{C}^* , \bar{C}_0 — ekstrahējamā komponenta līdzsvara koncentrācija uz fāžu saskares virsmas un vidējā komponenta koncentrācija šķīdumā, kg/m^3 vai mol/m^3 .

Ekstrahējamā komponenta pārvietošanos plūsmas kodolā izsaka konvektīvās difūzijas vienādojums

$$dm/d\tau = \beta (\bar{C}^* - \bar{C}_0) S, \quad (17.1)$$

bet robežkārtā — molekulārās difūzijas vienādojums

$$dm/d\tau = \frac{D_m}{\delta} (\bar{C}^* - \bar{C}_0) S, \quad (17.2)$$

kur m — laikā τ izšķīdusi ekstrahējamā komponenta masa, kg ; β — masas atdeves koeficients šķidrājā fāzē, m/s ; S — cietās vielas šķīšanas virsma laika sprīdī τ , m^2 ; D_m — molekulārās difūzijas koeficients, m^2/s .

No vienādojumiem (17.1) un (17.2) iegūst, ka $D_m/\delta = \beta$, t. i., masas atdeves koeficients β ir apgriezti proporcionāls robežkārtas biezumam δ uz ekstrahējamās daļiņas virsmas. Robežkārtas biezums δ atkarīgs no hidrodinamiskajiem apstākļiem uz cietās daļiņas virsmas. Palielinot šķidrums kustības ātrumu gar daļiņas virsmu, δ samazinās un β palielinās. Intensīva šķidrums maisīšana samazina robežkārtas biezumu δ . Iekšējo difūziju (cietajā vielā) maisīšana nestimulē. Ekstrakcijai maisīšana mazāk nozīmīga nekā šķīdināšanai.

Masas atdeves koeficients β pieaug, palielinoties Reinaldsa kritērijam līdz brīdim, kad visas cietās daļiņas pārgājušas suspendētā stāvoklī.

Ja ekstrahēšanas procesa laikā notiek ķīmiska reakcija, masas apmaiņa noris jo spēcīgāk, jo lielāks ir ķīmiskās reakcijas ātrums.

17.4. EKSTRAKCIJAS KINĒTIKA

Lai varētu noteikt ekstraktorū pamatizmērus, jāzina, cik ilgu laiku cietajai fāzei jākontaktējas ar ekstrahentu. To aprēķina no procesa kinētiskajiem vienādojumiem.

Cieto vielu ekstrahēšanas mehānismu raksturo šādi posmi: 1) ekstrahenta piekļūšana cietās fāzes virsmai; 2) ekstrahenta difūzija cietās fāzes daļiņu iekšienē; 3) ekstrahējamā komponenta šķī-

dināšana; 4) ekstrahējamā komponenta pārvietošanās (līdz daļiņu virsmai) un 5) komponenta difūzija no daļiņu virsmas ekstrahenta plūsmas kodolā. Ekstrahēšanas mehānisma pirmo un piekto posmu sauc par *ārējo difūziju*, bet otro un ceturto posmu — par *iekšējo difūziju*.

Ekstrahējamais komponents cietās fāzes daļiņās sadalīts nevienmērīgi. Ekstrakcijas laikā daļiņām mainās struktūra (kļūst porainas). Pašas daļiņas ir polidispersas, un procesa laikā tās kontaktējas ar dažādas koncentrācijas ekstrahentu. Daļiņās nepārtraukti mainās koncentrācija. Sākumā uz daļiņas virsmas ir liela ekstrahējamā komponenta koncentrācija, pēc laika tā samazinās, un lielākā koncentrācija ir daļiņas vidū. Ekstrakciju ietekmē arī materiāla porainība, poru lielums, ekstrahenta molekulu izmēri, tā īpašības u. c. No minētā izriet, ka cietu vielu ekstrakcija pieder pie nestacionāriem procesiem.

Precīzu procesa matemātisko modeli iegūt nav iespējams. Tādēļ lieto aptuvenas sakarības kinētisko vienādojumu sastādīšanai vienkāršāko veidu cietajām daļiņām (plāksne, cilindrs, lode).

Kinētisko vienādojumu iegūšanai lieto kriteriālo vienādojumu (10.77), pārveidojot to šādi:

$$\frac{C_s - C_\tau}{C_s - C_\xi} = \varphi(F_{0d}, Bi_d, G, b),$$

kur C_s , C_τ — aktīvā komponenta koncentrācija cietajā fāzē sākumā un pēc laika τ ; C_ξ šķidrās fāzes koncentrācija — līdzplūsmas aparātiem vienāda ar sākuma koncentrāciju, bet pretplūsmas aparātiem — ar no aparāta izplūstošās šķidrās fāzes koncentrāciju; G — ģeometriskais simplekss (atkarīgs no daļiņas veida: plāksnei $G=0$; cilindram $G=1$; lodei $G=2$); $b = m\varepsilon/(\rho_d V_\xi)$; m — cietās fāzes masa, kg; V_ξ — šķidrās fāzes tilpums, m^3 ; ε — cietās fāzes porainība, m^3/m^3 ; ρ_d — daļiņu blīvums, kg/m^3 ; $F_{0d} = D\tau/l^2$ — Furjē kritērijs difūzijai; $Bi_d = \beta l/D_m$ — Bio kritērijs difūzijai. Ja procesā noteicošā ir iekšējā difūzija, tad Bio kritērijs $Bi_d > 30$, turpretī, ja procesu nosaka ārējā difūzija, tad $Bi_d < 1$.

Cietajai fāzei ar kapilāru porainu struktūru starpfāžu kinētiskie vienādojumi iegūti šādi:

ja $Bi_d = \text{const}$, tad attiecība $(C_s - C_\tau)/(C_s - C_\xi)$ izsakāma ar vienādojumu

$$\frac{C_s - C_\tau}{C_s - C_\xi} = \frac{1}{1+b} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-\mu_n^2 F_{0d});$$

ja $Bi_d \ll 1$, tad procesu nosaka ārējā difūzija:

$$\frac{C_s - C_\tau}{C_s - C_\xi} = \frac{1}{1+b} \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-\mu_n^2 F_{0d}) \right].$$

Lielumi A_n un μ_n atkarīgi no cieto daļiņu veida:

1) lodei

$$A_n = \frac{6}{\left(3b - \frac{\mu_n}{Bi_d}\right)^2 + \mu_n^2 \left(1 - \frac{1}{Bi_d}\right) + 9b}$$

ja $Bi_d \rightarrow \infty$

$$A_n = \frac{6}{\mu_n^2 + 9b(1-b)}$$

un μ_n ir tālāk doto vienādojumu saknes

$$\operatorname{ctg} \mu_n = \frac{1}{\mu_n} + \frac{1}{(3b/\mu_n) - (\mu_n/Bi_d)}$$

ja $Bi_d \rightarrow \infty$

$$\operatorname{ctg} \mu_n = \frac{1}{\mu_n} + \frac{\mu_n}{3b}$$

2) plāksnei

$$A_n = \frac{2}{\left[(\mu_n^2/Bi_d) - b\right]^2 + \left[(1/Bi_d) + 1\right]\mu_n^2 + b}$$

ja $Bi_d \rightarrow \infty$

$$A_n = \frac{2}{\mu_n^2 + b(1-b)}$$

$$\operatorname{ctg} \mu_n = (\mu_n/Bi_d) - (b/\mu_n)$$

ja $Bi_d \rightarrow \infty$

$$\lg \mu_n = -\mu_n/b$$

Ja $Fo_d \rightarrow \infty$, tad

$$\frac{C_s - C_\tau}{C_s - C_s} = A_1 \exp(-\mu_1^2 Fo_d)$$

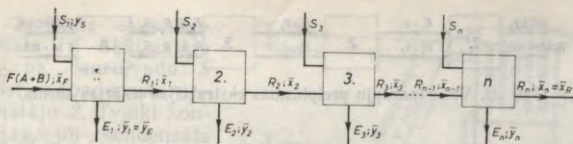
kur μ_1 — atkarīgs no daļiņu veida: lodei $\mu_1 = [3Bi_d(1-b)]^{1/2}$; plāksnei $\mu_1 = [1 + b/(1/3 + 1/Bi_d)]^{1/2}$; A_1 — koeficients, $A_1 = 1/(1+b)$.

No minētajiem vienādojumiem iespējams noteikt Furjē kritēriju $Fo_d = D\tau/l^2$, no kura aprēķina nepieciešamo fāžu kontakta ilgumu τ .

17.5. EKSTRAKCIJAS IEKĀRTU TEHNOLOĢISKĀS SHĒMAS

Ķīmiskajā rūpniecībā lieto periodiskas un nepārtrauktas darbības ekstrakcijas iekārtas.

Periodiskas darbības iekārtās ekstrakciju realizē, noteiktu laiku izturot ekstrahentu sasmalcinātā cietās fāzes slānī vai ļaujot tam



17.1. att. Vairāpakāpju līdzplūsmas ekstrakcijas iekārtas shēma:
 S_1 — šķīdinātājs (ekstrahents), F — cietā fāze, R_n — rafināde, E_n — ekstrakts.

lēni plūst caur ekstrahējamā materiāla slāni (*perkolācija*). Periodiskas darbības iekārtas lieto nelielam ražīgumam.

Perspektīvākas ir *nepārtrauktas darbības iekārtas*. Tajās izmanto līdzplūsmu vai pretplūsmu. Rūpniecībā lieto vairāpakāpju iekārtas. No procesu modelēšanas viedokļa līdzplūsmas ekstrakciju var izteikt ar ideālas izspiešanas modeli (sk. 105. lpp.).

Ekstraktorā daļiņu vidējais uzturēšanās laiks

$$\tau = V/Q,$$

kur V — aparāta tilpums (dotā gadījumā cietās vai šķidrās fāzes tilpums atkarībā no tā, kurai fāzei nosaka uzturēšanās laiku), m^3 ; Q — aplūkojamās fāzes caurtece, m^3/s .

Pilnīgākai ekstrahēšanai lieto vairāpakāpju iekārtas (17.1. att.). Pēc šīs shēmas iegūst atšķaidītu ekstraktu.

Nepieciešamo pakāpju skaitu var noteikt grafiski vai aprēķināt analītiski.

Grafiskai pakāpju skaita noteikšanai lieto vienādmalu trijstūra diagrammu. Virsotne B (17.2. att.) atbilst ekstrahējamam komponentam E , virsotne A — cietās fāzes inertajai daļai R , bet virsotne C — ekstrahentam S . Uz malas BC iegūst ekstrakta sastāvu, bet uz binodālās līknes I — rafinādes sastāvu.

Ekstrahēšanai nepieciešamo teorētisko pakāpju skaitu nosaka pēc līdzsvara hordu (sk. 540. lpp.) $E_n R_n$ skaita, veicot tās uz diagrammas, līdz iegūst vajadzīgo rafinādes koncentrāciju (R_4).

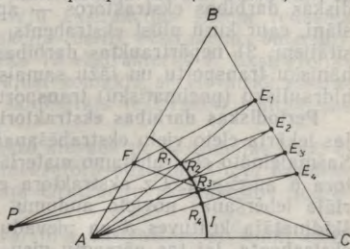
Cietu vielu ekstrakcijai biežāk lieto pretplūsmu (17.3. att.). Procesa darba taisnes iegūšanai pirmām trim pakāpēm sastāda materiālo bilanci attiecībā uz šķīdro fāzi:

$$S + R_4 a_4 = E_3 + R_1 a_1, \quad (17.3)$$

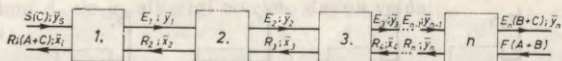
kur a_1, a_4 — šķidrās fāzes masas daļas cietajā fāzē.

Materiālā bilancē, kas attiecināta uz ekstrahējamo komponentu, ir

$$S y_s + R_4 a_4 \bar{x}_4 = E_3 \bar{y}_3 + R_1 a_1 \bar{x}_1, \quad (17.4)$$



17.2. att. Pakāpju skaita noteikšana trijstūra diagrammā.



17.3. att. Vairāpkāpju pretplūsmas ekstrakcijas iekārtas shēma.

kur \bar{x}_1, \bar{x}_4 — ekstrahējamā komponenta masas daļas rafinādē (pēc 17.3. att.); \bar{y}_s, \bar{y}_3 — ekstrahējamā komponenta masas daļas ekstrahētā un ekstraktā.

No vienādojumiem (17.3) un (17.4) var rakstīt

$$\bar{y}_3 = \frac{S\bar{y}_s + R_4 a_4 \bar{x}_4 - R_1 a_1 \bar{x}_1}{S - R_1 a_1 + R_4 a_4} \quad \text{jeb}$$

$$\bar{y}_3 = \frac{R_4 a_4 \bar{x}_4}{S - R_1 a_1 + R_4 a_4} + \frac{S\bar{y}_s - R_1 a_1 \bar{x}_1}{S - R_1 a_1 + R_4 a_4} \quad (17.5)$$

Pieņemot, ka cietā fāze ir nemainīga, t. i., $R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_n = R = \text{const}$, tad

$$\bar{y}_3 \left(\frac{S}{Ra_4} + 1 - \frac{a_1}{a_4} \right) = \bar{x}_4 + \frac{Sy_s - Ra_1 \bar{x}_1}{Ra_4}$$

Sis vienādojums ir darba taisnes vienādojums cietu vielu ekstrakcijai pretplūsmas vairāpkāpju ekstraktoros. No šī vienādojuma iespējams iegūt formulas analītiskai teorētiskā pakāpju skaita noteikšanai.

Ķīmiskajā rūpniecībā un hidrometalurģijā (urāna un citu metālu iegūšanā) lieto kaskādveida ekstrakcijas (šķīdināšanas) iekārtas ar nostādinātājiem, kas darbojas pēc principa, kāds parādīts 13.12. attēlā.

17.6. EKSTRAKTORI CIETU VIELU EKSTRAHĒŠANAI

Ķīmiskajā rūpniecībā izmantojamās ekstraktoros iedala 1) periodiskas darbības ekstraktoros — aparāti ar stacionāru cietās fāzes slāni, caur kuru plūst ekstrahents, un aparāti ar mehāniskiem maisītājiem; 2) nepārtrauktas darbības ekstraktoros — aparāti ar mehānisku transportu un fāžu samaisīšanu un aparāti ar cietās fāzes hidraulisku (pneimatisku) transportu.

Periodiskas darbības ekstraktori. Periodiskas darbības ekstrakcijas iekārta cieto vielu ekstrahēšanai shematiski parādīta 17.4. attēlā. Sasmalcināto ekstrahējamo materiālu $A+B$ ievada pa lūku ekstraktora 6 augšgalā. Uz ekstraktora caurumotā dibena 7 pirms materiāla iebēršanas novieto audumu, metāla sietu vai filtrpapīru. No šķīdinātāja krātuves 3 pa pievadu 4 ievada ekstraktora tik daudz ekstrahenta, lai tas pārsegtu visu materiālu. Pēc noteikta izturēšanas laika iegūtais ekstrakts pa cauruļvadu 9 aizplūst uz destilācijas kubu 10. Ekstraktoru piepilda ar svaigu šķīdinātāju. Destilācijas

kubā ievietots siltumapmainītājs 11. Šķīdinātāja tvaiki pa cauruļvadu 5 aizplūst uz kondensatoru—dzesinātāju 2. Tvaiki kondensējas, un kondensāts saplūst krātuvē, no kurienes pēc vajadzības to aizvada uz ekstraktoru. Ekstrakciju turpina tik ilgi, līdz ekstrahēta nepieciešamā vielas masa. Pēc pēdējā ekstrakta aizvadišanas smalkais atlikums satur vēl daudz šķīdinātāja, no kura cieto atlikumu atbrīvo, ekstraktoru sildot ar siltumapmainītāju 8. Šķīdinātāja tvaiki aizplūst pa tvaikvadu 1 uz kondensatoru. No šķīdinātāja atbrīvotos spraukus izvada pa lūku ekstraktora apakšā. Pēc tam ekstraktoru piepilda ar jaunu ekstrahējamo materiālu un ekstrakciju atkārtu.

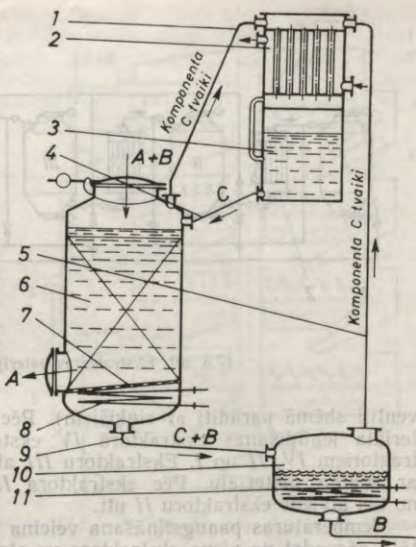
Sādas ekstrakcijas trūkumi — liels ekstrahenta patēriņš, ilga ekstrakcija un liels enerģijas patēriņš, ekstrahentu sadalot.

Ekstrahējot pēc aplūkotās shēmas, tikai pirmā ekstrakta daļa ir koncentrēta, nākamās ir arvien vairāk atšķaidītas, jo ekstrahējamā komponenta koncentrācija ekstrahējamā materiālā samazinās.

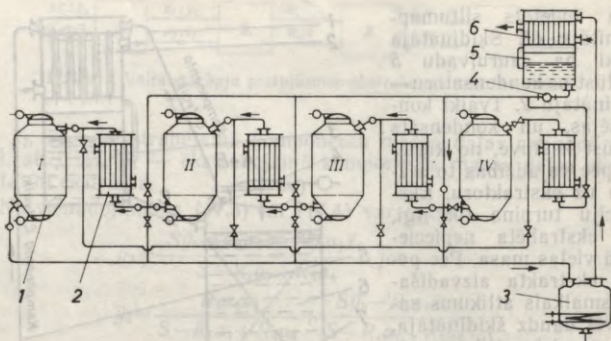
Ekstrakcijas efekts ievērojami palielinās, ja vairākus ekstraktorus savieno virknē. Šāda vairākpakāpju ekstrakcijas shēma redzama 17.5. attēlā. Vairākpakāpju ekstrakciju realizē *ekstrakcijas baterijās*, kur virknē saslēdz pat vairāk nekā 10 ekstraktorus 1. Ekstrakcijas baterijās svaigais ekstrahents nokļūst kontaktā ar visvairāk ekstrahēto materiālu, bet piesātinātais šķīdinātājs (ekstrakts) kontaktējas ar svaigo ekstrahējamo materiālu.

No ekstraktora 1 iegūto ekstraktu aizvada uz destilācijas kubu 3. Šķīdinātāja tvaiki aizplūst uz kondensatoru—dzesinātāju 6. Kondensāts saplūst krātuvē 5. Šķīdinātāja cirkulāciju ekstraktoros nodrošina sūknis 4.

Ekstrakcijas baterijās viens vai divi ekstraktori atvienoti cietā atlikuma izkraušanai un svaiga ekstrahējamā materiāla iepildīšanai, piemēram, 17.5. attēlā redzamajā shēmā ekstrahents plūst cauri ekstraktoriem III, II un I, bet ekstraktors IV ir atvienots (atvērte



17.4. att. Periodiskas darbības ekstrakcijas iekārta cietu vielu ekstrahēšanai.



