

Ķīmijas tehnoloģijas procesi un aparāti

Izmeklētas nodaļas

Jurijs Ozoliņš

Mācību līdzeklis
2022

Jurijs Ozoliņš

Ķīmijas tehnoloģijas procesi un aparāti
Izmeklētas nodaļas

Mācību līdzeklis

RTU Izdevniecība
Rīga 2022

Jurijs Ozoliņš. Ķīmijas tehnoloģijas procesi un aparāti. Izmeklētas nodaļas. Mācību līdzeklis.

Rīga: RTU Izdevniecība, 2022. 142 lpp.

Grāmata paredzēta kā palīglīdzeklis studentiem, kas apgūst kursu „Ķīmijas tehnoloģijas pamatprocesi un aparāti.” Grāmatā izklāstītās tēmas var būt arī noderīgas inženieriem – tehnoloģiem ķīmiskajās ražotnēs, it sevišķi, kas saistītas ar cietu un birstošu materiālu tehnoloģiskajiem procesiem.

Darbā aplūkoti un analizēti ķīmisko iekārtu un aparātu izgatavošanai pielietojamie materiāli, parādīti šo materiālu klasifikācijas principi atbilstoši starptautiskajiem standartiem. Aplūktas tehnoloģisko cauruļvadu sistēmas, to standartizācijas principi un pielietojamā cauruļvadu armatūra. Īpaša uzmanība ir pievērsta cietu un birstošu materiālu tehnoloģiskajiem procesiem. Apskatīti cietu birstošu materiālu klasifikācijas, transportēšanas, dozēšanas paņēmieni un iekārtas. Atsevišķas nodaļas veltītas sīkdispersu vielu aglomerācijas, kā arī cietu materiālu smalcināšanas procesiem.

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

Redaktore	Ginta Poriete
Tehniskā redaktore	Baiba Puriņa
Dizains	Baiba Puriņa
Vāka dizains	Paula Lore

ISBN 978-9934-22-xxx-x (print)
978-9934-22-xxx-x (pdf)

© Jurijs Ozoliņš, 2022
© Rīgas Tehniskā universitāte, 2022

Saturs

Priekšvārds.....	6
1. ĶĪMISKAJĀ RŪPNIECĪBĀ IZMANTOJAMIE MATERIĀLI.....	7
1.1. Metāli ķīmiskajā mašīnbūvē	8
1.1.1. Mehāniskās, fizikālās un tehnoloģiskās īpašības	8
1.1.1.1. Spriegums, stiprība, deformācija, elastības modulis.....	8
1.1.1.2. Cietība	10
1.1.1.3. Fizikālās īpašības	11
1.1.1.4. Metālu noturība pret koroziju	14
1.1.1.5. Metālu tehnoloģiskās īpašības.....	15
1.1.2. Dzelzi saturošie metāli.....	15
1.1.2.1. Oglekļa tērauds.....	15
1.1.2.2. Leģētais tērauds	17
1.1.2.3. Metālu lējumi.....	20
1.1.3. Krāsainie metāli un kausējumi	23
1.1.3.1. Alumīnijs un tā kausējumi	24
1.1.3.2. Varš un tā kausējumi	25
1.1.3.3. Niķelis un tā kausējumi.....	27
1.1.3.4. Titāns un tā kausējumi	28
1.1.3.5. Svins	28
1.2. Polimēru materiāli, to īpašības un izmantošana	29
1.2.1. Termoplasti.....	30
1.2.2. Reaktoplasti.....	32
1.2.3. Elastomēri.....	33
1.3. Kompozītmateriāli.....	34
1.4. Neorganiskie materiāli.....	35
1.4.1. Stikls.....	35
1.4.2. Keramika	36
2. CAURUĻVADI UN ARMATŪRA.....	38
2.1. Tehnoloģiskie cauruļvadi.....	38
2.2. Cauruļvados izmantojamie materiāli.....	42

2.3. Cauruļu savienošana	43
2.4. Cauruļu termiskā deformācija	45
2.5. Cauruļvadu stiprināšana.....	48
2.6. Cauruļvadu izolācija.....	49
2.7. Cauruļvadu grafiskā attēlošana	50
2.8. Armatūra	51
3. BIRSTOŠU MATERIĀLU GLABĀŠANA, TRANSPORTĒŠANA, DOZĒŠANA	57
3.1. Silosi un bunkuri	58
3.2. Birstošu materiālu transportēšana	65
3.2.1. Lentas konveijeri	65
3.2.2. Skrāpju konveijeri.....	67
3.2.3. Elevatori.....	69
3.2.4. Gliemežtransportieri.....	71
3.2.5. Pneimotransports.....	72
3.3. Birstošu materiālu dozēšana.....	75
4. CIETU MATERIĀLU ŠĶIROŠANA (KLASIFIKĀCIJA).....	78
4.1. Dispersu birstošu materiālu granulometriskā sastāva noteikšana, sietu analīze	79
4.2. Materiālu sijāšana	83
4.2.1. Nekustīgo ārdū siets.....	85
4.2.2. Cilindriskie sieti	85
4.2.3. Šūpojamie plakanie sieti.....	86
4.2.4. Vibrāciju sieti	88
5. MATERIĀLU AGLOMERĀCIJA	89
5.1. Aglomerātu īpašības	90
5.1.1. Produktu forma, lielums un izmēru sadalījums	90
5.1.2. Aglomerātu mehāniskā stiprība	90
5.1.3. Aglomerātu porainība.....	92
5.2. Daļiņu saistīšanās mehānisms.....	93
5.3. Aglomerācija, daļiņām augot	96
5.4. Aglomerācija presējot	101
5.5. Pulverveida materiāla tabletēšana	105

5.5.1. Tabletēšanas tehnoloģija un galvenās likumsakarības.....	105
5.5.2. Tabletēšanas iekārtas.....	108
5.5.3. Tablešu kvalitātes kontrole.....	110
6. CIETU MATERIĀLU SMALCINĀŠANA	112
6.1. Smalcināšanas teorētiskie pamati.....	115
6.2. Smalcinātāju konstrukcijas.....	119
6.2.1. Žokļu drupinātāji	120
6.2.2. Koniskie drupinātāji.....	125
6.2.3. Veltņu drupinātāji	128
6.2.4. Skrejdzirnavas.....	130
6.2.5. Veseru dzirnavas.....	131
6.2.6. Dezintegratori	132
6.2.7. Ložu dzirnavas.....	133
6.2.8. Planetārās dzirnavas	136
6.2.9. Vibrāciju dzirnavas	137
6.2.10. Gāzes strūklas dzirnavas.....	138
6.2.11. Koloīdās dzirnavas	139
PAPILDU LITERATŪRA.....	141

Priekšvārds

Grāmata „Ķīmijas tehnoloģijas procesi un aparāti. Izmeklētas nodaļas” ir iecerēta kā mācību palīglīdzeklis RTU Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultātes studentiem, kuri mācās programmā „Ķīmija un ķīmijas tehnoloģija”. Šajā darbā ir aplūkoti jautājumi, kas ir ļoti svarīgi inženierim – ķīmiķim tehnologam praktiskajā darbā ķīmiskā ražotnē un kas netiek pietiekami dziļi apskatīti kursā „Ķīmiskās tehnoloģijas pamatprocesi un aparāti”.

Pirmā nodaļa ir veltīta ķīmisko iekārtu un aparātu izgatavošanai izmantoto materiālu raksturlielumu analīzei. Dots šo materiālu klasifikācijas princips, aplūkoti nozīmīgākie metāliskie un nemetāliskie materiāli, to svarīgākās īpašības, sastāvs un lietojums, kā arī apzīmējumi atbilstīgi LV EN, GOST un DIN EN standartiem.

Otrajā nodaļā aplūktas neatņemamas tehnoloģisko līniju sastāvdaļas – tehnoloģisko cauruļvadu sistēmas. Dots ieskats cauruļvadu standartizācijā, to savienošanas, stiprināšanas un izolācijas paņēmienos. Studenti tiek iepazīstināti ar svarīgākajiem cauruļvadu armatūras veidiem, tajā skaitā noslēdzošo, regulējošo, drošības un fāžu sadalošo armatūru.

Trešā un ceturrtā nodaļa veltīta ar cietiem birstošiem materiāliem saistītajiem tehnoloģiskajiem procesiem. Galvenā vērība pievērsta šo materiālu šķirošanas jeb klasifikācijas veidiem, ieskaitot sietu analīzi, aplūkoti birstošu materiālu glabāšanas, transportēšanas un dozēšanas paņēmieni, kā arī lietojamās iekārtas.

Divas pēdējās grāmatas nodaļas veltītas cietu izejmateriālu vai arī galaprodukta sagatavošanai atbilstīgi konkrētām tehnoloģiskā procesa vai kvalitātes prasībām. Bieži sīkdispersas vai pulverveida vielas kā starpproduktu vai gala produktu nevar izmantot, tām jābūt noteiktas formas gabalu veidā ar noteiktām fizikālām īpašībām. Šādos gadījumos izmanto daļiņu izmēru palielināšanas jeb aglomerācijas paņēmienus. Aplūktas svarīgākās aglomerātu īpašības, aglomerācijas procesa teorētiskie pamati, populārākie aglomerācijas paņēmieni un izmantojamās iekārtas. Atsevišķa nodaļa veltīta pulverveida materiālu tabletēšanai, aplūkoti paņēmieni tabletēšanai no pulveriem, galvenie tablešu kvalitātes rādītāji un tabletēšanas iekārtu darbības principi. Pretējs process aglomerācijai ir cietu materiālu smalcināšana, kas ir ārkārtīgi svarīgs process ķīmiskajā tehnoloģijā, jo praktiski jebkura heterogēna procesa intensitāte ir lielā mērā atkarīga no attiecīgā masas fāžu kontakta laukuma. Daudzus materiālus, piemēram, pigmentus, pildvielas, lieto tikai sīkdispersu pulveru veidā. Ķīmisko rūpniecību raksturo ārkārtīgi liela smalcināmo materiālu, smalcināšanas pakāpes un iekārtu daudzveidība. Grāmatā sniegti smalcināšanas procesu klasifikācijas un teorētiskie pamati, aprakstīti galvenie smalcināšanas veidi un iekārtas, to konstrukcija un darbības principi.

Prof. Jurijs Ozoliņš

1. ĶĪMISKAJĀ RŪPNIECĪBĀ IZMANTOJAMIE MATERIĀLI

1.

Ļoti plašais ķīmiskajā rūpniecībā iegūstamo produktu klāsts nosaka ne tikai lielu izmantojamo aparātu un iekāru skaitu, bet arī rūpīgu materiālu izvēli.

Ķīmisko iekārtu un aparātu izgatavošanai lietojamus materiālus izvēlas, ievērojot to ekspluatācijas īpašības un ņemot vērā ekonomiskos apsvērumus. Galvenie kritēriji, izvēloties materiālus, ir to:

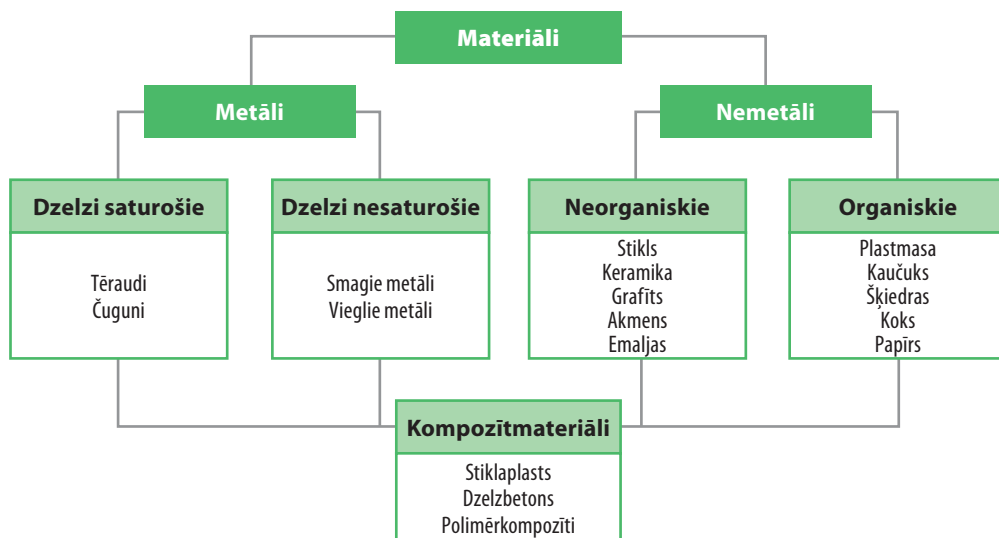
- ♦ mehāniskās īpašības,
- ♦ fizikālās īpašības,
- ♦ korozijas izturība,
- ♦ cena.

Turklāt būtiska nozīme ir materiālu cenai. No vienas puses, nebūtu pareizi izmantot ļoti dārgus materiālus, ja tehniskajiem nosacījumiem pilnībā atbilst arī lētāki vai arī izgatavojamās iekārtas ekspluatācijas (dzīves) laiks ir ļoti īss. No otras puses, nav izdevīgi izvēlēties ļoti lētus materiālus, kas rada nepieciešamību iekārtas bieži remontēt un var radīt lielas papildu izmaksas.

Ķīmiskajā mašīnbūvē lietotos materiālus var iedalīt trīs pamatgrupās:

- ♦ metāli,
- ♦ nemetāliskie materiāli,
- ♦ kompozītmateriāli.

Materiālu iedalījums attēlots shēmā (1.1. att.).



1.1. att. Materiālu iedalījums.

Runājot par materiālu iedalījumu, jāpiemin arī palīgmateriāli. Tos var iedalīt divās lielās grupās:

- ♦ materiāli, kas nepieciešami iekārtu ekspluatācijai (smērvielas, dzesējošie šķīdumi u. c.),
- ♦ materiāli, kas nodrošina iekārtu ilgmūžību (laku un krāsu pārklājumi, speciālie aizsargpārklājumi u. c.).

1.1. Metāli ķīmiskajā mašīnbūvē

Visi materiāli, kas tiek izmantoti ķīmiskajās iekārtās, ir ļoti precīzi jāpārbauda laboratorijā. Mašīnām, aparātiem, cauruļvadiem, kontroles ierīcēm jābūt ilgzsturīgām, tās nekādā gadījumā nedrīkst pasliktināt drošību darba vietā, tāpēc pirms izmantošanas jāiepazīstas ar izmantojamo materiālu īpašībām.

1.1.1. Mehāniskās, fizikālās un tehnoloģiskās īpašības

Aplūkosim metālu svarīgākās mehāniskās, fizikālās un tehnoloģiskās īpašības. Mehāniskās un fizikālās īpašības raksturo metāla tehnisko lietojumu, savukārt tehnoloģiskās īpašības – izmantojamo materiālu apstrādāšanas iespējas.

1.1.1.1. Spriegums, stiprība, deformācija, elastības modulis

Metāli, tāpat kā jebkuri citi materiāli, deformējas mehāniskā sprieguma iedarbībā. Spriegums raksturo spēkus, kas materiālā rodas, iedarbojoties no ārienes pieliktam spēkam. Spriegumu parasti aprēķina, attiecinot pielikto spēku uz pārbaudāmā parauga sākotnējo šķērsriezuma laukumu. Materiāla mehāniskā stiprība raksturo tā spēju nesagrūstot izturēt noteiktu spriegumu. Atkarībā no noteikšanas veida izšķir stiprību stiepē, liecē, bīdē u. c. Metālu stiprību parasti vērtē, nosakot metāla paraugu dinamometrisko sakarību līdz tā sagraušanas brīdim (1.2. att.).

Stiepes diagramma parāda sakarību starp slodzi (P), kas darbojas uz paraugu, un tā deformāciju jeb absolūto pagarinājumu (Δl) (1.2. (b) att.). Sakarība starp absolūto pagarinājumu un paraugam pielikto slodzi sastāv no lineārā A apgabala, kurā novērojama elastīgā deformācija, un liknes AB apgabala, kas atbilst plastiskai deformācijai. Punktā D materiāls tiek sagrauts.

Attiecinot paraugam pieliktā spēka P vērtību uz tā sākotnējo šķērsriezuma laukumu S_0 , iegūst sprieguma lielumu σ

$$\sigma = \frac{P}{S_0}, \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \text{MPa}, \quad (1.1.)$$

kur σ – spriegums, Pa;

P – spēks, N;

S_0 – šķērsriezuma laukums, mm^2 .