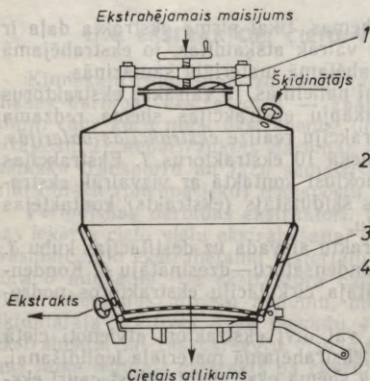
17.5. att. Ekstrakcijas baterijas shēma.

ventiļi shēmā parādīti ar riņķiņiem). Pēc svaiga ekstrahējamā materiāla iepildīšanas ekstraktorā *IV* ekstrahents plūdis cauri ekstraktoriem *IV*, *II* un *I*. Ekstraktoru *III* atvieno, iztukšo un piepilda ar svaigu materiālu. Pēc ekstraktora *III* pievienošanas baterijai no tās atvieno ekstraktoru *II* utt.

Temperatūras paaugstināšana veicina ekstrakciju, tādēļ, šķīdinātāju pārvadot no viena ekstraktora uz otru, to uzsilda siltumapmaiņtājā (kolorizatorā) 2.

17.6. attēlā parādīts ekstraktors—difuzors. Tas sastāv no tērauda korpusa 2, kura augšgalā izveidota iekraušanas lūka 1. Cieto atlikumu no ekstraktora izvada,

atverot izkraušanas lūku 4, kurai ir gumijas caurules blīvējums. Kad lūka aizvērta, gumijas caurulē ar spiedienu ievada ūdeni, caurule izplešas un nodrošina lūkas noslēgšanu. Ekstrakts izplūst cauri sietam 3 un aizplūst no ekstraktora apakšas. Šķīdinātāju ekstraktorā ievada no augšas. Ekstraktorus izgatavo arī ar maisītājiem.



17.6. att. Ekstraktora—difuzora shēma.

Nepārtrauktas darbības ekstraktori. Ekstraktori ar mehānisku transportu un fāžu samaisīšanu. Pie šī veida aparātiem pieder karuselveida, konveijerveida un kolonnu ekstraktori.

ekstrahentu pievada vairāk ekstrahētajai cietajai fāzei, lai paaugstinātu procesa virzošo spēku ΔC). Ekstrahents, izplūzdams caur materiāla slāni, satek savācējvertnē 3. Sūkņus 4 izmanto daļēji piesātinātā ekstrakta aizvadišanai uz nākamo aprasīnāmā materiāla joslu. Spraukumus no ekstraktora aizvada pa tekni 6.

Ar šiem ekstraktoriem iegūst ekstraktu ar augstu koncentrāciju un niecīgu cieto vielu piemaisījumu.

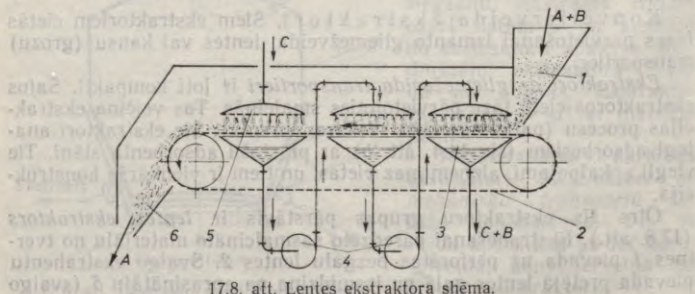
Gabalveida materiāla ekstrakcijai lieto *cilindriskos ekstraktorus*, kas pēc konstruktīvā izveidojuma analogi cilindriskajām žāvētavām. Cilindra vienā galā (augstākā) ievada ekstrahējamo materiālu un ekstrahentu (var būt arī pretplūsma), bet pa otru galu izvada ekstraktu un spraukumus. Cietā materiāla gabali, pārvietojoties ekstraktorā, triecas cits pret citu un arī pret cilindra sienu un smalcinās; tas intensificē ekstrakciju.

Kolonnu ekstraktori. Sā veida aparātus iedala vertikālos, horizontālos un slīpos kolonnu ekstraktorus. Ekstrakcijai lieto vienkolonnas un vairākkolonnu iekārtas. Materiālu pārvieto ar *lāpstiņām, gliemežiem un ķēdēm*. Šādus ekstraktorus plaši lieto ķīmiskajā, ķīmiski farmaceitiskajā, cukura un mežu ķīmiskajā rūpniecībā.

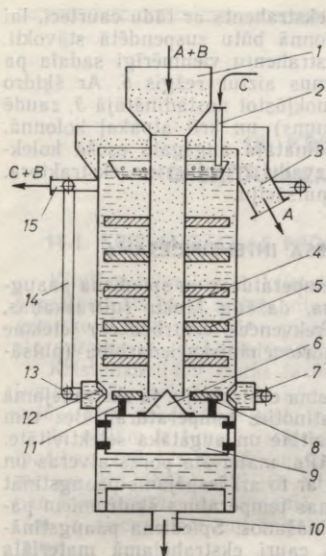
Viens no kolonnu ekstraktoriem parādīts 17.9. attēlā. Ekstraktora centrā atrodas cietā graudainā materiāla pievadcaurule 4, pa kuru no tvertnes 1 materiālu novada ekstraktora apakšējā daļā. Pa cauruli 2 pievada ekstrahentu, bet spraukumus izvada pa ekstraktora augšu — pa tekni 3. Zem materiāla pievadcaurules novietots konuss 6, kas piestiprināts peldošam pludīņam 9.

Uz materiāla pievadcaurules 4 cits virs cita uzstiprināti šķīvji 5 ar radiālām spraugām. Blakus esošiem šķīvjiem spraugas ir ar pretēju slīpumu. Ekstraktora apakšējā daļā izveidots ekstrakta kolektors 7. Tas no ekstraktora nodalīts ar sietiem 12. Kolektors sastāv no daļām, un tās savieno caurule 13.

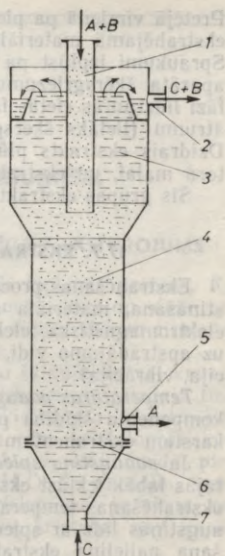
Ekstraktu no kolektora aizvada ar cauruli 14, kas beidzas ar ekstrakta izvadu 15. Ekstrakta izvads atrodas ekstraktora augšējā daļā, lai ekstraktorā ekstrahentu uzturētu noteiktā līmenī. Šķivis 8 piestiprināts pludīņam 9 ar balstiem 11. Šķīvja galos ir elastīgas sukuks (attēlā nav parādītas).



17.8. att. Lentes ekstraktora shēma.



17.9. att. Kolonnu ekstraktora shēma.



17.10. att. Suspendedā slāņa ekstraktora shēma.

Cieto fāzi pa cauruli 4 un ekstrahentu pa pievadu 2 pievada nepārtraukti. Cieto fāzi izvada pa centrālās caurules apakšējo galu, pa konusu 6 tā nokļūst uz pludiņa 9 virsmas. Caurulē 10 rada impulsveida spiediena svārstības, kuru ietekmē pludiņš 9 kustas turp—atpakaļ virzienā. Cietā fāze impulsu rezultātā pārvietojas uz augšu preti plūstošajam ekstrahentam. Tā kā šķīvjēm ir radiālas spraugas ar pretēju slīpumu, cietā fāze, kas ekstraktorā pārvietojas uz augšu, tiek iegriezta un iegūst šķērskustību; tas veicina kontaktu starp fāzēm.

Sieta 12 virsmu no graudainā materiāla attīra sukas, kas pārvietojas turp—atpakaļ virzienā kopā ar šķīvi 8 un pludiņu 9 impulsu ietekmē. Impulsu biežums regulējams pēc vajadzības.

Ekstraktori ar cietās fāzes hidraulisku (pneimatisku) transportu. Šādus ekstraktorus plaši lieto reto un krāsaino metālu, urāna hidro-metalurģijā, katalītiskos procesos, jonu apmaiņas tehnoloģijā un citos procesos.

Ekstrakcijas procesu intensificē, realizējot to suspendētā (pseido-sašķidrinātā) slāni.

Viens no šādiem ekstraktoriem (šķīdinātājiem) redzams 17.10. attēlā. Sākuma materiālu $A+B$ pa cauruli 1 ievada ekstraktorā 4.

Pretējā virzienā pa pievadu 7 plūst ekstrahents ar tādu caurteci, lai ekstrahējamā materiāla daļiņas kolonnā būtu suspendētā stāvoklī. Spraukumi izplūst pa izvadu 5. Ekstrahentu vienmērīgi sadala pa aparāta šķērssgriezumu un spraukumus aiztur režģis 6. Ar šķidro fāzi līdzrautās cietās fāzes daļiņas, nokļūstot nostādinātājā 3, zaudē ātrumu (lielāks šķērssgriezuma laukums) un krit atpakaļ kolonnā. Dzidrais ekstrakts plūst pāri nostādinātāja augšgalā esošā kolektora malai, un ekstrakts $C+B$ pa izvadu 2 izplūst no ekstraktora. Šīs grupas ekstraktos lieto arī pulsāciju.

17.7. EKSTRAKCIJAS PROCESA INTENSIFICĒŠANA

Ekstrahēšanas procesus veicina temperatūras un spiediena paaugstināšana, materiāla sasmalcināšana, dažādu lauku (ultraskaņas, elektromagnētiskā, elektriskā, augstfrekvences, centrālās) ietekme uz apstrādājamo vidi, arī dažāda hidromehāniska iedarbība (pulsācija, vibrācija).

Temperatūras paaugstināšana veicina ekstrakciju, ja ekstrahējamā komponenta šķīdība pieaug, paaugstinoties temperatūrai. Bez tam karstam ekstrahentam mazāka viskozitāte un augstāka selektivitāte.

Ja *paaugstina spiedienu* virs 2 MPa, materiāla poras atveras un tajās labāk iekļūst ekstrahents. Līdz ar to arī iespējams paaugstināt ekstrahēšanas temperatūru, jo viršanas temperatūra šķidrumiem paaugstinās līdz ar spiediena paaugstināšanos. Spiediena paaugstināšana palielina ekstrahenta plūsmu cauri ekstrahējamā materiāla slānim.

Cieto vielu ekstrahēšanā liela nozīme ir apstrādājamā *materiāla dispersitātei*, jo no cieto daļiņu lieluma atkarīgs procesa ātrums. Optimālā dispersitāte atkarīga no materiāla struktūras, uzbriešanas, slapināšanās un citām fizikālajām īpašībām. Katram ekstrakcijas procesam eksperimentāli jānosaka vēlāmā dispersitātes pakāpe. Cietās fāzes dispersitāte jānosaka arī ar citiem procesa faktoriem, piemēram, ļoti smalkas frakcijas klātbūtne ievērojami palielina ekstrahējamā materiāla slāņa pretestību. Cietās fāzes dispersitāte ietekmē arī iekšējo un ārējo difūziju. Jāatceras, ka sasmalcināšana ir dārgs process (liels enerģijas patēriņš), tādēļ jāsmalcina tikai līdz optimāliem daļiņu izmēriem.

Ultraskaņa (no 20 kHz līdz 10^6 kHz) labvēlīgi ietekmē cieto vielu ekstrakciju, piemēram, kristālisku vielu šķīšanu paātrina 5...20 reizi.

Ekstrakciju veicina *vibrācija* un *pulsācija*. Šīs hidromehāniskās svārstības paātrina ekstrakcijas procesu, palielina masas atvešanas koeficientu, likvidē «mirušās» joslas ekstraktorā. Uzskata, ka vibrācija ietekmē ekstrakciju spēcīgāk nekā pulsācija.

Ekstrakciju stimulē *elektriskais lauks*, kas izraisa svārstības plašā amplitūdu diapazonā. Tas veicina saskari starp fāzēm. Ekstrahējot varu no rūdām, elektromagnētiskais lauks paātrina procesu vairāk nekā 2 reizes. Elektromagnētisko lauku plaši lieto, ekstrahējot augu valsts izejvielas.

18. KRISTALIZĀCIJA NO ŠĶĪDUMIEM UN KAUSĒJUMIEM

18.1. KRISTALIZĀCIJAS PROCESA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS

Ķīmijas tehnoloģijā kristalizācija ir plaši izplatīts process. Kā pamatprocess tā ir sodas, minerālmēslu, cukura, vitamīnu, dažu organisko skābju, polimēru, plastmasu, silikātu rūpniecībā un citur, kā starpprocess — dažādās tehnoloģijas nozarēs.

Kristalizācija ir cietās fāzes izdališana no šķīdumiem vai kausējumiem. To bieži lieto, ja kāds maisījuma komponents jāizdala tīrā veidā. Tīru produktu iegūst, vielu atkārtoti šķīdinot un kristalizējot.

Ja vielām ir tuva kristālrežģa uzbūve un citas kristalogrāfiskās īpašības, tad tās no šķīdumiem izdalās *jauktu kristālu veidā*, piemēram, $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, $\text{NH}_4\text{Cr}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Šo parādību sauc par *izomorģismu*. Ja šķīdumā ir izomorfas vielas (pat ja vienai no tām ir niecīga koncentrācija), tad iegūt tīrus kristālus nav iespējams.

Kristalizācijas procesa pamatā ir cietās vielas ierobežota šķīdība. Tā atkarīga no vielas un šķīdinātāja īpašībām, no temperatūras un piemaisījumiem. Daudzām vielām šķīdība palielinās, paaugstinoties temperatūrai. Dažām vielām noteiktā temperatūrā šķīdība sasniedz maksimumu, un tālāka temperatūras paaugstināšana šķīdību samazina.

Cietā viela šķīdumā tik ilgi šķīst, līdz šķīdums kļūst piesātināts. Šāds šķīdums ir stabils. Var izveidoties arī pārsātināts šķīdums, kurā izšķīdušais vielas daudzums pārsniedz šķīdību attiecīgajā temperatūrā. Pārsātinātie šķīdumi ir nestabili. No tiem kristālu veidā izdalās virs piesātinājuma koncentrācijas izšķīdušais vielas daudzums, un atlikušais šķīdums kļūst piesātināts. Šķīdumu, kas satur kristālus, sauc par *atsālni*. Lai cieto vielu varētu izdalīt no šķīduma kristālu veidā, jāiegūst pārsātināts šķīdums.

Kristāli ir cieti, ķīmiski viendabīgi ķermeņi ar regulāru formu. Vienai un tai pašai vielai var būt dažāda veida un izmēra kristāli. Kristālu augšana atkarīga no šķīduma temperatūras un viskozitātes, un šajā procesā dažādas kristāla skaldnes var veidoties nevienmērīgi. Kristālrežģa uzbūve kristālu nevienmērīgas augšanas rezultātā nemainās, līdz ar to iegūtie kristāli ir izstiepti, plakani u. tml.

Dažādu vielu kristāli atšķiras pēc kristālrežģu uzbūves. Kristalogrāfijā visus kristālus iedala 7 sistēmās (singonijās), 32 klasēs (simetrijās) un 230 grupās. Katra kristālu forma ir pastāvīga noteiktā temperatūras un spiediena intervālā. Sasniedzot noteiktu robežu,

viena kristālu forma pāriet citā (*polimorfisms*). Kristālu formas maiņa saistīta ar siltumefektu. Katrai kristālu formai ir sava šķīdība, krāsa un citas īpašības. Ķīmijas tehnoloģijā cenšas iegūt noteiktas formas kristālus, tādēļ kristalizācijas procesam jārada noteikti apstākļi.

Kristālu formai un izmēriem liela nozīme kristalizācijas produkta tālākajā apstrādē (filtrēšanā, centrifūģēšanā, mazgāšanā, žāvēšanā u. c.). Viegļāk atdalāmi rupji kristāli. Sīkie kristāli viegļāk šķīst un ir tirāki par rupjajiem, jo rupjie kristāli satur atsālni ar tajā esošajiem piemaisījumiem. Lai produkts uzglabājot nesablīvotos, jācenšas iegūt vienāda lieluma kristālus. Sīku kristālu (putekļu) klātbūtne veicina produkta sablīvēšanos.

18.2. KRISTALIZĀCIJAS STATIKA

Kristalizācijas statika aplūko vielu šķīdību. Piesātinātā šķīdumā nevar veidoties kristāli, un viela tajā vairs nešķīst. Attiecīgā šķīduma koncentrāciju sauc par *piesātinājuma koncentrāciju* jeb *šķīdību*. Šķīdība atkarīga no temperatūras.

Kristalizāciju realizē *pārsātinātos šķīdumos*.

Šķīduma pārsātinājumu raksturo *absolūtais pārsātinājums* $C - C_0$; *relatīvais pārsātinājums* $(C - C_0)/C_0$ un *pārsātinājuma pakāpe* C/C_0 , kur C — pārsātinātā šķīduma koncentrācija; C_0 — piesātinātā šķīduma koncentrācija.

Ja $C/C_0 < 1$, tad šķīdums ir nepiesātināts; ja $C/C_0 > 1$, tad šķīdums ir pārsātināts. Piesātinātam šķīdumam $C/C_0 = 1$.

Kristalizācija (vai šķīšana) raksturojama ar siltumefektu, kas var būt pozitīvs vai negatīvs. Šo siltumefektu sauc par *kristalizācijas vai šķīšanas siltumu*.

Molekulas (atomi, joni), pārvietojoties no šķīduma uz kristāliem, kļūst mazāk kustīgas un zaudē daļu savas enerģijas, kas izdalās siltuma veidā. Bez tam molekulas pirms iekļaušanās kristālrežģī sarauj savas saites ar šķīdinātāja molekulām, patērējot *dēsolvatācijas enerģiju* (ūdens šķīdumos — *dehidratācijas enerģiju*). Atkarībā no tā, kuram procesam piemīt lielāka enerģija, summārais siltumefekts ir pozitīvs vai negatīvs.

Rokasgrāmatās kristalizācijas siltumu neuzrāda. Tehniskajiem aprēķiniem lieto šķīšanas siltumu, kas pēc skaitliskās vērtības atbilst kristalizācijas siltumefektam, tikai tam ir pretēja zīme.

Ja šķīdumā ir piemaisījumi, it īpaši, ja tie satur vienādus jonus, tad vielas šķīdība samazinās.

18.3. KRISTALIZĀCIJAS METODES

Kristalizācijai nepieciešamā pārsātinātā šķīduma iegūšanai bieži izmanto *šķīduma ietvaicēšanu*. Tā kā piesātināti šķīdumi virst nemainīgā temperatūrā, tad šādu kristalizācijas metodi sauc par *izotermisku kristalizāciju*.

Ja kristalizējamās vielas šķīdība samazinās, pazeminot temperatūru (piemēram, NH_4Cl , NaNO_3 , $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ u. c.), tad kristalizācija iespējama, *šķīdumu dzesējot*. Sāļu šķīdumiem (piemēram, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, KCl , $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ u. c.), kuriem šķīdība dzesējot vienmērīgi pazeminās, pārsātināta šķīduma iegūšanai efektīva ir kombinētā metode. Pēc šīs metodes karstu šķīdumu dzesē vakuumā, iztvaicējot daļu šķīdinātāja.

Kristalizāciju izdara arī ar *izsālīšanu*, t. i., piesātinātam šķīdumam pievieno piedevu, kas pazemina kristalizējamās vielas šķīdību vai ķīmiski saista šķīdinātāju. Viela, kuru lieto izsālīšanai, parasti satur tādu pašu jonu kā kristalizējamā viela. Izsālīšanai lietojamo vielu ieteicams ievadīt šķīduma veidā. Organisko šķīdinātāju piedeva neorganisko sāļu ūdens šķīdumiem ievērojami intensificē kristalizāciju. Taču šis paņēmieni ir ekonomiski neizdevīgi, jo šķīdinātāja reģenerācija padārdzina procesu. Organisko vielu tehnoloģijā kristalizācijai no organiskajiem šķīdinātājiem par izsālītāju bieži lieto ūdeni, kas samazina kristalizējamās vielas šķīdību.

Dažās rūpniecības nozarēs šķīduma pārsātinājumu panāk *ķīmiskas reakcijas* rezultātā, piemēram, NaHCO_3 ieguve sodas rūpniecībā.

18.4. KRISTALIZĀCIJAS PROCESA MATERIĀLĀ BILANCE UN SILTUMA BILANCE

Izmantojot kristalizācijas procesa materiālo bilanci, var aprēķināt kristalizatora ražīgumu, bet, izmantojot siltuma bilanci, var noteikt aizvadāmo vai pievadāmo siltuma plūsmu.

Materiālo bilanci kristalizācijas beigu posmam izsaka vienādojums (nepārtrauktai kristalizācijai):

$$G_1 = G_2 + G_k + U, \quad (18.1)$$

kur G_1 , G_2 un G_k — sākuma šķīduma, atsālņa un kristālu masa sekundē, kg/s; U — sekundē iztvaicētā šķīdinātāja masa, kg/s.

Ja ar x_1 un x_2 apzīmē kristalizējamās vielas koncentrāciju masas daļās sākuma šķīdumam un atsālņim, tad materiālās bilances vienādojums attiecībā uz bezūdens produktu ir šāds:

$$G_1 x_1 = G_2 x_2 + G_k. \quad (18.2)$$

Ja veidojas kristālhidrāts, tad uz 1 kg kristālhidrāta bezūdens vielas koncentrācija ir $x_k = \frac{M}{M_{kh}}$, kur M — bezūdens vielas molmasa, kg/mol; M_{kh} — kristālhidrāta molmasa, kg/mol. Materiālās bilances vienādojums attiecībā uz bezūdens produktu, veidojoties kristālhidrātam, ir šāds:

$$G_1 x_1 = G_2 x_2 + G_k x_k. \quad (18.3)$$

No vienādojumiem (18.1) un (18.3) kristālu iznākums

$$G_k = \frac{G_1(x_2 - x_1) - U x_2}{x_2 - x_k}.$$

Ja kristalizāciju realizē, šķīdumu dzesējot, tad $U=0$ un

$$G_k = \frac{G_1(x_2 - x_1)}{x_2 - x_k}$$

Ja zināma ievadītā un izvadītā siltuma plūsma, kristalizācijas procesam ar daļēju šķīdinātāja aizvadišanu un dzesēšanu siltuma bilanci sastāda šādi.

Ievadītā siltuma plūsma: 1) ar sākuma šķīdumu $G_1 c_1 t_1$; 2) ar siltuma plūsmu $G_k r_k$, kas izdalās kristalizācijā.

Izvadītā siltuma plūsma: 1) ar atsālni $G_2 c_2 t_2$; 2) ar kristāliem $G_k c_k t_2$; 3) ar aizvadīto šķīdinātāju Uh ; 4) ar dzesējošo šķīdumu Φ .
No siltuma bilances iegūst, ka

$$G_1 c_1 t_1 + G_k r_k = G_2 c_2 t_2 + G_k c_k t_2 + Uh + \Phi, \quad (18.4)$$

kur c_1 , c_2 un c_k — sākuma šķīduma, atsālņa un kristālu īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K); t_1 , t_2 — ievadāmā un izvadāmā šķīduma temperatūra, °C; r_k — kristalizācijas siltums, J/kg kristālu; h — šķīdinātāja tvaika entalpija, J/kg; Φ — ar dzesējošo šķīdumu sekundē aizvadītā siltuma plūsma, W.

Ja sākuma šķīdumu uzskata par maisījumu, kas sastāv no atsālņa, kristāliem un iztvaicētā ūdens (šķīdinātāja), tad var uzrakstīt, ka, uzsildot maisījumu līdz temperatūrai t_2 , sākuma šķīduma entalpija ir

$$G_1 c_1 t_2 = G_2 c_2 t_2 + G_k c_k t_2 + U c_0 t_2, \quad (18.5)$$

kur c_0 — ūdens (šķīdinātāja) īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K).

No vienādojumiem (18.4) un (18.5) iegūst

$$G_1 c_1 (t_1 - t_2) + G_k r_k = U(h - c_0 t_2) + \Phi. \quad (18.6)$$

Vienādojuma loceklis $G_1 c_1 (t_1 - t_2)$ atbilst siltuma plūsmai, kuru atņem, šķīdumu dzesējot, loceklis $U(h - c_0 t_2)$ — siltuma plūsmai, ko patērē ūdens (šķīdinātāja) iztvaicēšanai. Ja $U=0$ (kristalizācija bez šķīdinātāja aizvadišanas), tad visu siltumu aizvada dzesējošais agents.

Vakuumskristalizatoros $\Phi=0$, un siltuma bilances vienādojums (18.6) izsakāms šādi:

$$G_1 c_1 (t_1 - t_2) + G_k r_k = U(h - c_0 t_2),$$

t. i., iztvaicēšanai patērē visu siltumu, kuru atdod šķīdums un kurš atbrīvojas kristalizācijas procesā.

Dzesējošā aģenta patēriņu G_{dz} aprēķina no vienādojuma (18.4), iegūstot atņemamo siltuma plūsmu $\Phi = G_1 c_1 t_1 + G_k (r_k - c_k t_2) - G_2 c_2 t_2 - Uh$, tad

$$G_{dz} = \frac{\Phi}{c_{dz}(t'' - t')},$$

kur G_{dz} — dzesējošā aģenta patēriņš, kg/s; c_{dz} — dzesējošā aģenta īpatnējā siltumietilpība, J/(kg·K); t' , t'' — dzesējošā aģenta sākuma un beigu temperatūra.

18.5. KRISTALIZĀCIJAS KINĒTIKAS PAMATI

Kristalizācijas kinētika aplūko *kristālu aizmetņu* (kristalizācijas centru) rašanos un kristālu augšanu.

Kristālu aizmetņu rašanās. Kristalizācija sākas, veidojoties kristālu aizmetņiem — sīkiem kristāliņiem, kas sastāv no elementārām kristālrežģa šūniņām. Lai veidotos augtspējīgs aizmetnis, nepieciešami labvēlīgi apstākļi — šķīdumā jābūt lokāliem molekulu grupējumiem ar noteiktu orientāciju telpā. Sos apstākļus nosaka temperatūra un šķīduma pārsātinājums.

Kristālu aizmetņiem eksistē tādi kritiskie izmēri, kad aizmetņi spējīgi augt. Ja aizmetņi ir nēcīgi, tie sabrūk atsevišķās molekulās, turpretī, ja tie sasnieguši kritiskos izmērus, tie sāk augt. Katram augtspējīgam aizmetnim atbilst noteikts šķīduma pārsātinājums. Jaunu aizmetņu rašanās novēršama, pazeminot šķīduma pārsātinājumu.

Šķīduma pārsātinājums ir kristalizācijas procesa virzošais spēks.

Pārsātināts šķīdums ir termodinamiski nestabila sistēma. Laiku no pārsātināta šķīduma rašanās brīža līdz kristālu veidošanās sākumam sauc par *indukcijas (latento) periodu*. Sajā periodā veidojas aizmetņi. Jo lielāks šķīduma pārsātinājums, jo īsāks indukcijas periods un sīkāki aizmetņi. Indukcijas periodu ietekmē arī šķīduma temperatūra. Paaugstinoties temperatūrai, aizmetņu rašanās pastiprinās. Aizmetņu rašanos veicina arī šķīduma strauja dzesēšana un mehāniska iedarbība uz to: maisīšana, vibrācija, ultraskaņa, šķīduma plūsmas u. c.

Kristalizācijas centru rašanos ievērojami (desmitkārt, simtkārt) veicina mehāniskie piemaisījumi, it īpaši kristalizējošās vielas sīki kristāliņi, vai arī tai izomorfi un polimorfi kristāliņi, kas ievadīti šajā šķīdumā. Kristālu augšanas laikā var rasties jauni kristalizācijas centri. Tas nav vēlams, jo tad veidojas polidisperss produkts. Produktu ar lielu skaitu sīko kristālu iegūst tad, ja aizmetņu rašanās notiek straujāk nekā kristālu augšana. Mainot kristalizācijas režīmu (šķīduma temperatūru, koncentrāciju u. c.), var iegūt produktu ar vēlamu kristālu rupjumu. Lēna dzesēšana, šķīduma miera stāvoklis, zema temperatūra, liela kristālu molmasa veicina rupju kristālu veidošanos.

Vieglāk kristalizējas pēc ķīmiskās uzbūves vienkāršākie savienojumi — tādi savienojumi, kas nesavienojas ar šķīdinātāju (NaCl, KCl, NaNO₃ u. c.). Kristalizāciju apgrūtināta hidratācija, t. i., ūdens (šķīdinātāja) molekulu pievienošanās kristalizējamai vielai (MgSO₄·7H₂O, Al₂(SO₄)₃·18H₂O u. c.). Kristālhidrātos pievienoto ūdens (šķīdinātāja) molekulu skaits uz vienu molekulu kristalizējamās vielas ir dažāds atkarībā no temperatūras un koncentrācijas.

Kristālu augšanas ātrums. Kristāla lineāro izmēru maiņa laikā (vai tā masas pieaugums laikā) ir galvenais kristāla augšanas rādītājs.

Pastāv vairākas kristālu augšanas teorijas: termodinamiskā, difūzijas, molekulāri kinētiskā, dislokācijas teorija.

Pēc molekulāri kinētiskās teorijas kristālu augšana notiek pa slāņiem lēcienvēidīgi. Kristālu augšana saistīta ar savstarpēju vides un kristāla struktūras iedarbību. Liela ietekme uz kristālu augšanu ir šķīduma pārsātinājumam. Samazinoties pārsātinājumam, kristāli aug lēnāk. Ļoti liela pārsātinājuma ietekmē var izmainīties kristālu ārējā forma.

Kristālu augšanas ātrumu var izteikt ar Fika likumu:

$$dm/d\tau = (D/\delta)(C - C_0)S = k(C - C_0)S, \quad (18.7)$$

kur dm — izdalītā vielas masa uz kristālu virsmas S bezgalīgi īsā laika sprīdī $d\tau$; δ — kristāla virsmai piegulošās nekustīgās šķīduma robežkārtas biezums; D — difūzijas koeficients; k — masas pārejas koeficients; C — šķīduma vidējā koncentrācija; C_0 — pārsātinātā šķīduma koncentrācija uz kristāla virsmas.

Pētot kristālu augšanas ātrumu, daži pētnieki atklājuši, ka kristālu augšanas ātrums ar pārsātinājumu ir saistīts nevis lineārā attiecībā, bet kvadrātiskā, t. i.,

$$dm/d\tau \sim (C - C_0)^2.$$

Ievērojot pētījumu apstākļus, kādos iegūta šī sakarība, kopējo kristalizācijas procesa kinētiku (nevis kristālu augšanas ātrumu), t. i., ātrumu, ar kādu viela izdalās no šķīduma, var aprēķināt pēc vienādojuma

$$dm/d\tau = k(C - C_0)^n S, \quad (18.8)$$

kur $n = 1 \dots 2$.

No vienādojuma (18.8) redzams, ka kristalizējusies vielas masa atkarīga no kristālu kopējās virsmas. Rūpnieciskās iekārtās kristālu virsma sasniedz vairākus tūkstošus kvadrātmetru, piemēram, ja cukura kristāliņa masa 0,0001 g, tad 100 kg šādu kristālu virsma ir 890 m². Ja vakuumietvaicētājā ir 20 t šķīduma, kurā ir 30% kristālu, tad kristālu kopējā virsma $S = \frac{20\,000}{100} \cdot 0,3 \cdot 890 = 53\,400$ m².

Kristalizācijas ātrumu nosaka arī koncentrāciju starpība $C - C_0$, kurai jābūt tādai, lai pārsātinājuma pārākums neizraisītu jaunu kristalizācijas centru rašanos.

Kristalizācijas process saistīts ar siltumefektu. Kristalizācija bieži vien ir eksotermisks process. Kristalizācijas siltums atkarīgs no temperatūras un spiediena.

Kristalizācijas apstākļu ietekme uz procesa ātrumu un kristālu formu. Kristalizācijas procesu ietekmē vides pārsātinājums, maisīšana, temperatūra un izšķīdušie piemaisījumi.

Pareizas formas kristālu rašanās atkarīga no šķīduma pārsātinājuma. Ļoti lielā pārsātinājumā mainās kristālu ārējais veids. Kristālu skaldnes var pārklāties ar sīkiem kristāliņiem. Pieaug kristālu virsotņu augšanas ātrums salīdzinājumā ar skaldņu un šķautņu augšanas ātrumu un veidojas *dendritu kristāli*.

Maisīšana atvieglo difūziju kristalizācijas laikā, tādēļ tā veicina kristalizāciju, bet tikai līdz noteiktam maisītāja apgriezīenu skaitam.

Apgriezienu skaita tālāka palielināšana bremzē kristālu augšanu, jo noskalo no kristālu virsmas to uzbūvei nepieciešamās vielas. Maisīšana ievērojami ietekmē kristālu ārējo formu. Šķīdumu maisot, nerodas kristālu drūzas.

Kristālu augšanas ātrumu ievērojami ietekmē šķīduma temperatūras paaugstināšana. Paaugstinot temperatūru, difūzija paātrinās (pieaug difūzijas koeficients D , sk. vienādojumu (18.7)) un samazinās robežkārtas biezums δ , jo samazinās šķīduma viskozitāte. Paaugstinot temperatūru, parasti pieaug arī vielas koncentrācija pārsātinātā šķīdumā. Atkarībā no kristalizācijas temperatūras mainās arī kristālu forma. Augstās temperatūrās bieži rodas adatveida kristāli.

Necīgi piemaisījumu daudzumi, it īpaši organiskie savienojumi un Fe^{3+} , Al^{3+} un Cr^{3+} joni ievērojami ietekmē kristalizāciju. Piemaisījumu klātbūtnē var mainīties kristālu forma (skaldnes neaug ar vienādu ātrumu), krāsa, viendabīgums u. c.

Kristalizāciju un kristālu formu ietekmē arī vides pH.

18.6. KRISTALIZATORU VEIDI UN LIETOŠANA

Kristalizāciju realizē periodiskas un nepārtrauktas darbības iekārtās. Nepārtrauktas darbības iekārtās process ir intensīvāks, veidojas vienādi kristāli un iekārtas vieglāk apkalpojamās.

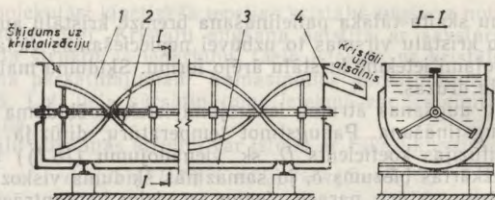
Periodiskas darbības kristalizatorus lieto maziem ražīgumiem (līdz dažī desmiti kilogramu kristālu stundā). Nepārtrauktas darbības kristalizatoru ražīgums ir ievērojami lielāks (daži simti līdz dažī tūkstoši kilogramu kristālu stundā).

Kristalizatori, kuros šķīdumu dzesē. Rūpniecībā kristalizatoros par dzesējošiem aģentiem lieto ūdeni un gaisu. Ja, dzesējot ar ūdeni, nevar iegūt pietiekami zemu temperatūru, tad jālieto dzesējošie šķīdumi.

Kristalizācija var sākties jau ietvaicētājos (cukura rūpniecībā), no kuriem pēc vajadzīgās koncentrācijas sasniegšanas kristālus saturošo šķīdumu aizvada uz kristalizatoriem, kas parasti ir apgādāti ar ūdens dzesēšanu un maisītāju.

Kristalizators ar maisītāju un dzesinātāju sastāv no hermētiski noslēgtas cilindriskas tvertnes ar konisku dibenu. Tvertnē ievietots maisītājs. Dzesēšanai izmanto ūdeni vai dzesējošu šķīdumu, kas plūst pa glodeni. Kristālus kopā ar atsālni izvada no kristalizatora apakšas. Lai aizkavētu kristālu sakrāšanos uz dzesējošās virsmas (pasliktinās siltuma apmaiņu), kristalizatoram izgatavo dzesējošu apvalku. Maisītāja lāpstiņām piestiprina skrāpjus vai suku. Nepārtrauktas darbības nodrošināšanai savieno virknē vairākus šādus kristalizatorus.

Valējs kristalizators ar maisītāju un dzesēšanu parādīts 18.1. attēlā. Tas sastāv no valējas siles 1, kuras garums līdz 12 m un plātums 0,6 m un kurai ir apvalks 3 dzesēšanai ar ūdeni vai dzesējošu šķīdumu. Silē ievietots horizontāls maisītājs 2, kura apgriezienu skaits ir neliels. Šādos kristalizatoros dzesēšanas uzlabošanai



18.1. att. Vaļējs kristalizators ar maisītāju un dzesēšanu.

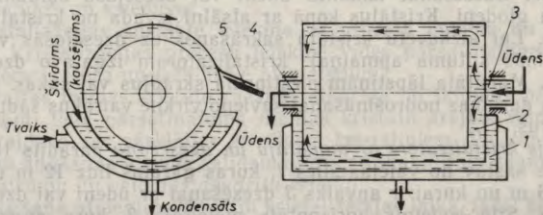
dažreiz dzesē arī maisītāju, kurš ir dobts. Kristalizējamo šķidumu ievada siles vienā galā. Tam plūstot uz kristalizatora otru galu, notiek vairāki procesi: šķiduma dzesēšana, kristālu aizmetņu rašanās un kristālu augšana. Dzesējošo aģentu ievada apvalkā, ievērojot pretplūsmas principu. No siles pretējā gala 4 izvada kristālus kopā ar atsālni. Ja vajadzīgs, tad šādus kristalizatorus savieno virknē.

Šķidumu maisot, kristāli nevar nosēties uz dzesējošās virsmas un atrodas peldošā stāvoklī. Šādā kristalizācijas režīmā veidojas vienāda izmēra kristāli.