Ķermeņa spēju deformēties pieliktā spēka ietekmē raksturo relatīvā deformācija, ko aprēķina, pagarinājumu Δl attiecinot uz parauga sākotnējiem izmēriem:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 \%, \quad (1.2.)$$

kur Δl – parauga pagarinājums, mm;

l_0 – parauga sākotnējais garums, mm.

Materiāla stiprība stiepē ir maksimālais spriegums, ko materiāls iztur pirms sagraušanas:

$$R = \frac{P_{\max}}{S_0}, \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \text{MPa}, \quad (1.3.)$$

kur P_{\max} – maksimālais spēks, Pa;

S_0 – šķērsriezuma laukums, mm^2 .

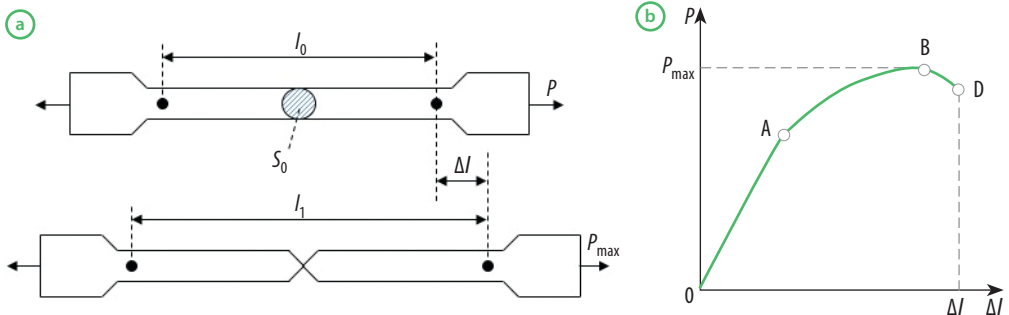
Slogošanas sākumposmā paraugs pagarinās tieši proporcionāli pieliktajai slodzei. Sprieguma un deformācijas lineāro sakarību šajā posmā apraksta Huka likums:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \text{MPa}, \quad (1.4.)$$

kur σ – spriegums, Pa;

ε – deformācija, %;

E – elastības modulis, MPa.



1.2. att. Parauga deformācija stiepē: (a) apaļas formas paraugs, (b) stiepes diagramma.

Elastības modulis jeb Junga modulis ir svarīgs materiālu raksturojošs lielums. Tas raksturo materiāla pretestību stiepes elastīgajai deformācijai. Elastības modulis ir atkarīgs no vielas uzbūves, tās termiskās apstrādes utt.

1.1.1.2. Cietība

Cietība ir spēks, ar kādu materiāls pretojas cita materiāla mehāniskai iedarbībai. Metālu cietību nosaka ar vairākām metodēm.

Pēc Mosa cietības skalas šķir desmit cietības klases. Mosa skala raksturo materiāla cietību, nosakot tā spēju saskrāpēt mīkstāku materiālu. Mosa skala sastāv no desmit dabā sastopamiem minerāliem, kas, izmantojot kārtas skaitļus, kalpo par etalonu cietības noteikšanai no mīkstākā (1) līdz cietākajam (10).

Cietību nosaka, ņemot mīkstāko minerālu no etalonu skalas, ar ko var ieskrāpēt pētāmo materiālu (1.1. tabula). Piemēram, ja metālu var ieskrāpēt ar apatītu, bet nevar ar fluorītu, tad tā cietību pēc Mosa skalas vērtē ar 4,5.

1.1. tabula
Mosa skala

Cietība	Minerāls	
1	Talks	$Mg_3H_2Si_4O_{12}$
2	Ģipsis	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
3	Kalcīts	$CaCO_3$
4	Fluorīts	CaF_2
5	Apatīts	$Ca_5F(PO_4)_3$
6	Laukšpats	KAl_3SiO_8
7	Kvarcs	SiO_2
8	Topāzs	$Al_2F_2SiO_4$
9	Korunds	Al_2O_3
10	Dimants	C

Cietību var noteikt arī pēc Brineļa metodes. Gluda materiāla virsmā ar noteiktu slodzi P iespiež rūdīta tērauda lodīti, kuras diametrs ir D (mm) (1.3. att.).

Ar Brineļa metodi cietību (HB) nosaka, dalot slodzi ar sfēriskā iespaiduma laukumu:

$$HB = \frac{P}{S} = \frac{2P}{\pi D \sqrt{D^2 - d^2}}, \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}, \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \quad (1.5.)$$

kur P – slodze, kG, N;

S – sfēriskā iespaiduma laukums, mm^2 ;

D – lodītes diametrs (10; 5; 2,5 mm);

d – iespaiduma diametrs, mm.

Cietību parasti nosaka pēc tabulām, eksperimentāli ar mikroskopa palīdzību fiksējot iespaiduma diametru milimetros. Metodi rekomendē, ja HB nav lielāks par 450 kg/mm^2 .

Plānu detaļu un virsmas slāņu cietības noteikšanai lieto Vikersa metodi, iespiežot materiālā četrstūra dimanta piramīdu (1.4. att.).

Cietību pēc Vikersa metodes nosaka, attiecinot piramīdai pielikto slodzi pret piramīdas iespaiduma virsmas laukumu:

$$HB = \frac{P}{S} = 1,8544 \frac{P}{d^2}, \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}, \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \quad (1.6.)$$

kur P – slodze, kg, N;

S – piramīdas iespaiduma laukums, mm^2 ;

d – vidējais diagonāles garums, mm.

Slodzi izvēlas atkarībā no pārbaudāmā materiāla (5, 10, 20, 30, 50, 100, 120 kg). Eksperimentāli nosaka iespaiduma diagonāles garumu.

1.1.1.3. Fizikālās īpašības

Svarīgākās metālu fizikālās īpašības ir blīvums, kušanas temperatūra, elektrovadītspēja, siltumvadītspēja, termiskā izplešanās, kas lielā mērā nosaka to izmantošanas sfēru.

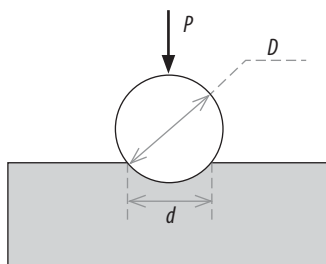
Blīvums

Par vielas blīvumu (ρ) sauc tilpuma vienībai atbilstīgo vielas masu:

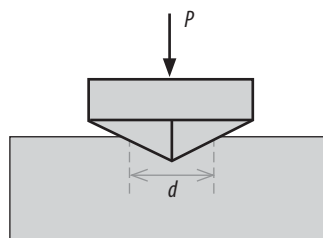
$$\rho = \frac{m}{V}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \quad (1.7.)$$

kur m – ķermeņa masa, kg;

V – tilpums, m^3 .



1.3. att. Cietības pārbaude pēc Brineļa metodes.



1.4. att. Cietības pārbaude pēc Vikersa metodes.

Atsevišķu vielu blīvums parādīts 1.2. tabulā.

1.2. tabula
Vielas blīvums

Viela	Blīvums, kg/m ³	Viela	Blīvums, kg/m ³
Ūdens	1000	Varš	8900
Alumīnijs	2700	Svins	11 300
Tērauds	7850	Volframs	19 270

Kušanas temperatūra

Katrai vielai ir noteikta temperatūra, kad tā no cieta stāvokļa pāriet šķidrā. Šo temperatūru sauc par vielas kušanas temperatūru. Precīza kušanas temperatūra ir raksturīga tikai tīrām vielām (1.3. tab.). Metāla sakausējumiem, piemēram, tēraudam, nosaka kušanas temperatūras intervālu.

1.3. tabula
Metālu kušanas temperatūra

Metāls	$t_{\text{kuš}}, ^\circ\text{C}$	Metāls	$t_{\text{kuš}}, ^\circ\text{C}$
Alva	232	Varš	1083
Svins	327	Dzelzs	1536
Alumīnijs	659	Volframs	3410

Elektrovadītspēja

Elektrovadītspēja raksturo materiāla, ķermeņa spēju vadīt elektrisko strāvu. Elektrovadītspēja ir apgriezts lielums elektriskai pretestībai. SI sistēmā elektrovadītspējas mērvienība ir Sīmenss (S) jeb Ω^{-1} . Konkrētā materiāla spēju vadīt strāvu raksturo īpatnējā elektrovadītspēja (σ), to izsaka Sīmensos uz metru (S/m). Ļoti labi elektrovadītāji ir sudrabs, varš, alumīnijs. 1.4. tabulā parādīta dažādu materiālu īpatnējā elektrovadītspēja procentos no sudraba vadītspējas.