Rotējošais kristalizators ar ūdens dzesēšanu parādīts 18.2. attēlā. Šādu kristalizatoru lieto kristalizēšanai no kausējumiem, piemēram, iegūstot amonija nitrātu. Izkausēto produktu nepārtraukti ievada apsildāmā silē 1, kurā iegremdēts rotējošs cilindrs 2 (apgriezienu skaits $0,06 \text{ s}^{-1}$ jeb $3,5 \text{ apgr./min.}$). Cilindru no iekšpuses dzesē, pievadot ūdeni pa dobās vārpstas 3 vienu galu. Pa vārpstu 4 ūdens aizplūst no iekārtas. Kristālus no cilindra virsmas noņem nazis 5. So kristalizatoru trūkums — rodas sīki kristāli.

Kristalizatoriem ar dzesēšanu ražīgumu galvenokārt ietekmē kristalizējamā šķiduma temperatūra. Jo tā augstāka, jo labāka siltuma apmaiņa un lielāks kristalizatora ražīgums.

Vienkāršākie un senākie kristalizatori ir *stacionārie kristalizatori*, kuros šķidums atrodas miera stāvoklī. Stacionārie kristalizatori ir taisnstūrveida tvertnes, kuru tilpums līdz 10 m^3 . Šajās tvertnēs ielej karstu šķidumu, kas dziestot daļēji iztvaiko. Šķidumam miera stāvoklī lēni dziestot, rodas maz kristalizācijas centru, tādēļ izaug



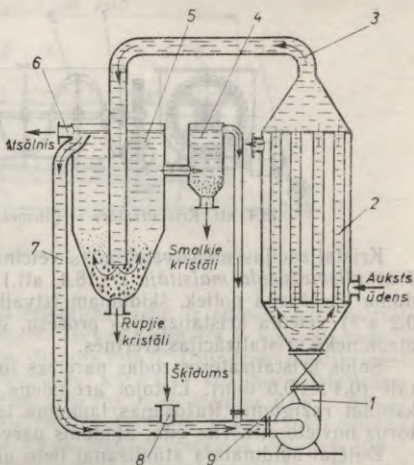
18.2. att. Rotējošais kristalizators ar ūdens dzesēšanu.

lieli savstarpēji saauguši kristāli. Lai iegūtu lielāku daudzumu tīra produkta un to vieglāk būtu izkraut, kristalizatorā ievieto vertikālus metāla stieņus vai lentes, kas apaug ar tīriem kristāliem.

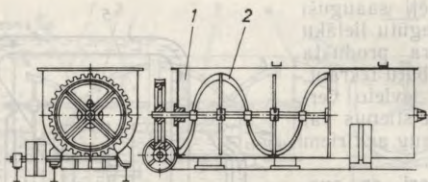
Kristalizatori ar suspendētu kristālu slāni.

Kristalizators ar suspendētu kristālu slāni paredzēts rupjkristāliska un izmēru ziņā viendabīga produkta iegūšanai. Šajā kristalizatorā var regulēt iegūstamo kristālu izmērus. Šāds kristalizators ar dzesēšanu redzams 18.3. attēlā. Tas sastāv no rupjo kristālu nostādinātāja 5, dzesinātāja 2, cirkulācijas sūkņa 1 un cirkulācijas caurulēm 3 un 7. Karsto koncentrēto šķidrumu ieveda pa cauruli 8 cirkulācijas caurulē 7, kur tas sajaucas ar atsālni. Plūstot cauri dzesinātājam 2, šķidums atdziest, iegūstot nelielu pārsātinājumu ($1 \dots 3 \text{ kg/m}^3$). Pārsātinātais šķidums pa cauruli 3 nokļūst rupjo kristālu nostādinātājā un plūst uz augšu, uzturot augošos kristālus suspendētā stāvoklī. Nepieciešamo ātrumu nostādinātājā 5 regulē ar ventili 9. Daļu atsālņa aizvada no aparāta augšas pa cauruli 6, bet lielākā daļa aizplūst atpakaļ cirkulācijas caurulē 7, un process atkārtojas. Kristālu klasifikācijai izmanto smalko kristālu nostādinātāju 4. Šim kristalizatoram paredzēta arī dzesinātāja atbrīvošana no kristālu kārtas, kas izveidojas uz dzesējošās virsmas. To panāk ar skalošanu vai sildīšanu (18.3. attēlā nav parādīts).

Kristalizatori ar daļēju šķīdinātāja atdalīšanu. Daļēju šķīdinātāja atdalīšanu no šķiduma var izdarīt divējādi: ietvaicējot šķidumu viršanas temperatūrā vai ietvaicējot daļu šķīdinātāja temperatūrā, kas ievērojami zemāka par šķiduma viršanas temperatūru. Ietvaicējot šķidumus kristalizācijai, nedrīkst pārsniegt katrai vielai noteiktu šķiduma koncentrāciju. Šķidumus ne vienmēr drīkst ietvaicēt līdz piesātinājumam, jo, ievadot šādus šķidumus kristalizatoros, rodas daudz kristālu aizmetņu un iegūst ļoti sīkus kristālus. Koncentrēti šķidumi kristalizatoros var pat sacietēt. Ietvaicējot šķīdinātāju atmosfēras spiedienā, kristalizācija noris lēni un iegūst rupjus kristālus.



18.3. att. Kristalizators ar suspendētu kristālu slāni.



18.4. att. Kristalizators ar gliemežveida maisītāju.

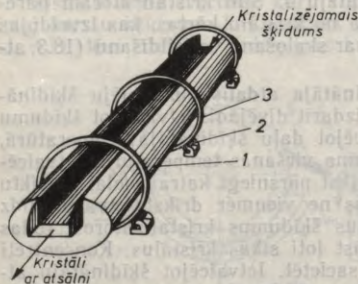
Kristalizācijas un ietvaicēšanas veicināšanai lieto *kristalizatorus 1 ar gliemežveida maisītāju 2* (18.4. att.). Sajos kristalizatoros šķīduma dzesēšana notiek, šķīdumam iztvaikojot. Maisīšana (aptuveni $0,2 \text{ s}^{-1}$) veicina kristalizācijas procesu, un tas notiek 6...7 reizes ātrāk nekā kristalizācijas tvertnēs.

Sajos kristalizatoros rodas pareizas formas vienāda izmēra kristāli (0,4...0,6 mm). Lietojot arī ūdens dzesēšanu, var ievērojami kāpināt ražīgumu. Ražošanas laukuma taupīšanai šādus kristalizatorus novieto citu virs cita. Šķīdums pārvietojas pašplūsmā.

Daļēji šķīdinātāja atdalīšanai lieto arī *torņveida kristalizatorus* (kalcija nitrāta ieguvei). Sajos kristalizatoros līdz zināmā temperatūrai atdzesētu šķīdumu iesmidzina plašā telpā (torņi), kurā, plieņiem iztvaikojot, notiek šķīduma tālāka dzesēšana un cietās fāzes kristalizācija. Atsālnis ar kristāliem saplūst torņa apakšējā daļā, no kuras tos ar sūkni aizvada uz tālāko apstrādi (centrifugēšanu vai filtrēšanu).

Kristalizatori ar daļēju šķīdinātāja atdalīšanu ir arī *šūpu kristalizatori* un *cilindriskie kristalizatori*.

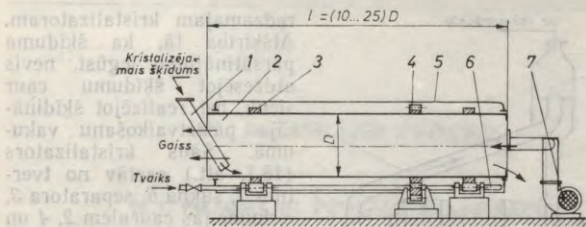
Šūpu kristalizators parādīts 18.5. attēlā. Šāds kristalizators sastāv no seklas, slīpi novietotas siles 1, kura piestiprināta bandžām 3, kas balstās uz rulliņiem 2. Speciāls mehānisms (attēlā nav



18.5. att. Šūpu kristalizatora shēma.

redzams) kristalizatoram piešķir nepārtrauktu šūpojošu kustību. Kristalizējamo šķīdumu ievada siles vienā galā, bet pa pretējo galu izvada kristālus kopā ar atsālni.

Šūpu kristalizatoros iegūst lielus pareizas formas kristālus ar izmēru 3...25 mm. Kristāliem pārvietojoties pa siles dibenu, tie nesaauģ kopā. Nav novērojama arī berze starp kristāliem, līdz ar to nav sīko frakciju. Lēni dzesējot, uz kristalizatora sienām neveidojas inkrustācijas kārtā.



18.6. att. Cilindriskā kristalizatora shēma.

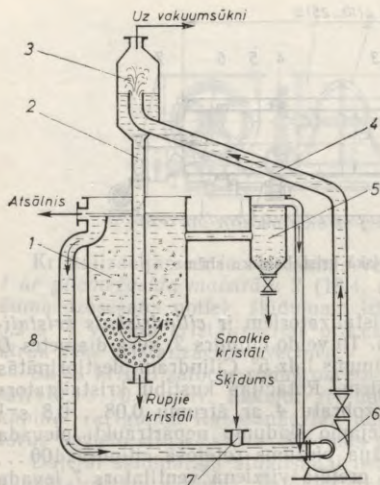
Viens no efektīvākajiem kristalizatoriem ir *cilindriskais kristalizators*, kas parādīts 18.6. attēlā. To veido cilindrs 2, kura diametrs D ir 800, 1000 vai 1200 mm un slīpums līdz 5° . Cilindram piestiprinātās bandžas 3 balstās uz rulliņiem. Rotācijas kustību kristalizators iegūst no dzinēja, kas griež zobratu 4 ar ātrumu $0,08 \dots 0,8 \text{ s}^{-1}$ ($5 \dots 50 \text{ apgr./min}$). Kristalizējamo šķidumu nepārtraukti pievada pa cauruļvadu 1. Šķiduma slāņa biezums rotējošā cilindrā $100 \dots 200 \text{ mm}$. Šķiduma plūsmai pretējā virzienā ventilators 7 ievada gaisu ($0,7 \dots 1,7 \text{ m}^3/\text{s}$), kuram ir apkārtējās vides temperatūra. Gaisa aizvada no kristalizatora šķīdinātāja tvaikus un veicina iztvaikošanu. Siltuma zudumu samazināšanai rotējošais cilindrs ieslēgts apvalkā 5 vai arī to ietver izolācijas kārtā. Lai novērstu kristālu augšanu uz cilindra sienas, kristalizatoru no apakšas silda ar tvaiku, kuru ievada caurulēs 6. Kristālus ar atsālni izvada pa cilindra zemāk novietoto galu. Rotējošo cilindru var arī dzesēt, aprasinot to ar ūdeni. Dzesējošais ūdens saplūst zem cilindra esošā kolektorā — silē, no kuras to aizvada.

Cilindriskos kristalizatorus ar gaisa dzesēšanu plaši lieto ķīmiskajā rūpniecībā. To ražīgums atkarīgs no gaisa temperatūras un relatīvā mitruma. Šajos kristalizatoros iegūst rupjus kristālus. Cilindra augšējā daļā rodas inkrustācijas kārtā, tādēļ iekārta bieži jātīra.

Vakuump kristalizatori. Daudz efektīvāki par aprakstītajiem kristalizatoriem ir vakuump kristalizatori. Vakuump kristalizatoros pazemina šķidumu viršanas temperatūru un šķīdinātājs iztvaiko. Šķīdinātāja iztvaicēšanai patērē šķiduma fizikālo siltumu, atdzesējot šķidumu līdz viršanas temperatūrai attiecīgā spiedienā. Šādos kristalizatoros mazāk iespējama inkrustācijas kārtas rašanās uz sienām, jo šķīdums virst nevis uz sienām, bet tā centrā.

Vakuump kristalizatoriem ir liels ražīgums. Tos ieteicams lietot vielām, kuru šķīdība maz mainās, temperatūrai pazeminoties. Tvaika kondensēšanai lieto virsmas vai saplūdes kondensatorus. Vakuuma radīšanai visbiežāk izmanto tvaika ežektorus.

Rupju kristālu ($1 \dots 2 \text{ mm}$) iegūšanai lieto vakuump kristalizatorus ar suspendētu kristālu slāni. Tas darbojas analogiski 18.3. attēlā



187. att. Vakuumkristalizators ar suspendētu kristālu slāni.

redzamajam kristalizatoram. Atšķirība tā, ka šķīduma pārsātinājumu iegūst, nevis atdzesējot šķīdumu caur sienu, bet realizējot šķīdinātāja pašiztvaikošanu vakuumā. Sāds kristalizators (18.7. att.) sastāv no tvertnes 1, sūkņa 6, separatora 3, cirkulācijas caurulēm 2, 4 un 8 un nostādinātāja 5 sīku kristālu nodalīšanai. Karsto koncentrēto šķīdumu pa pievadu 7 ievada kristalizatorā un kopā ar atsālni sūknis 6 to aizvada uz separatoru 3, kur šķīdums ietvaicējas. Pārsātinātais šķīdums pa cauruli 2 nokļūst tvertnē 1, kur notiek kristalizēšanās. Tālāk process atkārtojas.

Sādi vakuumkristalizatori ir ar atklātu vai slēgtu tvertni. Slēgtie vakuumkristalizatori ir vieglāk apkalpojami, separatorā nerodas inkrustācijas

kārtas, un tos var lietot indīgu šķīdumu kristalizēšanai.

Ražīguma palielināšanai izmanto vairāpkāpju vakuumkristalizatorus. Šāda iekārta sastāv no vairākiem virknē saslēgtiem kristalizatoriem. Viszemākais vakuums ir pirmajā, bet visaugstākais — pēdējā kristalizatorā. Šķīduma temperatūras pazemināšanās un vakuuma paaugstināšanās virzieni sakrīt. Šķīduma pārvietošanos no viena kristalizatora uz otru nodrošina spiedienu starpība. Šādas iekārtas darbojas nepārtraukti, un to ražīgums ir liels. Attiecībā uz vakuumkristalizatoriem var pieņemt, ka stundā no 1 m² šķīduma virsmas iztvaiko 150 kg ūdens.

Dzesējošās virsmas tīrība. Dzesējošā virsma periodiski jāatbrīvo no inkrustācijas (nogulumu) kārtas. Inkrustācijas kārtas veidošanos uz kristalizatora virsmām kavē pulētas virsmas, mehāniskie vibratori un ultraskaņa. Lietojot ultraskaņu, iegūst ļoti sīkus kristālus. Agresīviem šķīdumiem pulētu virsmu vietā ieteicams lietot emaljētas virsmas.

Nemainīga temperatūru starpība starp šķīdumu un dzesējošo virsmu (vēlams, lai tā nebūtu lielāka par 8...10°C) kavē inkrustācijas kārtas veidošanos.

19. MEMBRĀNU PROCESI

19.1. MEMBRĀNU PROCESU KLASIFIKĀCIJA

Membrānu procesi norisinās pēc šādām shēmām: *gāzu A+B maisījums—membrāna—gāze A*; *vielu A+B šķīdums—membrāna—šķidrums A un vielu A+B šķīdums—membrāna—tvaiks A* (ietvaice caur membrānu).

Ķīmiskajā rūpniecībā izmantojamie membrānu procesi ir šādi: *dialīze, pseidodialīze, osmoze, atgriezeniskā osmoze, ultrafiltrācija, elektrodialīze, elektroosmoze, elektroosmofiltrācija, iztvaicēšana caur membrānu, gāzu maisījumu difūzā sadalīšana un mikrofiltrācija.*

Dialīze. Ja starp divām šķidrām vidēm novieto *puscaurlaidīgu plēvi* jeb *membrānu*, tad, nepalielinot spiedienu, novērojama izšķīdinātās vielas pārvietošanās caur membrānu. Šo procesu sauc par *dialīzi*. Izšķīdinātā viela dialīzē pārvietojas no augstākas koncentrācijas uz zemāku. Dialīze ir difūzijas process. Šķīduma sadalīšana dialīzē izskaidrojama ar komponentu dažādu difūzijas ātrumu, tiem difundējot caur membrānu.

Pseudodialīze. Ja rada spiedienu starpību membrānas abās pusēs, caur membrānu izplūst izšķīdinātā viela (nevis šķīdinātājs). Šādu procesu sauc par *pseudodialīzi*. Pseudodialīzi lieto ūdens atsāļošanai. Caur membrānu difundē ūdeni izšķīdušie sāļi.

Osmoze. Osmoze ir difūzijas process, kurā caur membrānu difundē tikai šķīdinātājs. Osmoze notiek tikai vienā virzienā — no zemākas koncentrācijas uz augstāku. Piemēram, ja membrānas vienā pusē ir tīrs ūdens, bet otrā — vielas ūdens šķīdums, tad osmozes gadījumā ūdens molekulas difundē caur membrānu un iekļūst šķīdumā, bet pretējā virzienā — no šķīduma ūdens nepārvietojas. Šķīduma tilpums, ūdenim pieplūstot, palielinās. Ja telpa, kurā atrodas šķīdums, ir ierobežota, tad spiediens šajā telpā paaugstinās līdz noteiktam lielumam, kas atkarīgs no temperatūras un šķīduma koncentrācijas. Šo spiedienu sauc par *osmotisko spiedienu*. Osmozes procesā virzošais spēks ir osmotiskais spiediens.

Osmotisko spiedienu π var aprēķināt pēc Vant Hofa vienādojuma: $\pi = \alpha RTC$, kur α — osmotiskais koeficients; R — gāzu konstante; T — temperatūra; C — pārejošā komponenta koncentrācija.

Atgriezeniskā osmoze. Ja spiediens tajā membrānas pusē, kur atrodas šķīdums, pārsniedz osmotisko spiedienu, tad ūdens (šķīdinātājs) pāriet no augstākas koncentrācijas uz zemāku. To sauc par *atgriezenisko osmozi*. Atgriezeniskajā osmozē virzošais spēks ir starpība starp darba spiedienu un osmotisko spiedienu. Piemēram, atsā-

lojot jūras ūdeni, kurā sāļu koncentrācija 3,5%, osmotiskais spiediens ir 2,5 MPa, bet darba spiediens — 5...8 MPa.

Ultrafiltrācija. Ultrafiltrāciju lieto šķidumu atdalīšanai, frakcionēšanai un koncentrēšanai. Ultrafiltrācija notiek spiediena ietekmē, parasti spiediens 0,3...1,0 MPa. Tas arī ir procesa virzošais spēks.

Atkarībā no vajadzības ultrafiltrācijas membrānas laiž caur 1) šķīdinātāju vai mazmolekulārus savienojumus (atdalot tos no lielmolekulāriem savienojumiem); 2) šķīdinātāju un noteiktas lielmolekulāro vielu frakcijas (frakcionējot lielmolekulārās vielas); 3) tikai šķīdinātāju (koncentrējot lielmolekulārās vielas).

Ultrafiltrāciju var lietot, ja molekulu vai koloīdo daļiņu izmēri ir mazāki par 1...20 nm.

Elektrodialīze. Elektrodialīzē izšķīdinātās vielas joni plūst caur membrānu elektriskā lauka iedarbībā. Virzošais spēks elektrodialīzē ir elektriskā potenciāla un koncentrācijas gradienti. Elektrodialīzi lieto elektrolītu sadalīšanai vai koncentrēšanai. Izšķīdušās vielas pāreja caur membrānu var būt virzīta uz abām pusēm atkarībā no konkrētiem apstākļiem.