1.4. tabula
Elektrovadītspēja procentos no sudraba vadītspējas $62500 \cdot 10^3 \frac{\text{S}}{\text{m}}$

Metāls	%	Metāls	%
Sudrabs	100	Cinks	27
Varš	93	Dzelzs	16
Alumīnijs	59	Tērauds	12

Siltumvadītspēja

Metāla siltumvadītspēju raksturo siltumvadītspējas koeficients λ , W/m·k (1.5. tab.). Siltuma vadišana metālos notiek galvenokārt brīvo elektronu kustības rezultātā. Brīvie elektroni kustas no vietām ar augstāku temperatūru uz vietām ar zemāku temperatūru un otrādi. Pirmajā gadījumā tie atdod enerģiju atomiem, otrajā gadījumā – atņem. Tā kā metālos siltuma un elektriskās enerģijas nesēji ir elektroni, tad to siltumvadītspējas un elektrovadītspējas koeficienti ir proporcionāli. Metālu siltumvadītspēja ir atkarīga no metāla struktūras, īpašībām un piemaisījumiem. Parasti pat nelieli piemaisījumi būtiski mazina metālu siltumvadītspēju. Piemēram, tīra vara siltumvadītspējas koeficients $\lambda = 396$ W/m·k, ja vara struktūrā ir arsēna pēdas, tad $\lambda = 142$ W/m·k.

1.5. tabula

Metālu siltumvadītspējas koeficienti 20 °C temperatūrā

Metāls	$\lambda, \frac{W}{m \cdot k}$	Metāls	$\lambda, \frac{W}{m \cdot k}$
Sudrabs	418	Cinks	110
Varš	396	Dzelzs	67
Zelts	294	Tērauds	46
Alumīnijs	210	Titāns	16

Termiskā izplešanās

Metālus sildot, tie izplešas, bet dzesējot – saraujas. Sākotnējo izmēru palielināšanos vai samazināšanos, temperatūrai mainoties par vienu grādu, raksturo lineārās izplešanās koeficients (α). Konstruktijas vai detaļas sākotnējais izmērs l_0 , to uzsildot līdz temperatūrai t , ir:

$$l = l_0 (1 + \alpha \cdot t). \quad (1.8.)$$

Dažu metālu lineārās izplešanās koeficientu orientējošās vērtības parādītas 1.6. tabulā.

1.6. tabula

Metālu lineārās izplešanās koeficienti

Metāls	$\alpha \cdot 10^{-6}, K^{-1}$	Metāls	$\alpha \cdot 10^{-6}, K^{-1}$
Varš	26,7	Dzelzs	11,9
Alumīnijs	23,9	Cinks	32,6
Volframs	45,0	Titāns	7,1

Ir pazīstami metālu kausējumi ar ļoti maziem lineārās izplešanās koeficientiem, kurus lieto precīzu mērinstrumentu izgatavošanai. Kausējums, kas sastāv no 36 % Ni un 64 % Fe un ir pazīstams ar nosaukumu invara kausējums, praktiski neizplešas temperatūras intervālā no $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ līdz $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1.1.1.4. Metālu noturība pret koroziju

Metāliem, ko lieto ķīmiskajā mašīnbūvē, jābūt noturīgiem pret koroziju. To nevērtē pēc korozijas iekļūšanas ātruma metāla tilpumā, bet gan pēc masas zuduma, attīrot metāla paraugu no korozijas produktiem. Korozijas ātrumu Z (mm/gadā) aprēķina ar formulu:

$$Z = \frac{K \cdot 10^{-3}}{\rho}, \quad (1.9)$$

kur K – masas zudums, g/m^2 gadā;

ρ – metāla blīvums, g/cm^3 .

Metālu noturību pret koroziju vērtē 10 ballu skalā (1.7. tab.).

1.7. tabula

Metālu noturība pret koroziju

Noturības grupa	Balles	Korozijas ātrums, $\frac{\text{mm}}{\text{gada}}$
Pilnīgi noturīgi	1	< 0,001
Diezgan noturīgi	2	0,001–0,005
	3	0,005–0,01
Noturīgi	4	0,01–0,05
	5	0,05–0,1
Samazināta noturība	6	0,1–0,5
	7	0,5–1,0
Maznoturīgi	8	1,0–5,0
	9	5,0–10,0
Nenoturīgi	10	> 10,0

Ķīmisko iekārtu un aparātu izgatavošanai izmanto metālus, kas atbilst vismaz četrām ballēm, korozijas ātrumam nepārsniedzot 0,01 mm/gadā līdz 0,05 mm/gadā.

1.1.1.5. Metālu tehnoloģiskās īpašības

Tehnoloģiskās īpašības raksturo metālu spēju pakļauties atšķirīgām tehnoloģiskām operācijām un to derīgumu dažādiem apstrādes paņēmieniem. Svarīgākās metālu tehnoloģiskās īpašības ir apstrādājamība, kaļamība, šķidrplūstamība, metināmība, sarukums.

Apstrādājamība ir materiāla spēja pakļauties metālapstrādei, šajā gadījumā – griešanai. Izmantojot griezējinstrumentus, tiek mainīti materiāla izmēri un forma. Virsmas kvalitāte pēc apstrādes ir atkarīga no metāla cietības, stiprības un plastiskuma. Mazinoties plastiskumam, apstrādājamība griežot uzlabojas.

Kaļamība ir karsta vai auksta metāla spēja, spiediena ietekmē nesagrūstot, plašās robežās mainīt formu un izmērus. Kaļamība galvenokārt ir atkarīga no metāla plastiskuma un spējas karstā stāvoklī mazāk pretoties deformācijai.

Šķidrplūstamība ir metāla spēja šķidrā stāvoklī aizpildīt formu, nodrošinot viendabīgu, blīvu lējuma iegūšanu. Metāla šķidrplūstamību nosaka kausējuma viskozitāte.

Par metāla sarukumu sauc izkausēta metāla tilpuma samazināšanos, tam sacietējot un atdzīstot līdz istabas temperatūrai. Attiecīgo lineāro izmēru izmaiņas, kas izteiktas procentos, sauc par lineāro sarukumu.

Metināmība ir metāla spēja noteiktā temperatūrā veidot divu vai vairāku detaļu kvalitatīvus savienojumus kontaktvietās. Metālu metināmība ir dažāda un ir atkarīga no to ķīmiskā sastāva.

1.1.2. Dzelzi saturošie metāli

Dzelzs un oglekļa sakausējumu, kura sastāvā parasti ir līdz 2 % oglekļa, sauc par tēraudu. Kausējums var saturēt arī citus elementus: mangānu, silīciju, sēru, fosforu u. c. Pēc ķīmiskā sastāva tēraudu var iedalīt oglekļa tēraudā un leģētā tēraudā.

1.1.2.1. Oglekļa tērauds

Oglekļa saturs tēraudā būtiski ietekmē tā kvalitāti. Pieaugot oglekļa daudzumam, pastiprinās robežstiprība stiepē, samazinās plastiskums, palielinās materiāla trauslums un pasliktinās tērauda metināmība.

Tēraudu, kas satur līdz 0,25 % C, sauc par zema oglekļa satura tēraudu, no 0,25 % līdz 0,6 % C – par vidēja oglekļa satura tēraudu un ar oglekļa saturu no 0,6 % līdz 2 % – par augsta oglekļa satura tēraudu.

Tērauda apzīmēšanai ir izstrādātas noteiktas normas un standarti. Saskaņā

ar Eiropas standartu EN 10027 tēraudu apzīmē divos veidos:

- ◆ pēc to mehāniskajām vai fizikālajām īpašībām;
- ◆ pēc to ķīmiskā sastāva.

Tērauda apzīmējums pēc mehāniskajām īpašībām saskaņā ar EN 10027 sastāv no simbola – robežstiprības (N/mm^2) – papildu simbola.

1.8. tabula

Tērauda apzīmēšanai lietotie simboli

Simboli	Tēraudu grupa
S	Vispārīgas nozīmes konstrukcijas tērauds
E	Mašīnbūves tērauds
P	Tērauds spiediena traukiem
L	Tērauds cauruļvadiem
M	Elektrotehniskais tērauds

Papildus simboli raksturo atšķirīgus apstrādes veidus, citus mehāniskās stiprības rādītājus, piemēram, triecienizturību noteiktā pārbaudes temperatūrā.

Parastās kvalitātes tērauds atbilst LVS EN 10025:2001:

S 235:

- S – vispārīgas nozīmes konstrukcijas tērauds
- 235 – minimālā robežstiprība stiepē 235 N/mm^2

S 355 J2 +N

- S – vispārīgās nozīmes tērauds
- 355 – minimālā robežstiprība stiepē 355 N/mm^2
- J2 – trieciena sagraušanas darbs 27 J $-20\text{ }^{\circ}C$ temperatūrā
- N – normāli atlaidināts

Pasaulē tiek lietoti ne tikai Eiropas standarti, bet arī apzīmējumi un tērauda markas saskaņā ar Krievijas standartu GOST. Parastās kvalitātes tēraudu saskaņā ar GOST 380 apzīmē šādi: simbols – tērauda marka – papildu apzīmējums.

Parastās kvalitātes tērauds atbilstīgi GOST 380-2005:

Ст О

- Ст – tērauda apzīmējums „сталь”

O – tērauda marka atkarībā no ķīmiskā sastāva (satur oglekli, C < 0,23 %).

CT 4

CT – tērauda apzīmējums

4–4 markas tērauds, satur 0,18–0,27 % oglekļa, var saturēt mangānu un silīciju.

1.

Ķīmiskajā aparātu būvē plaši izmanto uzlabotas kvalitātes oglekļa tēraudu. Atbilstīgi DIN EN 10027 tos klasificē pēc ķīmiskā sastāva, respektīvi, pēc oglekļa satura tēraudā.

Augstas kvalitātes tērauds atbilstīgi DIN EN 10027:

C 35

C – uzlabotas kvalitātes tērauds,

35 – oglekļa saturs $35/100 = 0,35$ %.

C 70 D

C – uzlabotas kvalitātes tērauds,

70 – oglekļa saturs $70/100 = 0,70$ %,

D – domāts stiepleņu izgatavošanai.

Atbilstīgi GOST 1050 kvalitatīva tērauda oglekļa saturs ir no 0,05 % līdz 0,65 %. Atbilstīgi šim standartam tēraudu apzīmē ar skaitļiem:

60 markas tērauds

60 – oglekļa saturs $69/100 = 0,6$ %

Uzlabotās kvalitātes tērauds var saturēt minimālu daudzumu fosfora (līdz 0,3 %) un sēra (līdz 0,04 %). Šo tēraudu raksturo īpaša stiprība un nodilumizturība. No tā gatavo metinātus aparātu korpusus, siltummaiņu korpusus, cauruļu plates, glodenes, dažādas iekārtu detaļas.

1.1.2.2. Leģētais tērauds

Lai uzlabotu tērauda fizikālās, mehāniskās, ķīmiskās un tehnoloģiskās īpašības, tajā papildus ievada dažādus leģējošus elementus: niķeli, hromu, mangānu, molibdēnu, titānu, volframu u. c.

Hroms būtiski uzlabo tērauda korozijas noturību. Uz virsmas veidojas ļoti plāns, stabils, pasivēts Cr_2O_3 slānis. Hroma piedevs palielina arī tērauda stiprību, pieaugot hroma saturam, tas kļūst trauslāks un grūtāk apstrādājams.

1.

Ļoti svarīgs leģējošais elements ir niķelis, kas palielina tērauda stiprību, nemazinot plastiskumu un triecienizturību. Šādu tēraudu var veidot zemās temperatūrās. Niķeļa piedevas uzlabo arī tērauda korozijas noturību.

Molibdēns palielina tērauda karstumizturību un korozijas noturību pret halogēniem, sulfātiem, sulfītiem, organiskajām skābēm, fosforskābi.

Volframs ir metāls ar ļoti augstu kušanas temperatūru ($t_{kuš} = 3400\text{ °C}$). To izmanto karstumizturīga tērauda iegūšanai, par obligātu leģējošo elementu volframu izmanto, iegūstot supercietu tēraudu.

Titānu pievieno tēraudam, lai uzlabotu mehāniskās īpašības, karstumizturību un korozijas noturību. Titāna piedevas samazina graudu izmērus, pieaug blīvums, uzlabojas apstrādājamība.

Vanādijs uzlabo tēraudu cietību un stiprību, kā arī būtiski palielina nodilumizturību.

Mangāns palielina tēraudu cietību un nodilumizturību. Pieaugot mangāna daudzumam, tērauds kļūst trauslāks.

Vara piedevas uzlabo materiāla korozijas noturību galvenokārt pret atmosfēras iedarbību un sērskābi.

Atkarībā no leģējošo elementu satura materiālā leģēto tēraudu iedala:

- ◆ mazleģētā tēraudā, leģējošo elementu saturs nepārsniedz 5 %,
- ◆ augsti leģētā tēraudā, leģējošo elementu saturs ir lielāks par 10 %.

Saskaņā ar Eiropas standartu EN 10083 leģēto tēraudu apzīmē atbilstīgi ķīmiskajam sastāvam, izmantojot ciparu un burtu kombinācijas. Leģējošo elementu saturu tēraudā nosaka, veselos skaitļus dalot ar faktora koeficientu (1.9. tab.).

1.9. tabula

Ķīmisko elementu faktora koeficienti

Koeficients	Leģējošais elements
4	Cr, Co, Mn, Ni, Si, W
10	Al, Cu, Mo, Ta, Ti, V
100	C, P, N, S

Piemēram, mazleģēts hroma, niķeļa molibdēna tērauds:

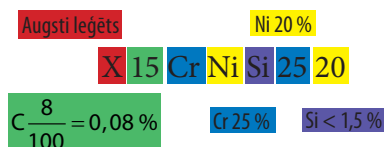
Ni, Mo ar zemu saturu, < 1,5 %

34 Cr Ni Mo 6

$$C \frac{34}{100} = 0,34\%$$

$$Cr \frac{6}{4} = 1,5\%$$

Augsti leģēto tēraudu atbilstīgi DIN EN 10088 apzīmē ar burtu X pirms tērauda marķējuma. Leģējošo elementu daudzumu uzrāda procentos, piemēram:



1.

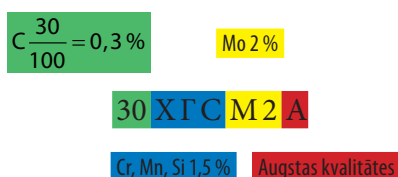
Leģētos tēraudus atbilstīgi amerikāņu standartam *AISI* (*American Iron and Steel Institute*) apzīmē, izmantojot četrus ciparus. Pirmie divi cipari apzīmē tērauda grupas numuru, kam atbilst noteikts leģējošo piedevu saturs. Otri divi cipari uzrāda vidējo oglekļa daudzumu tēraudā procentu simtdaļās. Piemēram, leģēts tērauds 8725 ir 87xx grupas tērauds, kas satur vidēji 0,55 % Ni, 0,50 % Cr un 0,25 % Mo. Vidējais oglekļa saturs ir 0,25 %.

Augsti leģētos tēraudus pēc *AISI* apzīmē ar trīs cipariem, papildus var tikt izmantots viens vai divi burti. Pirmais cipars norāda uz tērauda klasi, pēdējie divi cipari nosaka tērauda kārtas numuru grupā. Piemēram, nerūsējošais tērauds 304 pieder pie austenīta tēraudiem, satur <0,08 % C, vidēji 18 % Cr, 10 % Ni. Nerūsējošais tērauds 316 ir 304 tērauda uzlabotā versija, pievienojot vidēji 2,5 % Mo.

Atbilstīgi GOST-454371 leģēto tēraudu apzīmē ar burtu un ciparu kombināciju. Leģējošos elementus apzīmē ar šādiem burtiem: X – hroms, H – niķelis, T – titāns, M – molibdēns, Γ – mangāns, C – silīcijs, B – volframs, Φ – vanādijs u. c. Cipari, kas atrodas marķējuma priekšā, apzīmē oglekļa saturu tēraudā procentu simtdaļās. Leģējošo elementu daudzumu norāda procentos, piemēram:



Leģēto tēraudu saskaņā ar GOST iedala trīs grupās: kvalitatīvs tērauds, augstas kvalitātes un īpaši augstas kvalitātes tērauds. Augstas kvalitātes tēraudus apzīmē ar burtu A, īpaši augstas kvalitātes tēraudu apzīmē ar burtu „III” marķējuma beigās, piemēram:



1.