Elektroosmoze. Elektroosmoze ir šķīdinātāja (nevis izšķīdinātās vielas) pāreja caur membrānu elektriskā lauka ietekmē, nepaaugstinot spiedienu iekārtā.

Elektroosmofiltrācija. Elektroosmofiltrācijai lieto atgriezeniskās osmozes membrānas, kurām pievada elektrisko strāvu. Procesam ir divi virzošie spēki — spiediena un elektriskā potenciāla gradienti.

Elektroosmofiltrācijā anjoni plūst caur pozitīvi lādēto membrānu, bet katjoni — caur negatīvi lādēto membrānu. Ja šķīdumā ir viēnāda lādiņa joni, tad caur membrānu vispirms plūst tie joni, kam mazāks hidratācijas siltums, pie tam tie plūst ātrāk nekā atgriezeniskajā osmozē.

Iztvaicēšana caur membrānu. Membrānu procesus, kas notiek šķidrās fāzes un tvaika fāzes klātbūtnē, sauc par iztvaicēšanu caur membrānu. Iztvaicēšana caur membrānu ietver sevī selektīvu šķidrā maisījuma sorbciju membrānā, selektīvu difūziju (plūsmu) caur membrānu un desorbciju tvaika veidā. Uzskata, ka membrānā ir divas fāzes — šķidrā fāze tuvāk membrānas virsmai šķidrums pusē un tvaika fāze tuvāk membrānas virsmai pretējā pusē. Tvaika fāze vielas molekulu caurplūdei rada lielāko pretestību.

Gāzu maisījumu difūzā sadalīšana. Šajā nolūkā lieto mikroporainas membrānas ar poru izmēriem, kas ievērojami mazāki par difundējošo molekulu brīvā noskrējiena garumu. Jāuztur pēc iespējas augstāka temperatūra un zemāks spiediens. Lieto polimēru membrānas un membrānas ar cietu struktūru (metāla, stikla u. c.).

Mikrofiltrācija. Pēdējos gados rūpniecībā šķidumu sadalīšanai, kuros daļiņu izmēri 0,02...10 μm, izmanto mikrofiltrāciju. Šajā nolūkā lieto porainas membrānas. Mikrofiltrācija pēc atdalāmo daļiņu lieluma atrodas starp ultrafiltrāciju un parasto filtrēšanu. Mikrofiltrāciju lieto ļoti smalku suspensiju (piemēram, lateksa) koncentrēšanai, dažādu šķidumu dzidrināšanai.

19.2. MEMBRĀNU VEIDI UN TO RAKSTUROJUMS

Membrāna norobežo divas fāzes. Teorētiski membrānas var būt gāzveida, šķidrās un cietas vielas. Reālos apstākļos par membrānām lieto šķidrās un cietas vielas. Membrānas var būt biezas un ļoti plānas — monomolekulāras kārtas biezumā, piemēram, taukskābju kārtā uz ūdens virsmas.

Membrānas klasificē pēc vairākām pazīmēm: pēc iegūšanas veida — *dabiskās* un *sintētiskās membrānas*; pēc struktūras — *porainās* un *neporainās membrānas*; pēc lietošanas — *membrānas gāzu sistēmām*; *sistēmām gāze—šķidrums*, *šķidrums—šķidrums*, *gāze—cieta viela* un pēc membrānas darbības principa — *difūzās*, *adsorbcijas*, *jonu apmaiņas*, *osmotiskās* un *inertās membrānas*.

Osmozes un ultrafiltrācijas izveidošanās sākuma posmā lietoja dabiskas dzīvnieku izcelsmes membrānas: cūku, zirgu pūšļus, dzīvnieku zarnas u. c. Tagad galvenokārt lieto sintētiskās membrānas (dažādas polimēru plēves, caurules u. c.) vai arī metāla, stikla, keramikas membrānas.

Porainās polimēru membrānas iegūst, pievienojot polimēra šķīdumam piedevas, kuras tālākā membrānas apstrādes gaitā izskalo vai arī rada iespēju tām iztvaikot tādos apstākļos, kas aizkavē polimēra struktūras karkasa sarūkšanu. Šādas membrānas sastāv no plāna (aptuveni 0,25 μm) virsslāņa, kas atrodas uz mikroporainas pamatnes (100...200 μm biezumā). Sadalīšana notiek ar virsslāni.

Porainās membrānas iegūst, arī apstarojot polimēru plēves ar radioaktīviem izotopiem. Poru diametrs šādām membrānām ir mazāks par 8 μm .

Neporainās membrānas, caur kurām viela pārvietojas difūzijas rezultātā, sauc par *difūzām membrānām*. Tās lieto, lai atdalītu komponentus, kuriem ir tuvas īpašības, bet dažādi molekulu izmēri. Šīs membrānas parasti lieto gāzveida un šķidru maisījumu sadalīšanai, iztvaicējot caur membrānu.

Svarīgākās membrānu īpašības ir to ķīmiskā uzbūve, lādiņa veidošanās spēja, porainība, caurlaidība un selektivitāte. Membrānas kvalitāti nosaka minēto īpašību nemainīgums darba apstākļos.

Polimēru membrānas iegūst pēc īpašas tehnoloģijas. Parastās polimēru plēves, kuras ražo citām vajadzībām, ir ar vāju selektivitāti. Difūzās polimēru membrānās ļoti liela nozīme ir molekulu polaritātei un izmēriem. Polaritāti raksturo lādiņu blīvums, dipolmoments un spēja veidot ūdeņraža saiti.

Vielu caurplūdes ātrumam membrānā var mainīties plašās robežās. Tas atkarīgs no polimēru ķēžu elastības un izvietojuma. Napolārās molekulas ir lokanākas un mazāk sablivētas (kohēzijas spēki starp molekulām ir vājāki).

No ķīmiskās struktūras viedokļa polimēru membrānas raksturo *kristāliskums* un *uzbrīšanas spēja*.

Polimēru membrānu materiāls sastāv no divām daļām: no *kristāliskās* un *amorfās daļas*. Membrānas kristāliskums nosaka tās mehāniskās īpašības un caurlaidību. Jo augstāks kristāliskums, jo

zemāka caurlaidība. Neporainām membrānām vielu caurplūde notiek tikai caur amorfo daļu.

Atkarībā no materiāla membrānas iedala *mikstās* (dažādu polimēru plēves) un *cietās* (metāls, stikls u. c.) *membrānās*.

Rūpniecībā lietojamām membrānām jābūt ar *lielu caurlaidību* (ražīgumu), *augstu selektivitāti* (atdalīšanas spēju), *ķīmiski, bioloģiski, mehāniski izturīgām* un *pietiekami lētām*.

Membrānu caurlaidību (jeb filtrācijas ātrumu) u_c dotajā spiedienā izsaka ar permeāta (filtrāta) tilpumu V (vai masu m), kas iegūts laika vienībā τ no membrānas darba virsmas S vienības, t. i., $u_c = V/(S\tau)$, kur u_c — membrānas caurlaidība, $l/(m^2 \cdot h)$ vai $m^3/(m^2 \times \text{diennakti})$.

Membrānām izšķir divu veidu selektivitāti: *faktisko selektivitāti* $\varphi_f = \bar{X}_m - \bar{X}_t / \bar{X}_m$ un *novērojamo selektivitāti* $\varphi = \bar{X}_s - \bar{X}_t / \bar{X}_s$, kur \bar{X}_s , \bar{X}_t , \bar{X}_m — sāļu koncentrācija sadalāmā šķīdumā, permeātā un uz membrānas virsmas sadalāmā šķīduma pusē brīvi izraudzītā aparāta griezumā, kg sāls/kg šķīdinātāja.

Atgriezeniskajā osmozē ar φ apzīmē *sāļu aiztures koeficientu* jeb *sāļu aizturi*. Ultrafiltrācijā ar φ apzīmē *vielas aizturi*.

Membrānas izgatavo plēvju, plākšņu, cauruļu un dobu šķiedru veidā. Dobām šķīdram iekšējo kanālu diametrs 40...100 μm (0,04...0,1 mm). Ja kanālu diametrs tuvojas vienam milimetram vai lielāks par to, tad tās sauc par cauruļu membrānām.

Membrānas ar cietu struktūru. Bez polimēru membrānām rūpniecībā lieto membrānas ar cietu struktūru: *porainu metālu*, *porainu stiklu*, *uznestās membrānas*, *dinamiskās membrānas* u. c. Šo membrānu priekšrocības: struktūras un poru viendabīgums, bioloģiski, ķīmiski un termiski izturīgas, viegli reģenerējamas ar ūdeni vai termiski.

Metāla membrānas ar poru izmēru 0,1...5 μm iegūst, izšķīdinot vai sublimējot vienu no kausējuma komponentiem, kā arī saķepinot metāla pulveri.

Mikroporaina stikla membrānas lieto plašā pH intervālā. Šādas membrānas lietojamas dažādu bioloģisku šķīdumu attīrīšanai no baktērijām. Tās izgatavo plākšņu, cauruļu un kapilāru veidā.

Uznestās membrānas iedalās piesūcinātās, uzputinātās un izgulsnētās membrānās.

Piesūcinātās membrānas iegūst, uz poraina nerūsošā tērauda, metālkeramikas un citu materiālu pamatnes poru samazināšanai izgulsnējot grūti šķīstošus savienojumus. Zemos spiedienos šīm membrānām ir liela caurlaidība. Tās lieto ultrafiltrācijā.

Uzputinātās membrānas iegūst, uz mikroporainas pamatnes uzputinot dažādas vielas (polimēru šķīdumus un kausējumus, metālus u. c.), kas spēj saistīties ar pamatnes materiālu. Poru izmērus regulē ar uzputinātās vielas biežumu.

Izgulsnētās membrānas iegūst, izspiežot caur mikroporainu pamatni suspensiju, kurai ir sīkdisperso daļiņu necīga koncentrācija. Uz pamatnes nogulsņējas plāns sīkdispersās vielas slānis. Pēc tālā-

kās apstrādes (parasti termiskās apstrādes) uz pamatnes veidojas puscaurlaidīgs slānis ar noturīgām selektīvām īpašībām.

Dinamiskās membrānas iegūst, filtrējot šķīdumu caur porainu pamatni, kas satur sīkdispersas koloīdas daļiņas. Poru izmēri no 3 nm līdz 5 μm . Šīs membrānas aiztur molekulas, jonus, tām liela caurlaidība, un tās kalpo ilgi.

19.3. MEMBRĀNU PROCESI ZINĀTNĒ UN TEHNIKĀ

Ķīmijas tehnoloģijā šķidru sistēmu un gāzveida sistēmu sadalīšanai galvenokārt lieto tradicionālās metodes: pārtvaici, sorbciju, ekstrākciju, kristalizāciju u. c. Šie procesi realizējami sarežģītos aparātos augstās vai ļoti zemās temperatūrās, ar lielu enerģijas patēriņu.

Pēdējos gadu desmitos sakarā ar sintētisko polimēru plēvju ieguves attīstību šķidru un gāzveida sistēmu sadalīšanai lieto arī puscaurlaidīgas membrānas.

No tradicionālajām sistēmu sadalīšanas metodēm membrānu lietošanas metodes atšķiras ar mazāku enerģijas patēriņu, ar vienkāršām iekārtām un temperatūras režīmu. Piemēram, jūras ūdens atsāļošanai ar atgriezenisko osmozi enerģijas patēriņš ir 2... 2,5 kW/m^3 . Lietojot destilāciju, enerģijas patēriņš 10... 15 reizi lielāks.

Izmantojot membrānas, var izveidot ekonomiski izdevīgas tehnoloģiskās shēmas, uzlabot produkta kvalitāti, kā arī strādājošo darba apstākļus.

Ķīmijas tehnoloģijā membrānu metodes lieto azeotropo maisījumu sadalīšanai, šķīdumu attīrīšanai un koncentrēšanai, ķīmiskā līdzsvara pārbīdīšanai vēlamā virzienā, lielmolekulāru vielu atdalīšanai no mazmolekulārām vielām, neorganisko sāļu šķīdumu sadalīšanai. Membrānu tehnoloģiju plaši lieto jūras ūdens atsāļošanai un notekūdeņu attīrīšanai. Ar membrānām no notekūdeņiem var atdalīt mikroorganismus un radioaktīvās vielas. Atkārtoti apstrādājot ūdeni atgriezeniskās osmozes iekārtā, iegūst absolūti tīru ūdeni, kuru var lietojot kodoltehnikā, pusvadītāju rūpniecībā un elektroniskajā rūpniecībā.

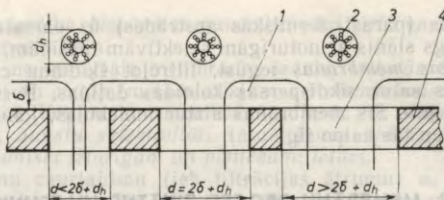
Membrānu tehnoloģiju lieto arī bioloģijas un medicīnas rūpniecībā — bioloģiski aktīvu savienojumu, fermentu, vakcīnu izdalīšanā un attīrīšanā.

Daudzi zinātniskie kolektīvi intensīvi strādā, lai ieviestu membrānu tehnoloģiju dažādās saimniecības nozarēs.

19.4. MEMBRĀNU PROCESU MEHĀNISMS

No daudzajām hipotēzēm, kas pazīstamas membrānu tehnoloģijā, aplūkosim kapilāro filtrāciju un molekulāro difūziju.

Kapilārās filtrācijas hipotēze kļūst ļoti saprotama, aplūkojot elektrolīta ūdens šķīduma sadalīšanu ar porainām membrānām. Pieņem,



19.1. att. Kapilārās filtrācijas hipotēzes modeļa shēma.

ka liofilām membrānām, kas iegremdētas elektrolīta šķīdumā, uz virsmas un porās (kapilāros) veidojas ūdens robežkārtā.

Uz fāžu saskares virsmas, piemēram, sistēmā šķīdums—cieta viela, darbojas virsmas spēki — adhēzijas, virsmas spraiguma, molekulārās pievilšanās spēki. Tādēļ šķīduma robežkārtā, kas saistīta ar membrānas virsmu, pēc struktūras un fizikālķīmiskajām īpašībām atšķiras no šķīduma tilpumā. Šāda struktūras un sastāva maiņa šķīduma tilpumā un robežkārtā rada arī citu fizikālķīmisko īpašību maiņu (piemēram, viskozitātes, šķīdināšanas spējas u. c.).

Robežkārtā 1, kuras biezums δ (19.1. att.), veido atsevišķu fāzi ar savu sadalošo virsmu. Saistītais ūdens robežkārtā zināmā mērā zaudē šķīdināšanas spēju. Tādēļ saistītā ūdens klātbūtne membrānas kapilāros aiztur šķīduma jonus (molekulas), kas nešķīst robežkārtas ūdenī. Ja membrānas 4 kapilāru (poru) 3 diametrs $d \leq 2\delta + d_n$, tad caur tādu kapilāru plūst tikai ūdens. Tādējādi pēc kapilārās filtrācijas hipotēzes tiek izskaidrota membrānas selektivitāte.

Reālās membrānas ir ar dažādu kapilāru (poru) lielumu, arī tādās, kurām $d > 2\delta + d_n$. Tādēļ to selektivitāte nesasniedz 100%. Membrānas selektivitāte ir jo lielāka, jo biežāka robežkārtā un augstāka jona 2 hidratācija.

Molekulārās difūzijas hipotēze dažādu sistēmu sadalīšanu izskaidro ar komponentu nevienādu šķīdību polimēru membrānā un ar tās difūzijas koeficienta dažādām vērtībām. Pēc šīs hipotēzes membrāna tiek uzskatīta par šķīdumu un vielas pāreju caur membrānu izsaka ar Fika diferenciālvienādojumu stacionāram procesam (sk. vienādojumu (10.31)).

Gāzu caurplūde membrānām atkarīga no tā, vai membrāna ir poraina vai neporaina.

Gāzu plūsma caur mikroporainu vidi analogiska plūsmai caur tieviem kapilāriem. Mikroporainajās membrānās, kurām raksturīga attīstīta kapilāru sistēma, darbojas ievērojami lieli adsorbcijas spēki. Sadalot gāzu sistēmas ar mikroporainajām membrānām, jāievēro, ka 1) poru izmēriem jābūt ievērojami mazākiem par difundējošo komponentu molekulu brīvā noskrējiena garumu; 2) temperatūrai jābūt pietiekami augstai; 3) spiedienam jābūt zēmam, lai palielinātu molekulu brīvā noskrējiena garumu salīdzinājumā ar kapilāra diametru. Ievērojot šos nosacījumus, gāzu maisījuma komponenti pār-

vietosies caur membrānu ar dažādu ātrumu. Komponentiem ar mazu molmasu būs lielāks ātrums, un to saturs permeātā palielināsies.

Neporainā membrānā gāzu sadalīšana atkarīga no komponentu šķīdības membrānā un difūzijas ātruma.

Gāzu difūzijai lietojamas polimēru membrānas un membrānas ar cietu struktūru (metāla, stikla u. c.).

19.5. MEMBRĀNU PROCESU KINĒTIKA

Komponenta masu m , kas izplūst caur membrānu, var izteikt ar masas pārejas kinētisko pamatvienādojumu (10.48):

$$m = k \Delta_{\text{vid}} S \tau,$$

kur k — masas pārejas koeficients; Δ_{vid} — membrānas procesa virzošais spēks; S — membrānas darba virsma; τ — procesa ilgums.

Masas pārejas koeficientu izsaka šādi:

$$k = \frac{1}{1/\beta_1 + \delta/\lambda_m + 1/\beta_2},$$

kur β_1 — masas atdeves koeficients no sadalāmā šķīduma uz membrānas virsmu; δ — membrānas biezums; λ_m — membrānas masas vadītspējas koeficients; β_2 — masas atdeves koeficients no membrānas virsmas uz permeātu.

Nepieciešamā membrānu kopējā darba virsma

$$S = \frac{m}{k \Delta_{\text{vid}} \tau}.$$

19.6. MEMBRĀNU PROCESU UN APARĀTU APRĒĶINU METODIKA

Membrānu aparātu aprēķinu pamatā ir 1) membrānas izvēle; 2) membrānu kopējās darba virsmas noteikšana un 3) aparāta pretestības aprēķināšana. Tālāk aplūkots atgriezeniskās osmozes aparāta aprēķins.

Membrānas izvēle. Ja sadalāmā šķīduma sākuma koncentrācija ir \bar{X}_s un beigu koncentrācija \bar{X}_b , tad *koncentrēšanas pakāpe* $z = \bar{X}_b/\bar{X}_s$.

Jāatceras, ka izšķīdušās vielas koncentrācija sadalāmā šķīdumā membrānu procesos ir lielums, kas nosaka procesa raksturu, it īpaši atgriezeniskajā osmozē un ultrafiltrācijā. Sadalāmā šķīduma pareizas darba koncentrācijas izvēle ir galvenais iekārtas normālas darbības nosacījums.

Izvēloties membrānu, jāievēro, ka tai jānodrošina maksimālā caurlaidība un nepieciešamā selektivitāte (to nosaka valsts standarti vai attiecīgas normas).