Leģēto tēraudu ļoti plaši izmanto ķīmiskajā mašīnbūvē iekārtu, ķīmisko aparātu un dažādu detaļu izgatavošanai. No mazleģēta tērauda, kas satur līdz 5 % leģējošo elementu, izgatavo iekārtu korpusus, atlokus, cauruļu plates. Piemēram, no 12 MX, 20 M markas tērauda izgatavo tvaika vadus, kolektoros, kurus var ilgstoši ekspluatēt 500 °C temperatūrā, savukārt no 15 Mo3 markas tērauda izgatavo tvaika vadus un detaļas, ko var ekspluatēt, ja spiediens ir līdz 100 bar. No augsti leģēta tērauda izgatavo iekārtas un atsevišķas detaļas, kas jāekspluatē palielinātas slodzes apstākļos (zobrati, vārpstas, maisītāji, ekstrūderu gliemeži), cauruļvadus un armatūru, kas darbojas agresīvā vidē, augstas temperatūras un spiediena gadījumā. Piemēram, no X5CrNiMoCu21–8, 4X18H25C2 markas tērauda izgatavotas detaļas un atsevišķus iekārtu mezglus var ekspluatēt temperatūras intervālā no –200 °C līdz +800 °C augsta spiediena gadījumā. Aparāti, kas izgatavoti no leģētā tērauda, ir vieglāki, izturīgāki un ekspluatācijā drošāki, salīdzinot ar līdzīgām iekārtām, kas izgatavotas no oglekļa tērauda. Tajā pašā laikā jāņem vērā, ka iekārtas un aparāti no leģētā tērauda vienmēr būs dārgāki. Pareizā izvēle jāizdara, pamatojoties uz tehniski ekonomiskiem aprēķiniem.

1.1.2.3. Metālu lējumi

Metālu lējumus var iedalīt divās grupās:

- ◆ tērauda lējumi,
- ◆ čuguni.

Tērauda lējumi

Par tērauda lējumiem sauc jebkurā formā izlietu tēraudu, turklāt izšķir parastā tērauda lējumus un leģētā tērauda lējumus. Tērauda lējumus lieto gadījumos, kad jāiegūst sarežģītas formas un augstas kvalitātes izstrādājumi.

Atbilstīgi DIN 17006 neleģētā tērauda lējumus apzīmē ar burtiem GS (*Stahlguß*) un cipariem, kas raksturo minimālo robežstiprību stiepē, piemēram:

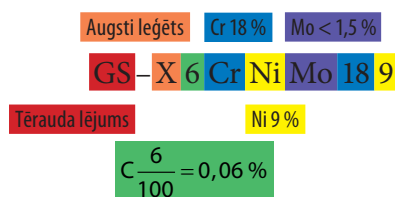
GS–60
Tērauda lējums Robežstiprība stiepē > 600 N/mm²

Īpaši augstas kvalitātes tērauda lējumu apzīmējumos uzrāda arī to sastāvā esošos elementus, piemēram:

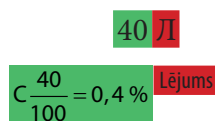
GS–42 CrMo
Tērauda lējums Minimālā stiprība stiepē > 420 N/mm²

Izmanto dinamiski noslogotu detaļu, spiediena tvertņu, sūkņu un kompresoru korpusu izgatavošanai.

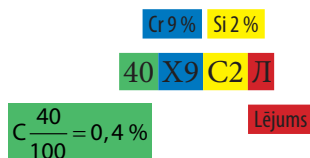
Augsti leģētā tērauda lējumi pēc sastāva, mehāniskajām īpašībām un korozijas noturības atbilst tipiskam nerūsējošam tēraudam. Nerūsējošā tērauda lējumus izmanto sūkņu korpusu un atsevišķu detaļu, cauruļvadu armatūras un atsevišķu elementu izgatavošanai, kas strādā agresīvā vidē. To apzīmējumos parasti uzrāda izmantotos leģējošos elementus, piemēram:



Saskaņā ar GOST 977-88 vispārīgas nozīmes nelegēta tērauda detaļu izgatavošanai lējumus apzīmē, piemēram:



Augsti leģētos tērauda lējumus apzīmē, piemēram:



Arī šajos gadījumos leģēta tērauda lējuma apzīmējumos uzrāda izmantotos leģējošos elementus.

Čuguns

Čuguns ir dzelzs sakausējums ar pietiekami augstu oglekļa saturu – no 2 % līdz 4,5 %. Čuguna īpašības galvenokārt ir atkarīgas no oglekļa un citu piemaisījumu daudzuma čuguna sastāvā: silīcijs (līdz 3 %), mangāns (līdz 1 %), fosfors (līdz 1 %), sērs (līdz 0,15 %). Atkarībā no oglekļa daudzuma un tā stāvokļa kausējumā iegūst dažādas čuguna markas.

Plašais čuguna lietojums pamatojas uz tā optimālām tehnoloģiskām un ekspluatācijas īpašībām (lejamība, apstrādājamība), kā arī tehniski ekonomiskiem

1.

rādītājiem.

Ogleklis čuguna sastāvā var atrasties gan saistītā (cementīts Fe_3C), gan brīvā – grafīta – veidā. Turklāt grafīta forma un metāliskās pamatnes forma lielā mērā nosaka čuguna tipu un īpašības.

Atkarībā no izmantotā grafīta iedalījumu veida izšķir šādus čuguna veidus:

- ♦ baltais čuguns – viss ogleklis ir saistītā, cementīta Fe_3C veidā;
- ♦ pelēkais čuguns – ogleklis galvenokārt ir nesaistītā, lameļu veidā;
- ♦ īpaši izturīgs čuguns – ogleklis ir nesaistītā, sfēru veidā;
- ♦ kaļamais čuguns – iegūst, termiski apstrādājot balto čugunu, grafīts tajā atrodas nesaistītā, pārslu veidā.

Saskaņā ar vācu DIN normām DIN 17006 pelēko čugunu apzīmē šādi, piemēram:

GG-30

Pelēkais čuguns (*Grauguss*) Minimālā robežstiprība stiepē 300 N/mm²

Saskaņā ar GOST 1412-85 ražo virkni pelēkā čuguna marku, kuru apzīmēšanai izmanto burtus „C” – pelēkais un „Ч” – čuguns, piemēram:

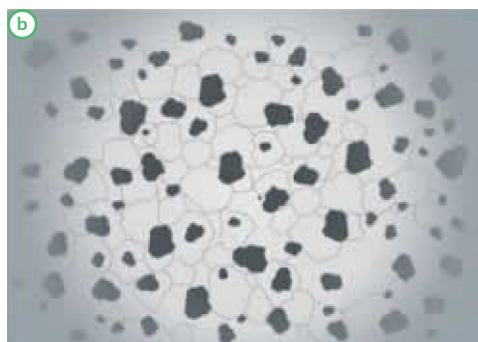
Ч-25

Pelēkais čuguns Minimālā robežstiprība stiepē 250 MPa

Atbilstīgi Eiropas normām DIN EN 1561 pelēkā čuguna apzīmējumos papildus parāda, kādā formā atrodas ogleklis, piemēram:

EN-GJL-300

Pelēkais čuguns C – lameļa veidā Minimālā robežstiprība stiepē 300 N/mm²



1.5. att. Čuguna struktūra ar grafīta ieslēgumiem lameļu (a) un sfēru (b) veidā.

Augsti izturīgo čugunu atbilstīgi Eiropas normām DIN EN 1563 apzīmē šādi, piemēram:

Deformācija 15 %
EN – GJ S – 400 – 15
Pelēkais čuguns C – svēru veidā Minimālā robežstiprība stiepē 400 N/mm²

Čugunu, kas satur grafitu lamēlu formā, raksturo augsta nodilumizturība, to ir viegli apstrādāt. Savukārt sfēriskā grafitā struktūra nodrošina augstu čuguna robežstiprību stiepē, vienlaikus saglabājot labas deformācijas īpašības.

Atkarībā no struktūras un īpašībām čugunu ļoti plaši izmanto dažādu iekārtu korpusu, kā arī cilindru, virzuļu, zobratu, kloķvārpstu izgatavošanai.

Čuguna īpašības uzlabo, izmantojot legējošas piedevas vai termiski apstrādājot. Legējot ar Ni (5 %), Cr (0,8 %) iegūst nodilumizturīgu čugunu. Korozijas izturīgu čugunu iegūst, legējot ar Ni, Cr, Ti, Cu.