Membrānu caurlaidība un konstanšu a un b vērtības
($\Delta p = 5$ MPa, $t = 25^\circ\text{C}$)

Membrānas veids	Ūdens caurlaidība $u_0 \cdot 10^3$ kg/(m ² ·s)	a	b
MGA—100	1,11	7,342	3,024
MGA—95	1,67	5,780	2,400
MGA—90	2,78	5,179	2,093
MGA—80	4,17	4,323	1,729

Faktisko nepieciešamo membrānas selektivitāti φ_f aprēķina pēc formulas

$$\lg(1 - \varphi_f) = a + b \lg f(\Delta H), \quad (19.1)$$

kur a un b — konstantes, kas atkarīgas no membrānas. Dažām acetilcelulozes membrānām a un b vērtības dotas 19.1. tabulā.

Lai aprēķinātu $f(\Delta H)$, lieto izteiksmi

$$f(\Delta H) = (\Delta H_m \Delta H_l) / 4,187^{1+v},$$

kur ΔH_m , ΔH_l — dotā elektrolīta jonu mazākais un lielākais hidratācijas siltums; v — konstante, kas atkarīga no katjona un anjona lādiņa.

19.1. tabulā minētajām membrānām eksperimentāli noteiktas šādas konstantes v vērtības:

Katjona lādiņš	1	1	1	2	3	3
Anjona lādiņš	1	2	2	2	2	1
v	0,51	0,47	0,47	0,33	0,33	0,4

Faktisko selektivitāti aprēķina vairākām membrānām (mainās a un b vērtības).

Katrai membrānai aprēķina vidējo atdalāmās vielas koncentrāciju filtrātā pēc formulas:

$$\bar{X}_f = \bar{X}_s \frac{1 - z^{(1-\varphi)/\varphi}}{1 - z^{-1/\varphi}},$$

kur \bar{X}_f — atdalāmās vielas koncentrācija filtrātā, kg sāls/kg šķīdinātāja; \bar{X}_s — šķīduma sākuma koncentrācija, kg sāls/kg šķīdinātāja; φ — novērojamā selektivitāte, pieņem, ka $\varphi = \varphi_f$.

Iegūstamā filtrāta masa sekundē

$$G_f = G_s (1 - z^{-1/\varphi}),$$

kur G_f — filtrāta masa sekundē, kg/s; G_s — sākuma šķīduma patēriņš, kg/s.

Atdalāmās vielas masa sākuma šķīdumā sekundē $G_a = G_s \bar{X}_s$. At-
dalāmās vielas masa filtrātā sekundē $G_{af} = G_f \bar{X}_f$. At-
dalāmās vielas

zudumi: $(G_{at}/G_n) 100\%$. Membrānu, kurai atdalāmās vielas zudumi ir mazāki par 10% , izvēlas attiecīgā šķīduma sadalīšanai.

Membrānu kopējās darba virsmas noteikšana. No 19.1. tabulas izraudzītajai membrānai var noteikt ūdens caurlaidību u_0 .

Membrānas caurlaidību u_c dotajiem darba apstākļiem aprēķina pēc formulas:

$$u_c = A(\Delta p - \Delta \pi) = A[\Delta p - (\pi_3 - \pi_2)], \quad (19.2)$$

kur u_c — membrānas caurlaidība, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; Δp — spiedienu starpība starp abām membrānas pusēm, MPa; π_2 — filtrāta osmotiskais spiediens uz membrānas virsmas, MPa; π_3 — sadalāmā šķīduma osmotiskais spiediens uz membrānas virsmas, MPa; $A = u_0/\Delta p$ — membrānas caurlaidības konstante attiecībā uz ūdeni, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{MPa})$.

Aprēķina pirmajā tuvinājumā pieņem, ka osmotiskais spiediens uz membrānas virsmas un sadalāmā šķīduma tilpumā (neņem vērā koncentrācijas polarizāciju) ir vienāds, t. i., $\pi_3 = \pi_s$. Pieņem, ka filtrāta osmotiskais spiediens $\pi_2 = 0$, tad membrānas caurlaidība

$$u_c = u_0(1 - \pi_s/\Delta p).$$

Pirms membrānas caurlaidības u_c aprēķina no datiem, kas iegūstami rokasgrāmatās, zīmē grafiku $\pi = f(\bar{X})$. Pēc grafika nosaka osmotisko spiedienu π_s koncentrācijai \bar{X}_s un π_b koncentrācijai \bar{X}_b .

Membrānas caurlaidība, sadalāmajam šķīdumam nokļūstot uz membrānas (membrānas sākumā):

$$u_1 = u_0(1 - \pi_s/\Delta p),$$

un, tam aizplūstot no membrānas (membrānas beigās):

$$u_2 = u_0(1 - \pi_b/\Delta p).$$

Membrānas vidējā caurlaidība

$$u_{\text{vid}} = (u_1 + u_2)/2.$$

Nepieciešamā membrānas virsma

$$S = G_t/u_{\text{vid}},$$

kur S — membrānas virsma, m^2 .

Faktiski nepieciešamā membrānu kopējā virsma, ja novērojamā selektivitāte $\varphi = (\bar{X}_s - \bar{X}_b)/\bar{X}_s > 0,9$, aprēķināma pēc formulas:

$$S_1 = \frac{G_s \bar{X}_s}{u_0} \left[-\frac{j}{u_0} 2,31 \lg \frac{u_0 - j\bar{X}_s}{u_0 - j\bar{X}_b} + \frac{1}{\bar{X}_s} - \frac{1}{\bar{X}_b} \right],$$

kur j — dotās sistēmas konstante, ko aprēķina kā vidējo aritmētisko, t. i., $j = (j_1 + j_2)/2$, ja $j_1 = (u_0 - u_s)/\bar{X}_s$ un $j_2 = (u_0 - u_b)/\bar{X}_b$, kur u_s , u_b — membrānas faktiskā caurlaidība, sadalāmajam šķīdumam nokļūstot uz membrānas un aizplūstot no tās.

Membrānas faktisko caurlaidību u_s un u_b aprēķina pēc formulas (19.2), iepriekš nosakot π_2^s, π_3^s un π_2^b, π_3^b (pēc $\pi=f(\bar{X})$ grafika), tad

$$u_s = u_0 \left(1 - \frac{\pi_3^s - \pi_2^s}{\Delta p} \right) \quad \text{un} \quad u_b = u_0 \left(1 - \frac{\pi_3^b - \pi_2^b}{\Delta p} \right).$$

Ja starpība starp j_1 un j_2 ir lielāka par 20%, tad membrānu kopējo darba virsmu aprēķina pēc formulas

$$S = \frac{G_s \bar{X}_s^{1/\varphi}}{\varphi} \int_{\bar{X}_s}^{\bar{X}_b} \frac{d\bar{X}_s}{\bar{X}_s^{(1+\varphi)/\varphi} (u_0 - j\bar{X}_s)^{\varphi}}$$

Iegūto kopējo membrānu darba virsmu S salīdzina ar pirmajā tuvīnajumā aprēķināto virsmu. Ja $[(S_1 - S)/S] \cdot 100 < 10\%$, tad pārēķins nav jāatkārto.

Ja vienam filtrējošam elementam membrānas darba virsma ir S_e , tad nepieciešamais elementu skaits $i = S/S_e$.

Hidrauliskā pretestība. Membrānu aparātu hidraulisko pretestību Δp_h aprēķina pēc vienādojuma:

$$\Delta p_h = \Delta p + \Delta p_s + \Delta p_t,$$

kur Δp — spiedienu starpība starp abām membrānas pusēm, MPa; Δp_s — šķīduma plūsmas pretestība, MPa; Δp_t — filtrāta plūsmas pretestība, MPa.

Šķīduma plūsmas pretestība $\Delta p_s = \zeta_1 \Delta p_t$ un filtrāta plūsmas pretestība $\Delta p_t = \zeta_2 \Delta p_t$, kur Δp_t — tukša (sausā) aparāta hidrauliskā pretestība, MPa; ζ_1 un ζ_2 — pretestības koeficienti, kas atkarīgi no separācijas sietiem un drenāžas materiāla; parasti $\zeta_1 = 100 \dots 200$, $\zeta_2 = 5 \dots 10$.

Tukša aparāta hidraulisko pretestību Δp_t aprēķina pēc formulas (2.47):

$$\Delta p_t = \lambda (l/d) (\rho \omega^2 / 2),$$

kur Δp_t izteikts paskālos; λ — hidrauliskās pretestības koeficients; laminārai plūsmai gredzenveida un spraugveida kanālos $\lambda = 96/Re$.

Koncentrācijas polarizācija. Sadalot šķīdumus ar puscaurlaidīgām membrānām, caur tām izplūst šķīdinātājs (vai arī kāds no komponentiem). Tā rezultātā robežkārtā pie membrānas palielinās izšķīdušās vielas koncentrācija, līdz iestājas līdzsvars starp membrānas virsmu un šķīdumu. Šādu parādību sauc par *koncentrācijas polarizāciju*, kas negatīvi ietekmē procesu, jo samazinās membrānas caurlaidība un selektivitāte, sāisinās tās kalpošanas ilgums.

Koncentrācijas polarizāciju samazina, palielinot šķīduma plūsmas ātrumu (3...5 m/s), izvietojot šķīdumu plūsmā dažādus šķēršļus (spirāles, perforētus un gofrētus ieliktnus), ievadot plūsmā cietas daļiņas vai lodītes ar blīvumu, kas tuvs šķīduma blīvumam, radot pulsējošu šķīdumu plūsmu, kā arī lietojot aparātus ar šaurām spraugām starp membrānām.

19.7. MEMBRĀNU APARĀTI

Rūpniecībā lietojamos aparātus pēc membrānu veida iedala četrās grupās: 1) *plakano membrānu*, 2) *rullēto membrānu*, 3) *cauruļveida membrānu* un 4) *dobu šķiedru membrānu aparāti*.

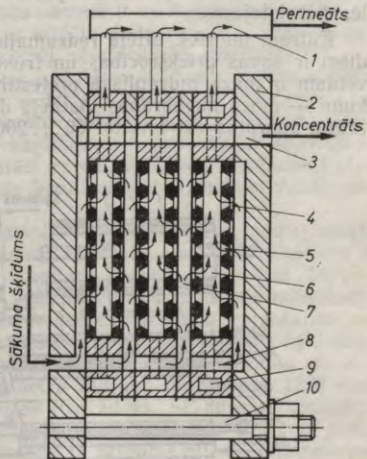
Plakano membrānu aparāti. Plakano membrānu aparātu pamatā ir membrānas elements, kas sastāv no plakanām membrānām, kuras novietotas vai izveidotas drenāžas starplikas abās pusēs. Sprauga starp divām membrānām ir 0,5...5 mm. Pa šo spraugu plūst sadalāmais šķīdums.

Membrānu aparāts ar plakanām membrānām parādīts 19.2. attēlā. Sākuma šķīdumu aparātā ievada pa kanālu 8, tālāk tas pa kanāliem 7 sadalās starp membrānām. Šķīdumam plūstot uz augšu, tas caur membrānu 4 (kas pieskaras drenāžas virsmai 5) nokļūst permeāta savākšanas kanālā 6. Permeāts tālāk nokļūst gredzenveida kanālā 9 un no tā pa caurulītēm aizplūst uz permeāta kolektora cauruli 1, pa kuru to izvada no aparāta. Koncentrāts no aparāta aizplūst pa koncentrāta kolektoru 3. Membrānu elementi novietoti starp diviem diskkiem 2. Vajadzīgo attālumu starp membrānu elementiem iegūst, savelkot diskus ar uzgriežņiem, kuri atrodas uz stieniem 10. Membrānu virsma atkarībā no membrānu elementu skaita ir 4,5...42 m², darba spiediens līdz 2 MPa un temperatūra līdz 100 °C.

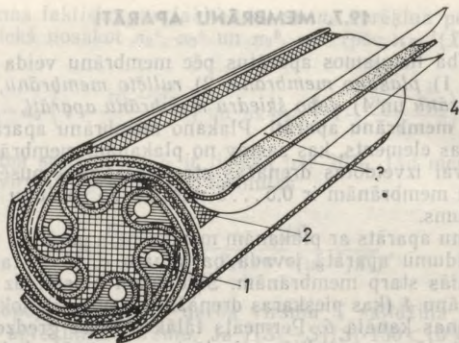
Rullēto membrānu aparāti. Rullēto membrānu aparāti ir ar lielu īpatnējo virsmu (300...800 m²/m³). Tos plaši lieto atgriezeniskajā osmozē. Tiem ir ļoti liels ražīgums. Atsāļojot ūdeni, ar vienu rullēto membrānu elementu diennaktī iegūst līdz 95 m³ permeāta.

Ir četri rullēto membrānu elementu veidi: 1) ar vienu permeāta izvadcauruli; 2) ar savstarpēji savītām rullētām membrānām; 3) ar vairākām permeāta izvadcaurulēm; 4) ar permeāta savākšanas kanāliem. No minētajiem membrānu elementiem vairāk perspektīvs ir otrs.

Rullēto membrānu elements redzams 19.3. attēlā. Permeāta novadišanas caurulei 1 uzrullētas divas membrānas 3 un starp tām novietota drenāžas starplika 4. Kanālu izveidošanai starp membrānām (sadalāmā šķīduma plūsmā) pirms membrānu sarullēšanas virs augšējās



19.2. att. Membrānu aparāts ar plakanām membrānām.



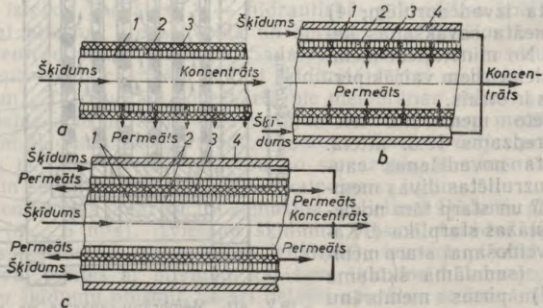
19.3. att. Rollēto membrānu elementa shēma.

membrānas novieto sietu — separatoru 2.

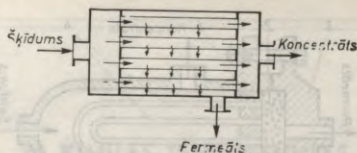
Rollēto membrānu aparātus izgatavo cauruļveidā (diametrs 70 ... 200 mm, garums 1 ... 9 m) un tajos ievieto rindā vairākus rollēto membrānu elementus.

Cauruļveida membrānu aparāti. Cauruļveida membrānu aparātu pamatā ir caurules ar cauruļveida membrānām. 19.4. attēlā redzams membrānu 1, cauruļveida starplikas 2, drenāžas 3 un ārējās caurules 4 izvietojumus.

Katram no 19.4. attēlā redzamajiem membrānas izvietojuma veidiem ir savas priekšrocības un trūkumi. 19.4. attēlā *a* parādītajam veidam ir maza hidrauliskā pretestība, kā arī filtru viegli tīrīt, trūkumi — maza membrānas īpatnējā darba virsma. Cauruļveida membrānu aparātos var izvietot 60 ... 200 m²/m³ darba virsmas. 19.4. at-



19.4. att. Membrānu izvietojumus cauruļveida membrānu elementos (shēma).



19.5. att. Cauruļveida membrānu aparāta darbības princips.

tēlā *b* dotais variants rada iespēju izvietot lielu membrānas virsmu mazā tilpumā, jo var lietot maza diametra caurules. 19.4. attēlā *c* parādītajam aparātam ir liela hidrauliskā pretestība.

Cauruļveida drenāžas karkass izgatavots tā, ka iespējams novadīt permeātu. Starplikas izgatavotas no sūkporaina materiāla (ar sveķiem piesūcināts papirs, audums, plastmasas siets, poroplasti u. c.) un tās neļauj darba laikā iespiest membrānu drenāžā.

Membrānas kalpo apmēram vienu gadu, tādēļ šā veida aparātus izgatavo tā, lai varētu viegli apmainīt nolietotās caurules. No cauruļveido ērti apmaināmus blokus.

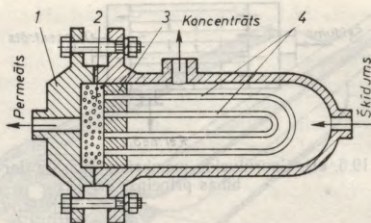
19.5. attēlā parādīts cauruļveida membrānu aparāta darbības princips. Kā redzams, šo aparātu darbība analoga cauruļveida siltumapmainītāja darbībai.

Dobo šķiedru aparāti. Dobo šķiedru membrānu aparātus savu daudzo pozitīvo īpašību dēļ (nav nepieciešama drenāžas kārta, liela membrānu virsma tilpuma vienībā (līdz $30\,000\text{ m}^2/\text{m}^3$) u. c.) arvien plašāk lieto rūpniecībā. Šo aparātu pamatā ir no membrānu materiāla izgatavotas kapilāras caurules ar iekšējo diametru $45 \dots 200\ \mu\text{m}$ un sienu biezumu $10 \dots 50\ \mu\text{m}$, kas spēj izturēt darba spiedienu.

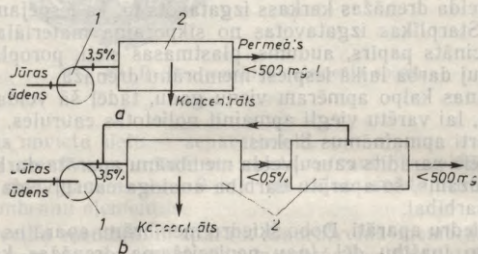
Rūpniecībā lieto aparātus, kas sadalāmo šķidumu vai nu ievada kapilāros, vai arī tos apskalo ar sadalāmo šķidumu no ārpusēs.

Dobo šķiedru membrānu aparātus iedala četrās grupās: 1) aparāti ar aparāta asij paralēliem kapilāriem; 2) aparāti ar sfēriskiem filtrējošiem elementiem; 3) aparāti ar cilindriskiem filtrējošiem elementiem; 4) aparāti ar U veida kapilāriem. Visperspektīvākais no tiem ir pēdējais.

19.6. attēlā redzamais aparāts ir vienkārši izgatavojams, viegli saliekams un tam ātri var apmainīt filtrējošo elementu. Kapilāru 4 vaļējie gali iestiprināti diskā 3. Kapilāru garums $1,5 \dots 2\text{ m}$. Turbulences paaugstināšanai aparātā lieto polietilēna vai stikla mikrolodītes (diametrs $40 \dots 80\ \mu\text{m}$), kas novērš nogulumu veidošanos uz kapilāru virsmām un veicina koncentrācijas izlīdzināšanos šķīdumā. Dobo šķiedru aparāti ir kompakti, un tiem ir liels ražīgums, piemēram, filtrējošais elements ar diametru 240 mm un garumu 1220 mm diennaktī spēj dot 50 m^3 un vairāk tīra ūdens. Šā aparāta trūkumi: ja sadalāmo šķidumu vada pa kapilāra iekšpusi, tad šķidums jāatīra no mehāniskiem piemaisījumiem; ja šķidums plūst kapilāram pa ārpusi, tad šķiduma ātrums ir mazs un rodas ievērojami liela koncentrācijas polarizācija.



19.6. att. Dobo šķiedru membrānu aparāta ar U veida kapilāriem shēma.



19.7. att. Membrānu iekārtu principiālās shēmas:

a — vienkāpes iekārta, b — divpakāpju iekārta, 1 — sūkņis, 2 — membrānu aparāts.

Bez iepriekš aplūkotajiem membrānu aparātiem izgatavoti arī centrifūgveida aparāti — membrānu ievieto centrifūgas grozā starp divām poraina materiāla kārtām. Šo aparātu trūkums: neliela membrānas ipatnējā virsma, samērā sarežģīta konstrukcija.

Membrānu iekārtas iedalāmas vienkāpes vai vairāpkāpju iekārtās. 19.7. attēlā redzamas vienkāpes iekārtas un divpakāpju iekārtas principiālās shēmas jūras ūdens atsāļošanai. Ja lieto vienkāpes iekārtu, tad membrānai jābūt ar augstu selektivitāti. Membrānām, kuras lieto vairāpkāpju iekārtās, neizvirza tik augsta prasības.

20. ĶĪMIJAS TEHNOĻĪJAS ATTĪSTĪBAS TENDENCES

Mūsdienu ķīmijas tehnoloģijā svarīgākās problēmas ir 1) *modelēšana un pārejas mēroga noteikšana*, 2) *procesu intensificēšana*, 3) *aparātu ražīguma palielināšana*, 4) *jaunu procesu un aparātu izstrādāšana, ievērojot ekoloģiskās prasības*, 5) *tehniskās kibernetikas pilnveidošana attiecībā uz tehnoloģisko objektu projektēšanu, automātisku vadīšanu un optimizāciju*.

Pārejas mēroga noteikšanas problēma tehnikā ir ļoti svarīga. Šīs problēmas risināšana ievērojami saīsina laiku pārejai no laboratorijas pētījumiem līdz ražošanai. Šī problēma nav jauna. Izmantojot līdzības teoriju, pārejas mēroga noteikšanā labi rezultāti iegūti hidromehāniskajos, siltuma apmaiņas un dažos masas apmaiņas procesos. Ķīmisko reakciju modelēšanā līdzības teorija nav noderīga, jo nav iespējams ievērot atsevišķo kritēriju invariantumu.

Progress ķīmijas tehnoloģijā sākās ar matemātiskās modelēšanas un elektroniskās skaitļošanas mašīnu ieviešanu zinātnē. Tas radīja iespēju sarežģītos kinētiskos vienādojumus pārvērst mašīnu valodā un, izmantojot elektroniskās skaitļošanas mašīnas, noskaidrot optimālos režīmus. Pētījumi pārejas mēroga noteikšanā parādīja, ka apmierinošu rezultātu sasniegšanai apvienojamas abas modelēšanas metodes — matemātiskā un fizikālā.

Procesu intensificēšanas problēma saistīta ar atsevišķu agregātu darba virsmu (vai tilpumu) un īpatnējā ražīguma (ražīgums no 1 m^2 darba virsmas vai 1 m^3 darba tilpuma) palielināšanu. Liela nozīme aparātu intensificēšanā ir plūsmu ātrumiem tajos. Piemēram, konstruējot jauna veida šķīvjus, rektifikācijas un absorbcijas kolonnās vieglās fāzes ātrumu izdodas palielināt 5...10 reizi; tas ievērojami kāpina aparātu ražīgumu.

Procesu intensificēšana panākama arī dažādu lauku (piemēram, ultraskaņas, magnētiskā lauka, pulsāciju, vibrāciju u. c.) ietekmē.

Intensificēšanu veicina arī jaunu tehnoloģisku metožu ieviešana, piemēram, suspendētā slāņa, membrānu tehnoloģijas, plazmas tehnoloģijas izmantošana u. c.

Ļoti strauja ķīmiskās rūpniecības izaugsme (piemēram, pēdējos 40 gados sintētiskā amonjaka ražošana palielinājusies 10 reizes; sērskābes tehnoloģisko līniju ražīgums pieaudzis no 50...150 t/dienaktī līdz 2000 t/dienaktī) izvirzījusi prasību ķīmiskās mašīnbūves rūpniecām ražot agregātus ar ļoti lielu ražīgumu, piemēram, piecu gadu laikā cilindriskajiem filtriem darba virsma palielinājusies

2 reizes, diskveida filtriem — 2,5 reizes. Filtrējošo centrifūgu ražīgums sasniedz līdz 100 t/h. Mikrobioloģiskajā rūpniecībā fermentatoru tilpums palielinājies līdz 1000 m³. Rūpniecībā lieto absorbcijas kolonnas ar diametru 16 m un ar gāzes caurteci līdz 1 milj. m³/h. Darbojas žāvētavas, kas spēj iztvaicēt līdz 28 t/h ūdens. Minerālmēslu rūpniecībā ieviestas suspendētā slāņa žāvētavas ar ražīgumu 100 t/h sausā produkta.

Šādi lieljaudas agregāti radīti, ievērojot optimālos izmērus un vienlaikus arī augstu darba drošību. Tieši darba drošībai ir noteicoša nozīme, jo pēkšņa agregāta apstāšanās izslēdz visu tehnoloģisko līniju.

Lieljaudas aparātu izveidošana atkarīga no ķīmijas tehnoloģijas pieprasījuma un ķīmiskās mašīnbūves attīstības iespējām. To rāda arī ķīmijas tehnoloģijas vēsture, piemēram, XIX gadsimtā un pat XX gadsimta sākumā būvēja milzīgas atputekļošanas kameras (izmēri 100×50×7 m) ar atputekļošanas pakāpi tikai ap 70% un putekļaino gāzu caurteci līdz 10⁵ m³/h. Attīstoties mašīnbūvei un palielinoties ražīgumam, ķīmiskajā rūpniecībā radās jauna atputekļošanas metode un sāka lietot elektrofiltrus (izmēri aptuveni 5×5×10 m) ar atputekļošanas pakāpi līdz 99% un ievērojami lielāku ražīgumu nekā atputekļošanas kamerām. Minēto gigantisko atputekļošanas kameru būve izbeidzās.

Lielī panākumi ķīmijas tehnoloģijas procesu intensificēšanā var turpināties tikai līdz zināmai robežai. Tālākais ķīmiskās rūpniecības progress atkarīgs no *jaunām idejām, metodēm un procesiem*.

Plašas perspektīvas paredzamas zemtemperatūras plazmā (6000...20 000 K). Plazmas ķīmija spēj iegūt slāpekļa oksīdus no gaisa, dažādus pigmentus, sintezēt organiskus savienojumus u. c. Aparāti (reaktori) plazmas procesu realizēšanai ir nelieli, piemēram, plazmas ķīmiskajam reaktoram, ko lieto metāna pirolīzei (ar ražīgumu 2500 t/gadā), garums ir aptuveni 65 cm un diametrs — 15 cm.

Ķīmijas tehnoloģijā pēdējos gadu desmitos ieviesti radiācijas ķīmijas procesi, kuros var iegūt augstas tīrības specifiskus materiālus, dažkārt pat vienkāršojot tehnoloģisko shēmu.

Ķīmijas tehnoloģijas attīstība cieši saistīta arī ar *tehnoloģisko shēmu izmaiņām*. Perspektīvā paredzama tehnoloģisko shēmu vienkāršošana, pārejot no daudzstadiju shēmām uz vienkāršotām shēmām, pat vienstadiju tehnoloģiju.

Mūsdienu ķīmijas tehnoloģijas attīstības iezīme ir cenšanās realizēt procesus optimālos apstākļos.

Jebkuras ķīmijas tehnoloģijas sistēmas darba organizēšanā ir divi posmi. Pirmajā posmā nosaka stacionāra ķīmijas tehnoloģijas procesa parametru vērtības, kad procesa izmaksas ir zemākās, bet produkta kvalitāte atbilst uzstādītajām prasībām. So posmu sauc par ķīmijas tehnoloģijas sistēmas *statisko optimizāciju*. Statiskās optimizācijas pamatā ir pareiza uzdevuma formulēšana. Jāievēro, ka nepietiek ar statiskās optimizācijas uzdevumu atrisināšanu vienam aparātam, panākot, lai šā aparāta darbība būtu vīsekonomiskākā. Ja aplūkojamais aparāts iekļaujas tehnoloģiskajā līnijā un izvirzi-

tais uzdevums — visas līnijas statistiskā optimizācija, tad režīms, kas optimāls dotajam aparātam, var nebūt optimāls attiecībā uz visas tehnoloģiskās līnijas izmaksām.

Tehnoloģisko objektu statistiskai optimizācijai nepieciešams izstrādāt modeļus, kas dod skaidru priekšstatu par saistību starp ķīmijas tehnoloģijas sistēmas elementiem, kā arī par tehnoloģisko objektu hierarhijas struktūru. Risinot uzdevumus, kas saistīti ar ķīmijas tehnoloģijas sistēmas statisko optimizāciju, matemātiskais pamats ir lineārā, dinamiskā un ģeometriskā programmēšana, bet ķīmijas tehnoloģijas objektu modelēšanā — grafu teorija.

Nākamais uzdevums — statisko optimizāciju praktiski realizēt. Optimālā režīma realizēšana ir vadišanas uzdevums, t. i., *ķīmijas tehnoloģijas procesu kibernetika*. Kibernetika ir otrs posms ķīmijas tehnoloģijas sistēmas darba organizēšanā. Tā balstās uz informāciju, kas iegūta, pētot ķīmijas tehnoloģijas procesu statiku un kinētiku, kā arī ķīmisko reakciju norisi.

Lai realizētu ķīmijas tehnoloģijas sistēmu optimizāciju, jāzina 1) struktūru analīzes metodes; 2) statisko (stacionāro) režīmu aprēķinu metodes; 3) stabilitātes pētīšanas metodes; 4) statisku un dinamisku režīmu optimizācijas metodes; 5) programmēšana.

Noslēdzošais posms inženieru ķīmiķu darbā ir ķīmisko rūpnīcu, kombinātu projektēšana. Statiskās optimizācijas metodēm ir liela nozīme ķīmijas rūpnīcu projektēšanā.

Jaunākais projektēšanas veids ķīmijas tehnoloģijā ir automatizēta projektēšana. Metodes būtība ir optimāla projektēšana un konstruēšana, izmantojot elektroniskās skaitļošanas mašīnas. Pamatojoties uz zinātniskās modelēšanas metodēm, ķīmijas tehnoloģijas sistēmu analīzi un sintēzi, izstrādā standarta algoritmus (iegūst informācijas banku), izdala apakšsistēmas un izveido tehnoloģiskā projekta automatizētu sistēmas struktūru.

Jaunās projektēšanas sistēmas sekmīga attīstība atkarīga no informācijas, kuru iegūst, pamatojoties uz rūpīgiem ķīmijas tehnoloģijas pētījumiem.

LITERĀTŪRA

Pamalliteratūra

1. *Касаткин А. Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии. — М.: Химия, 1973. — 750 с.
2. Основные процессы и аппараты: Пособие по проектированию / Под ред. Ю. И. Дытнерского. — М.: Химия, 1983. — 272 с.
3. *Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А.* Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. — Л.: Химия, 1987. — 575 с.
4. Руководство к практическим занятиям и лабораторным процессам и аппаратам химической технологии / Под ред. П. Г. Романкова. — Л.: Химия, 1979. — 256 с.
5. *Osipovs L.* Uzdevumu krājums kursam «Ķīmijas tehnoloģijas pamatprocesi un aparāti». — R.: Rīgas politehn. in-ts, 1984. — 62 lpp.
6. *Osipovs L.* Ķīmijas tehnoloģijas pamatprocesi un aparāti. Uzdevumu krājums ar atrisinājumiem. — R.: Rīgas politehn. in-ts, 1985. — 84 lpp.

Papildliteratūra

1. *DreiĶers I., Vitols P.* Ķīmijas tehnoloģijas procesu teorijas pamati. — R.: Zvaigzne, 1986. — 228 lpp.
2. *Koroļkova N., Mihailovs I.* Masas armaiņa šķidrums sorbcijā. — R.: Zvaigzne, 1975. — 250 lpp.
3. *Александров И. А.* Ректификационные и абсорбционные аппараты. — М.: Химия, 1978. — 280 с.
4. *Белоглазов И. Н.* Твердофазные экстракторы. — Л.: Химия, 1985. — 240 с.
5. *Гельперин Н. И.* Основные процессы и аппараты химической технологии. — М.: Химия, 1981. — Кн. 1 и 2. — 812 с.
6. *Дытнерский Ю. И.* Баромембранные процессы. — М.: Химия, 1986. — 271 с.
7. *Жужиков В. А.* Фильтрование. — М.: Химия, 1980. — 440 с.
8. *Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С.* Теплопередача. — М.: Энергия, 1981. — 439 с.
9. *Кафаров В. В.* Основы массопередачи. — М.: Высшая школа, 1979. — 439 с.
10. *Когановский А. М.* Адсорбция и ионный обмен в процессах водоподготовки и очистки сточных вод. — Киев: Наукова думка, 1983. — 239 с.
11. Основы жидкостной экстракции. / Г. А. Ягодин, С. З. Каган, В. В. Тарасов и др. — М.: Химия, 1981. — 400 с.
12. *Рамм В. М.* Абсорбция газов. — М.: Химия, 1976. — 655 с.
13. *Романков П. Г., Курочкин М. И.* Гидромеханические процессы химической технологии. — Л.: Химия, 1982. — 288 с.
14. *Романков П. Г., Курочкина М. И.* Экстрагирование из твердых материалов. — Л.: Химия, 1983. — 256 с.
15. *Романков П. Г., Рашковская Н. Б.* Сушка во взвешенном состоянии. — Л.: Химия, 1979. — 211 с.
16. *Романков П. Г., Фролов В. Ф.* Теплообменные процессы химической технологии. — Л.: Химия, 1982. — 288 с.
17. *Сеневин М. М.* Ионный обмен в технологии и анализе неорганических веществ. — М.: Химия, 1980. — 272 с.
18. *Скобло А. И., Трегубова И. А., Молоканов Ю. К.* Процессы и аппараты нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. — М.: Химия, 1982. — 584 с.
19. *Соколов В. И.* Центрифугирование. — М.: Химия, 1976. — 408 с.
20. *Таубман Е. И.* Выпаривание. — М.: Химия, 1982. — 327 с.
21. *Хван С. Т., Каммермейер К.* Мембранные процессы разделения. — М.: Химия, 1981. — 464 с.

ALFABĒTISKAIS RĀDĪTĀJS

- Absorbcija 431
 Absorbcijas mehānisms 432
 Absorberi ar maisītājiem 464
 — — nepārtrauktu barbotāžas slāni 450
 — — pildījumu 438
 — — suspendētu pildījuma slāni 463
 — — šķīviem 450
 — — izsmidzināšanas 465
 — — plānslāņa 437
 — — virsmas 436
 Adiabatiskā ietvaice 389
 — žūšana 597
 Adsorbcija, aktivētā, 548
 — fizikālā 548
 — ķīmiskā 548
 — monomolekulārā 548
 — polimolekulārā 548
 Adsorbcijas ātrums 553
 — izoterms 551
 — procesa darba taisnes vienādojums 565
 — siltumefekts 554
 Adsorbenta dinamiskā aktivitāte 551
 — slāņa aiztures laiks 563
 — statiskā aktivitāte 551
 Adsorbenti 548...550
 Adsorberi ar plūstošu slāni 559
 — — stacionāru slāni 558
 — — suspendētu slāni 560
 Aizture, dinamiskā, 440
 — statiskā 440
 Aksiālā atplūsma 110
 Anizotropā fāze 632
 Anjonīti 570
 Aprasināšanas blīvums 440, 459
 Ārdu termiskā slodze 332
 Atgriezeniskā osmoze 657
 Atputekļošanas kamera 173
 Ātruma faktors 467
 Ātrums, fiktīvais, 88
 — nogulsnešanās 82
 — vidējais 42
 Atsālnis 645
 Augstums, ģeometriskais (ģeodēziskais), 36
 — hidrostatiskais 36
 — kinētiskais (ātruma, dinamiskais) 57
 Azeotropais šķīdums 479
 Barbotāža, brīvā, 95
 — ķēžveida 95
 Barometriskais kondensators 350
 Bernulli vienādojums 55
 Balance, enerģijas, 12
 — materiālā 11
 — siltuma 12
 Binodālā līdzsvara likne 530
 Caurtece (ražīgums, patēriņš) 41
 Cauru|vada raksturojums 138
 Cauru|veida supercentrifūga 229
 Celārijs 437
 Centrbēdzes skruberis 186
 — sūkņa jauda 135
 — — pamatvienādojums 132
 — — Q , H un N atkarība no n 135
 — — raksturliknes 136
 — — ražīgums 136
 — — salīdzinājums ar virzu|sūkņiem 139
 — — sūkšanas augstums 135
 — — vadrats 129
 Centrifūga ar pulsejošu izlādi 226
 — automatiskā 224
 — koniskā nostādinošā ar gliemežveida izlādi 227
 — pakarināta ar apakšējo izlādi 224
 — vertikālā 222
 Cikloni 174
 — koniskie 177
 — НИИОГаз 178
 Ciklonu baterija 178
 Dalambēra princips 53, 83
 Darba taisnes konstruēšana 398, 498
 — — vienādojums 397, 398, 497
 Dendrītu kristāli 650
 Desolvatācijas enerģija 646
 Desorbcija 431, 557
 Destilācija ar deflegmāciju 486
 — — ūdens tvaiku 488
 — — frakcionētā 486
 — — molekulārā 518
 — — vienkāršā 486
 Dialīze 657
 Diferenciālsūknis 116
 Difūzija, ārējā, 553, 574, 635
 — Folmēra 574