1.1.3. Krāsainie metāli un kausējumi

Modernajā mašīnbūvē krāsainos metālus un to kausējumus izmanto ļoti plaši, jo dažas to īpašības ir būtiski labākas par attiecīgajām čuguna vai tērauda īpašībām. Pie krāsainajiem metāliem pieder alumīnijs, cinks, niķelis, varš, alva, svins u. c. Krāsainos metālus izmanto galvenokārt kausējumu veidā. Atsevišķu populārāko metālu īpašības ir apkopotas 1.10. tabulā.

1.10. tabula
Krāsaino metālu īpašības

Metāls		Blīvums, kg/m ³	$t_{kušr}$, °C	Stiprība stiepē, N/mm ²	Siltumvadītspēja, W/m·K
Alumīnijs	Al	2700	658	80	209
Cinks	Zn	7100	419	150	113
Alva	Sn	7300	232	20	66
Niķelis	Ni	8800	1450	400	93
Varš	Cu	8800	1083	220	384
Sudrabs	Ag	10 500	960	180	418
Svins	Pb	11 400	327	90	35
Platīns	Pt	21 400	1764	150	70

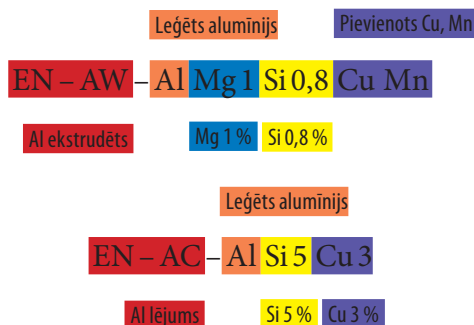
1.1.3.1. Alumīnijs un tā kausējumi

Pēc skābekļa un silīcija alumīnijs ir dabā izplatītākais elements. Alumīnija blīvums ir 2700 kg/m^3 , tā kušanas temperatūra ir $658 \text{ }^\circ\text{C}$. Alumīnija blīvums veido 1/3 no dzelzs blīvuma, tātad detaļas svars no alumīnija ir 1/3 no līdzvērtīgas dzelzs detaļas svara. Alumīnijam ir lieliska siltuma un elektrovadītspēja, uz tā virsmas veidojas blīvs un izturīgs oksīda slānis, kas nodrošina augstu korozijas noturību.

Minēto īpašību dēļ alumīniju plaši izmanto aparātu, dažādu tvertņu, transporta konteineru, siltuma apmainītāju elementu izgatavošanai ķīmiskajā, farmaceitiskajā un pārtikas rūpniecībā. Farmaceutiskā rūpniecībā alumīniju izmanto galvenokārt par iepakojamo materiālu (aerosolu baloni, pastu tūbas, blisteri).

Alumīnija īpašības, īpaši mehānisko stiprību, būtiski var uzlabot, izmantojot tādus legējošus elementus kā magniju, varu, mangānu, silīciju, dzelzi. Alumīnija kausējuma lējumi ar silīciju, magniju un varu pazīstami ar nosaukumu „silumīns”, savukārt „dūralumīnijs” ir plastisks alumīnija kausējums ar varu, magniju, mangānu, silīciju un dzelzi.

Atbilstīgi Eiropas normām DIN EN 573 un DIN EN 178 u. c. materiālus no alumīnija marķē, izmantojot noteiktu burtu un ciparu kombināciju, piemēram:



Atbilstīgi GOST 1583-89 E lējumus no alumīnija kausējuma apzīmē, piemēram, šādi:



1.1.3.2. Varš un tā kausējumi

Pateicoties izcilajai siltuma un elektrovadītspējai, kā arī ļoti labām tehnoloģiskajām īpašībām, varam ir ļoti svarīga nozīme ķīmiskajā mašīnbūvē. Varu un tā kausējumus izmanto praktiski visur, kur jānodrošina laba siltuma pāreja. To var lietot arī ļoti zemās temperatūrās un lielas temperatūras diferences gadījumā, jo tas nekļūst trausls un saglabā elastību. Varš ir noturīgs pret koroziju atmosfēras ietekmē, ūdenī un vājās skābēs.

Eksistē dažādas nelegēta vara markas, kuru lietojums ir atkarīgs no to īpašībām. Piemēram, tehniskais elektrovarš, kas lieliskās elektrovadītspējas dēļ tiek izmantots visu veidu vadu, kabeļu, kontaktu izgatavošanai. Atbilstīgi Eiropas normām to apzīmē šādi:

EN **Cu**–**ETP**
Varš **Elektrotehniskais**

Aparātu varš ir dezoksidēts varš ar definētu fosfora atlikumu, to raksturo lieliska siltumvadītspēja, to ir viegli lodēt un metināt. Galvenās lietošanas sfēras ir cauruļvadi siltumtechnikā un aukstumtechnikā, ūdens un gāzes apgādes sistēmās, iekārtu atsevišķu elementu izgatavošanā. Atbilstīgi Eiropas normām minēto varu apzīmē šādi:

EN **Cu**–**DHP**
Varš **Aparātu**

Varu visbiežāk izmanto nevis tīru, bet tā kausējumus ar dažādiem legējošiem elementiem. Piemēram, mazlegēts varš ENCuSi2Mn, bez vara satur 2 % silīcija un nedaudz mangāna. Materiālam piemīt varam raksturīgās īpašības. Papildus tam ir paaugstināta cietība un lielāka korozijas izturība. Izmanto siltummaiņos un aukstumtechnikā. Rūpniecībā plaši lieto vara kausējumus ar cinku, alvu, niķeli, alumīniju.

Vara un cinka kausējums (misiņš)

Pievienojot varam no 5 % līdz 45 % cinka, iegūst materiālu zeltītā krāsā, ko sadzīvē sauc par misiņu. Palielinot cinka saturu kausējumā, būtiski pieaug tā stiprība, saglabājot deformatīvās īpašības (līdz 43 % Zn satura).

Vara un cinka kausējumi uzrāda tikpat labu korozijas izturību atmosfēras un ūdens ietekmē kā tīrs varš, taču to elektrovadītspēja un siltumvadītspēja būtiski mazinās ($\lambda_{\text{misiņam}} = 93 \text{ W/m}\cdot\text{K}$).

Atbilstīgi Eiropas normām misiņu apzīmē ar burtu un ciparu kombināciju, piemēram:

1.

EN Cu Zn 30

Vara kausējums Zn 30 %

Atbilstīgi GOST 15527-70 misiņa markas apzīmē šādi, piemēram:

Л 63

Misiņš 63 % Cu, 37 % Zn un piemaisījumi

No misiņa izgatavo radiatoru caurulītes, kapilārus, glodenes, detaļas, kas tiek ekspluatētas ūdens vidē ar augstu spiedienu. No misiņa lējumiem, piemēram, G – CuZn40Mn2, izgatavo cauruļvadu armatūru (ventiļi, krāni) un iekārtu elementus.

Vara un alvas kausējums (bronzā)

Šādi kausējumi parasti satur no 3 % līdz 15 % alvas, kā arī citas piedevas nelielā daudzumā, piemēram, niķeli, cinku, svinu. Bronzu raksturo lielāka stiprība, antifrikcija un labas antikorozīvās īpašības. Siltumvadītspēja, salīdzinot ar varu, ir būtiski mazāka un veido apmēram 64 W/m·K.

Atbilstīgi Eiropas normām bronzu apzīmē šādi, piemēram:

EN Cu Sn 6

Vara kausējums Sn 6 %

Atbilstīgi GOST 613-79 alvas bronzu apzīmē šādi, piemēram:

Zn 7 % Ni 1 %

Бр О Ц С Н 3-7-5-1

Bronza Sn 3 % Pb 5 %

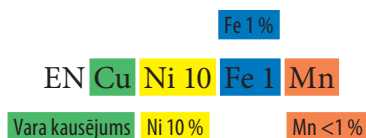
Vara saturs šajā bronzā attiecīgi ir 84 %.

Bronzu izmanto, lai izgatavotu sūkņu darba ratus, antifrikcijas ieliktņus, armatūras elementus. Bronzas lējumos bez vara un alvas ir arī citu legējošo elementu piedevas, piemēram, G – CuSn5Zn5Pb5. Izgatavo ūdens tvaika armatūras un speciālo sūkņu korpusus, detaļas, kas tiek ekspluatētas lielas slodzes gadījumā.