- Difūzija iekšējā, 553, 574, 635
 — Knudsena 574
 — konvektīvā 399
 — molekulārā 399
 — radiālā 110
 Dimensiju analīzes metode 24
 Dzesēšana ar ledu 343
 — — pašiztvaikošanu 343
 — virsmas dzesinātajos 344
 Dzirksteļizlāde 182
- Efektīvais aprasināšanas blīvums 445
 Efekts, hidrodinamiskais, 365
 — hidrostatiskais 364
 Eilera diferenciālvienādojumi hidrodinamikai 55
 — — hidrostatikai 33
 Ekstrakcijas baterija 639
 — procesa virzošais spēks 526
 Ekstraktori ar cietās fāzes hidraulisku transportu 643
 — — izsmidzināšanu 543
 — — pildījumu 544
 — — plauktiem — šķēršļiem 444
 — — rotējošiem diskām 545
 — — suspendētu slāni 643
 — — šķīvjiem 546
 — centrālās 545
 — karuseļveida 641
 — kolonnā 642
 — konveijerveida 641
 — lentes 642
 — pulsācijas 545
 — vertikālie maisīšanas—nostādināšanas 547
 Ekstrakts 525
 Ekvivalentais diametrs 46
 — garums 65
 Elektrodialīze 658
 Elektrofiltri 181
 — cauruļu 183
 — plākšņu 183
 Elektroosmotricācija 658
 Elektroosmoze 658
 Emulsijas kolonna 450
 Ežektors 144
- Fāžu līdzsvars 395, 478, 528
 Filtri, auduma, 202
 — cilindriskie 179
 — čaulišu 212
 — nučveida 202
 — plākšņu 204
 — smilšu 202
 Filtrspiedes, automātiskās, 210
 — kameru 210
 — rāmju 209
 Fizikālā modelēšana 26
 Flegma 486
 Flegmas skaitlis 496
 Formas faktors 84, 86
- Formula, Blaziusā, 63, 103
 — Darsi—Veisbaha 62
 — Mendeļejeva 235
 — Nikuradzes 65
 — Ņūtona 82
 — Stoksa 85
 — Sifrinsona 65
 — Tiščenko 365
 Frakcionētā kondensācija 522
- Gaisa absolūtais mitrums 583
 — entalpija 584
 — mitruma saturs 583
 — relatīvais mitrums 583
 Gāzes melnuma pakāpe 265
 Gāzu saspiešana, adiabatiska, 149
 — — izotermiska 149
 — — politropiska 150
 — šķidība 432
 Gradients, koncentrācijas, 400
 — spiediena 34
 — temperatūras 253
- Hemosorbciija (ķīmiskā sorbcija) 431, 474
 Hidrauliskais augstuma zudums 61
 — kritums 61
 — rādiuss 46
 Hidrauliski gluda virsma 64
 Hidrocikloni 235
 Hidrodinamiskais efekts 365
 Hidrostatikas pamatvienādojums 37
 Hidrostatiskais efekts 364
 — spiediens 33
 H-x diagramma 585
- Ietvaice ar siltumsūkni 380
 — vairākpakāpju 359
 — vakuumā 356
 — vienpakāpes 356
 Indukcijas periods 649
 Inžektors 144
 Ipatnējā pildījuma slapināšanās 445
 — tilpuma slodze 619
 — tvaika slodze 348
 — viskozitāte 44
 Ipatnējais absorbenta patēriņš 433
 — brīvais tilpums (porainība) 86, 435, 439
 — ekstrahenta patēriņš 531
 — siltuma plūsmas blīvums 253
 — sūknis 137
 — ūdens patēriņš 348
 Izdalīšanas pakāpe 470
 Izomorfisms, sk. jauktie kristāli
 Izotermiskā kristalizācija 646
 Izotermiskās virsmas 252
 Izotropā fāze 632
 Izsāļšana 647
 Iztaicešana caur membrānu 658

- Jauktie kristāli 645
 Jonīti, neorganiskie, 571
 — organiskie 571
 Josla, jauktās berzes, 64
 — kvadrātiskā ātruma 65
 — šlakatu (pilienu) 96
- Kaitīgā telpa 151
 Kaloriferi 381
 Kapilārā kondensācija 549
 Katjonīti 570
 Kavitācija 133
 Kinētiskā likne 425, 459, 504
 Koeficients, absolūti melna ķermeņa starošanas, 263
 — absorbcijas 433
 — adsorbcijas slāņa aiztures laika 563
 — afinitātes 552
 — aktivitātes 478
 — ārējās berzes, sk. hidrauliskās pretestības
 — ātrgaitas 137
 — difūzijas 401
 — dinamiskās viskozitātes 22, 43
 — ekstrakcijas 633
 — ekvivalentā garuma 66
 — faktiskais tilpuma lietderības 153
 — gaisa pārākuma 328
 — hidrauliskās lietderības 122
 — — pretestības 62
 — izteces 76
 — kinemātiskais viskozitātes 22, 43
 — kompresora padeves 155
 — kontrakcijas 74
 — masas atdeves 408
 — — pārejas 412
 — — — tilpuma 419, 553
 — — — virsmas 421
 — — vadītspējas 427
 — mehāniskais lietderības 124
 — pildījuma slapināšanas 445
 — plastiskās viskozitātes 46
 — relatīvās gaistamības, sk. sadales koeficients
 — sadales 478
 — sadalījuma 526, 632, 633
 — sāļu aiztures 660
 — selektivitātes 527, 633
 — siltumatdeves 267
 — siltumpārejas 289
 — siltumvadītspējas 253
 — slapināšanas 445
 — šķīvju lietderības 427
 — temperatūras vadītspējas 260
 — teorētiskais tilpuma lietderības 151
 — tiešais siltumatdeves 288
 — tilpuma lietderības 117
 — vietējās pretestības 65
 Kompresori, rotācijas, 157
 — turbokompresori 158
 — virzūkompresori 147
- Koncentrācijas polarizācija 666
 Koncentrēšanas pakāpe 663
 Kondensācija, kārtainā, 281
 — pilienu 283
 Kondensāta novadītājs ar pludiņu 320
 — — termodinamiskais 322
 — — termostatiskais 321
 Konodoma (konoda, node), sk. līdzsvara horda
 Kontakta ietvaicētāji 390
 Konvekcija, brīvā, 266
 — piespiedu 266
 Koronas izlāde 182
 Kristalizācijas metodes 646
 — siltums 646
 — statika 646
 Kristalizators ar daļēju šķīdinātāja atdalīšanu 653
 — — maisītāju un dzesēšanu 651
 — — suspendētu kristālu slāni 653
 — cilindriskais 655
 — rotējošais 662
 — šūpu 654
 — vakuuma 655
 Kristālu aizmetņu rašanās 649
 — augšanas ātrums 649
 Kritērijs, Arhimēda, 23, 85, 270
 — Bio 23, 260, 428
 — Eilera 22, 71
 — Frūda 22, 71, 174, 409
 — Furjē 24, 260, 269, 409
 — Galileja 23, 409
 — Grashofa 23, 270
 — Furjē 24, 260, 269, 409
 — hromohronais 71
 — Kutateladzes 24
 — Lagranža 88
 — Laščenko 86
 — nosakāmais 21, 269, 410
 — noteicošais 21
 — Nuselta 23, 269, 408
 — Ņūtona 19, 22
 — optimizācijas 31
 — Peklē 21, 71, 246
 — Prantla 24, 270, 409
 — Reinoldsa 21, 71, 246
 — tehnoloģiskais 34
 Kritiskais ātrums 91
 Kurināmā organiskā masa 325
 — sadedzināšana 326
 — sadegšanas siltums 325
 Kurtuves tilpuma termiskā slodze 331
 Ķermeņa efektīvais starojums 262
 — melnuma pakāpe 263
 — relatīvā starošanas spēja, sk. ķermeņa melnuma pakāpe
 Ķīmijas tehnoloģijas sistēmas 15
- Līdzības indikators 19
 — kompleksi, sk. līdzības kritēriji
 — konstante 17
 — kritēriji 18

Līdzības simpleksi 17
 — teorija 16, 268, 408
 Līdzplūsma 294
 Līdzsvara horda 530
 — koncentrācija 395
 Lietderīgā temperatūru starpība 369
 Likums, Babo, 362
 — Daltona 394
 — Fika, otrs, 405
 — — pirmais 13, 401
 — Furjē 13, 253
 — Gibsa 14
 — Kirhoifa 263
 — Konovalova 479, 481
 — Lešateljē 13
 — Ņutona atdzesēšanas 13, 266
 — par ķīmiski tehnisko funkciju lineari-
 ritāti 44
 — Paskāla 37
 — proporcionālītātes 135
 — Raula 477
 — Stefana—Bolcmaņa 262
 Lineārais efektīvais aprasīšanās blī-
 vums 446
 Maģistrālais vads 69
 Maisīšana, cirkulācijas, 251
 — mehāniskā 238
 — plūsmā 250
 — pneimatiskā 248
 Maisīšanas efektivitāte 237
 — intensitāte 237
 Maisītājs ar ārējo cirkulācijas cauruli
 249
 — — gaisa liftu 249
 — — planetāro pārvadu 240
 — centrālās dismembratora 251
 — cilindriskais 242
 — cirkulācijas 251
 — diskveida 231
 — enkurveida 239
 — ežektorveida 250
 — gravitācijas 250
 — lāpstīņu 238
 — lentas 243
 — plāksņveida 239
 — pneimatiskais 249
 — porpellerveida 241
 — rāmīveida 239
 — šķīvīveida 231
 — turbīnveida 241
 — vibrācijas 244
 Masas atdeves vienādojums 407
 — pāreja (pārnesē) 410
 — pārejas faktors 421
 — — virzošais spēks 412
 Matemātiskā modelēšana 27
 Membrānas, cietās, 660
 — difūzijas 659
 — mīkstās 660
 — polimēru neporainas 659

Membrānas, polimēru, porainas, 659
 Membrānu aparāti, cauruļveida, 668
 — — dobo šķiedru 669
 — — plakanie 667
 — — rullētie 667
 — — izvēle 663
 — — procesu kinētika 663
 — — veidi 659
 Mikrofiltrēšana 658
 Mitrā termometra temperatūra 588
 Mitruma saistība ar materiālu 582
 — vadišana 611
 Mitrums, absolūtais, 593
 — relatīvais 593
 Modelis, difūzijas, 110
 — — divparametru 111
 — — vienparametra 110
 — ideālas izspiešanas 105, 108
 — — maisīšanas 105
 — šūnu 112
 Modeļi, kombinētie, 112

Navjē—Stoksa diferenciālvienādojums
 55, 70
 Neizotermiskā absorbcija 435
 Nestacionārā siltuma plūsma 252
 Nosacītais kurināmais 326

Organiskie siltumnesēji 338
 Osmotiskais spiediens 657
 Osmoze 657

Pakāpiena (šķīvja) efektivitāte 422
 Pārnesto vienību augstums 420
 — — skaits 415
 Pārsātinātība, absolūtā, 646
 — relatīvā 646
 Pārsātinātības pakāpe 646
 Partvaices kubs 494
 Perkinsa caurule 323
 Perkolācija 637
 Piesātinātības pakāpe 470
 Pildījuma aiztures spēja 440
 — augstuma noteikšana 446
 — īpatnējā virsma 439
 — tilpuma masa 439
 — veidi 441
 Pīto (Bravē, Prantla) pneimatiskā cau-
 rule 79
 Plūsmu turbulizēšanas veidi 250
 Plūstamība 43
 Polimorfisms 646
 Porainība, sk. īpatnējais brīvais tilpums
 Pretstības iekārtas 340
 Pretplūsma 294
 Procesa intensitāte 15
 Procesi, difūzijas, sk. procesi, masas
 apmaiņas,
 — hidromehāniskie 32
 — ķīmiskie 9
 — masas apmaiņas 9, 392

- Procesi, mehāniskie, 9
 — siltuma 9, 252
 Pseudodialīze 657
 Putošanas spēja 100
 Putu īpatnējā virsma 100
 — stabilitāte 100
 Rafināde 525
 Rāsas temperatūra 588
 Reālā žāvētāva 597
 Recirkulācijas pakāpe 468, 691
 Reģenerators 333
 Rektifikācija, azeotropā, 520
 — ekstraktīvā 519
 — neorganisko sāļu klātbūtnē 521
 Rektifikācijas iekārta, nepārtrauktas darbības, 492
 — — periodiskas darbības 491
 — kolonna 494
 Rekuperators 333
 Relatīvā gaistamība, sk. sadales koeficients
 Režims, burbuļveida, 93
 — emulsijas 93
 — gredzenveida 93
 — korķveida 93
 — laminārs 47, 82, 247
 — turbulents 47, 82, 247
 Robežkārtā 48
 Saplūdes kondensatori 349
 Saspiežamības robeža 152
 Selektīvā absorbcija 472
 Sienas temperatūra 296
 Sienu raupjums 50
 Sildīšana ar augstfrekvences strāvu 342
 — — dūmgāzēm 325
 — — elektrisko strāvu 340
 — — elektrodiem 341
 — — indukcijas strāvu 342
 — — izkausētiem sāļiem un metāliem 339
 — — minerāleļļu 335
 — — pārkarsētu ūdeni 336
 — — ūdens tvaiku 303
 — — netieša, ar tvaiku, 305
 — — tieša, ar tvaiku, 303
 Sildīšanas aparātu intensifikācija 324
 Sildītāji ar dubultcaurulēm 314
 — — ribotām caurulēm, sk. kaloriferi
 — — tvaika apvalku 307
 — caurule—caurulē 310
 — cauruļveida 308
 — glodeņveida 305
 — plākšņveida 316
 — sekcijveida 310
 — spirālveida 314
 — vairākpakāpju 309
 Siltuma atdeve 266
 — caurules 323
 — (entropijas) diagramma 485
 Siltuma izolācija 297
 — izolatori 254
 — kopējā termiskā pretestība 289
 — līdzība 268
 — pāreja (pārnese) 288
 — starošana 261
 — — gāzēs 264
 — vadīšana 254
 — vadīšanas diferenciālvienādojums 250
 Siltumnesējs 302, 582
 Siltumvadītspējas termiskā pretestība 289
 Skruberis 185, 439
 Slānis, fontanejošais, 90
 — pseudosašķidrināts, sk. slānis, suspensdēts,
 — suspensdēts 89
 — verdošs 90
 Stacionārā siltuma plūsma 252
 Strūklu režims 96
 Sūkņa celšanas augstums 121, 132
 Sūkņi, aksiālie, 140
 — gaisa lifta 144
 — montežū (monžūsi) 143
 — rotācijas 142
 — skrūvju 141
 — speciālie 140
 — strūklas 144
 — virpusūkņi 140
 — zobratu 142
 Šķidro sistēmu fāžu līdzsvars 476
 Šķidrums, bingemie, 46
 — dilatantie 46
 — ideālie 32
 — Ņūtona 45
 — pseudoplastiskie 46
 — reālie 32
 Šķiduma viršanas temperatūra 361
 Šķīvja efektivitāte, sk. pakāpiena efektivitāte
 — lietderības koeficients 427
 Šķīvji ar divām fāžu kontakta joslām 453
 — — S veida elementiem 452
 — — vārstiem 454
 — — vienvirziena kustību 454
 — caurteces 453
 — kaskādveida 455
 — sietveida 452
 — Infiluksa, sk. šķīvji ar S veida elementiem
 — zvanu 451
 — zvīņveida 455
 — žalūzijveida 455
 Temperatūras depresija 363
 — gradients 253
 — vadītspējas koeficients 259
 Teorēma, Federmana—Bekinhēma 20
 — Kirpičova 19

Teorēma, Kirpičova—Guhmana, 21
— Ņūtona 18
— π 20
Teorētiskā zāvētava 597
Teorētiskais koncentrācijas maiņas pakāpiens 426
— šķivis, sk. teorētiskais koncentrācijas maiņas pakāpiens
Termosifons 323
Turile 437
Tvaiks, ekstra, 355
— primārais 355
— sekundārais 355

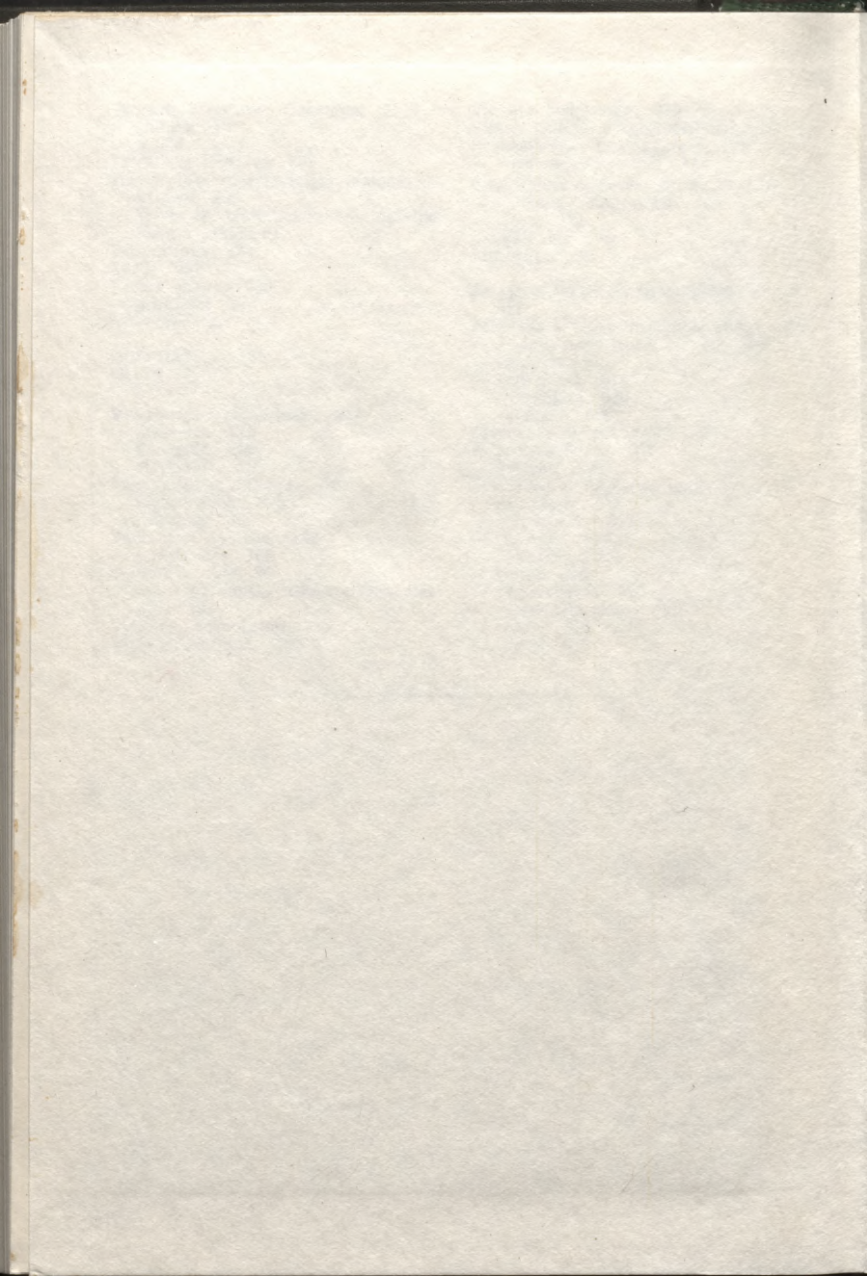
Ultrafiltrācija 658
Uzgaļi 77

Vakuumfiltri, cilindriskie, 213
— diskveida 215
— lentveida 216
— šķivjveida 216
Vakuumsūkņi, difūzijas, 165
— ežektorveida 165
— rotācijas 163
Ventilatori, aksiālie, 167
— centrālās 166
Venturī caurule 80
Vidējā logaritmiskā temperatūras starpība 294
Virsmas kondensatori 345
Viršana, kārtainā, 280

Viršana, kodolveida, 279
Virzūsūknis, abpusējas darbības, 115
— membrānas (diafragmas) 127
— vienpusējas darbības 114
Virzūsūkņa celšanas augstums 121
— indikatora diagramma 125
— jauda 124
— ražīgums 116
Viskozitāte 43

Zāvējamā materiāla temperatūra 608, 611
Zāvēšana ar augstfrekvences strāvu 629
— — infrasarkanajiem stariem 628
— kontakta 623
— konvektīvā 614
— molekulārā 630
— vakuumā 626
Zāvēšanas periodi 607
— procesa liknes 607
— varianti 599
Zāvētavas ar zāvējamā materiāla izmīdzināšanu 619
— cilindriņveida 617
— cilpveida 617
— kameras 625
— lentes 615
— pneimatiskās 620
— suspendēta slāņa 621
— tuneļa 614
— veltnu 623

P
5
R
29
R
R
i-



KE

16.7
1993

LATVIJAS NACIONĀLA BIBLIOTEKA



0306114512

Kontrolēksamplārs