Vara un niķeļa kausējums (melhiors)

Vara un niķeļa kausējumi sastāv no vara, kam pievienots no 5 % līdz 45 % niķeļa un citi elementi, kas būtiski palielina izturību pret koroziju. Īpaši jūras ūdenī, kad ir liels ūdens plūsmas ātrums, materiālam ir lieliska noturību pret kavitāciju un eroziju.

Atbilstīgi Eiropas standartam vara un niķeļa kausējumus apzīmē šādi, piemēram:



Melhioru atkarībā no sastāva izmanto medicīnas instrumentu izgatavošanai, speciālas nozīmes termostatos, siltummaiņos. Galvenais lietojuma veids ir dažādas iekārtas un aparāti, kas kontaktē ar jūras ūdeni: caurules, siltummaiņi, kondensatori, klimatiekārtas u. c.

1.1.3.3. Niķelis un tā kausējumi

Niķelis ir smags metāls, kam piemīt augsta korozijas noturība un karstumizturība. Tas ir pietiekami noturīgs ūdenī, sālskābē, sārmos. Koncentrētās skābēs uz niķeļa virsmas veidojas pasivējošs slānis. Tīru metālu izmanto par katalizatoru, piemēram, nepiesātināto taukskābju hidrēšanā, speciālās laboratorijas iekārtās. Niķelis ir viens no svarīgākajiem leģējošiem elementiem, kas būtiski uzlabo tēraudu un citu metālu kausējumu īpašības. Tā kā niķelis ir ļoti dārgs metāls, to izmanto galvenokārt kausējumu veidā kopā ar citiem leģējošiem elementiem. To īpašības un marķējumu nosaka DIN EN 10095 standarts „Karstumizturīgie tēraudi un niķeļa leģējumi”. Niķeļa leģējumiem bieži lieto komercnosaukumus, piemēram:

- ♦ konstantāns – satur 40 % Ni, 59 % Cu, 1 % Mn. To raksturo augsta īpatnējā elektriskā pretestība, izmanto termopāros, sildelementos, reostatos;
- ♦ nihroms – satur 60 % Ni, 40 % Cr. To raksturo augsta termiskā izturība, lieto termopāros.

Ļoti sūros apstākļos var ekspluatēt tā saucamos niķeļa superleģējumus, piemēram, *Inconel 718* satur virkni leģējošo elementu NiCr19Fe19Nb5Mo3, ko izmanto turbīnu elementu izgatavošanai. Superleģējumu NiCr16Co9W3AlTi izmanto aviācijā augstspiediena turbīnu spārnu izgatavošanai.

No niķeļa iegūst speciālus karstumizturīgus materiālus, piemēram, NiCr 80 20 – izgatavo sildelementus, kas darbojas temperatūrās līdz 1250 °C.

1.1.3.4. Titāns un tā kausējumi

Titānam piemīt augsta cietība un izcilas antikorozīvas īpašības, kuras rada pasivējošs TiO_2 slānis uz metāla virsmas. Salīdzinot ar tēraudu, titāns ir viegls metāls ($\rho = 4500 \text{ kg/m}^3$). Augstās cietības un viegluma dēļ to plaši izmanto aviācijas tehnikā, savukārt antikorozīvās īpašības nosaka tā izmantošanu ķīmiskajās iekārtās un implantos medicīnā.

Nelegētu titānu izmanto ķīmiskajās iekārtās, kurās atrodas hloru un hlorīdus saturoši šķīdumi. Problemātiska ir titāna mehāniskā apstrāde, īpaši tā metināšana.

Titānu leģē ar vanādiju, alumīniju, alvu, hromu, kas galvenokārt uzlabo leģējuma mehāniskās īpašības un arī korozijas noturību, piemēram, TiV13Cr11Al3 vai TiAl6V6Sn2 . Šie materiāli ir ļoti stipri (robežstiprība stiepē ir ap 1200 N/mm^2) ar izcilām antikorozīvām īpašībām. No tiem izgatavo siltummaiņus, kas darbojas agresīvā vidē jūras ūdens atsāļošanas iekārtās, kā arī cauruļvadus, medicīnas instrumentus.

1.1.3.5. Svins

Svins ir ļoti smags un mīksts metāls. Savu īpašību dēļ tas netiek izmantots par konstrukciju metālu. Svinu raksturo arī lieliskas antikorozīvas īpašības, galvenokārt pret skābju iedarbību, piemēram, sērskābi, tas ir noturīgs pret bromu.

Svinu izmanto ķīmiskajā mašīnbūvē galvenokārt par cauruļvadu aizsargpārklājumu, arī tvertnēs.

Svins tiek lietots, lai aizsargātu no gamma un rentgenstarojuma pacientus dažādu pārbaužu laikā, kā arī analītiskajās iekārtās. Svinu izmanto arī par leģējošo elementu, lai piešķirtu metāliem specifiskas īpašības. Svins un tā kausējumi ir indīgi, un, strādājot ar tiem, jāievēro drošības tehnikas prasības.

1.2. Polimēru materiāli, to īpašības un izmantošana

Polimēru materiāliem ir aizvien lielāka nozīme visās dzīves sfērās. To ķīmiskās, fizikāli mehāniskās, elektriskās īpašības ir par pamatu daudzveidīgam lietojumam dažādās nozarēs. No polimēru materiāliem izgatavo presētus un lietus gatavus izstrādājumus, caurules, folijas, plates, šķiedras, izolācijas materiālus, tvertnes, zobratu un citus izstrādājumus.

Salīdzinot ar metāliem vai keramiskiem materiāliem, polimēru materiāliem ir virkne priekšrocību:

- ◆ polimēru detaļas un konstrukcijas ir vieglas (polimēru materiālu blīvums ir robežās no 900 kg/m³ līdz 1400 kg/m³);
- ◆ plašs fizikāli mehānisko īpašību spektrs (no cieta materiāla līdz elastīgam);
- ◆ viegli pārstrādājams (ekstrūzija, liešana, vakuumbūvēšana, izpūšana);
- ◆ laba noturība pret skābēm, sārmu, sāļu šķīdumiem;
- ◆ labas siltumizolācijas un elektroizolācijas īpašības;
- ◆ salīdzinoši zema cena.

Blakus šīm pozitīvajām īpašībām polimēru materiāliem piemīt arī virkne īpašību, kas mazina to lietošanas iespējas:

- ◆ ierobežota siltumietilpība, lielākā daļa no polimēru materiāliem var lietot līdz +100 °C temperatūrā;
- ◆ praktiski visi ir degoši;
- ◆ ierobežota stiprība un formas stabilitāte, īpaši sildot;
- ◆ viegli šķīst;
- ◆ augsta gāzes un tvaika caurlaidība;
- ◆ salīdzinoši neliela ilgizturība un ātra novecošana.

Polimērus var klasificēt pēc dažādām pazīmēm, piemēram, pēc iegūšanas ķīmiskās reakcijas (polimerizācijas, polikondensācijas polimēri), pēc ķīmiskās uzbūves (poliolefīni, poliesteri, poliamīdi u. c.). Praksē polimērus ļoti bieži klasificē pēc to mehāniskajām un termiskajām īpašībām.

Pēc šīm pazīmēm polimērus var iedalīt trīs lielās grupās:

- ◆ termoplasti;
- ◆ reaktoplasti;
- ◆ elastomēri.

Šo iedalījumu viennozīmīgi nosaka polimēru makromolekulārā uzbūve un struktūra.

Termoplasti sastāv no lineārām vai sazarotām makromolekulām. Istabas

temperatūrā tie ir cieti materiāli. Paaugstinot temperatūru, tie kļūst termoplastiski, pēc tam šķidri. Izkausēti termoplasti spēj pieņemt noteiktu formu, bet atdziestot – sacietē. Pāreju no cietas vielas uz kausējumu un atpakaļ var daudzkārt atkārtot, vairākkārt pārstrādājot termoplastus izstrādājumos ar dažādām plastmasas pārstrādes metodēm. Populārākie termoplasti ir polietilēns, polivinilhlorīds, polipropilēns, polistirols, polietilēntereftalāts u. c.

Reaktoplasti (termoreaktīvie polimēri) ir plastmasas, kuras pārstrādājot gatavos izstrādājumos, notiek neatgriezeniskas ķīmiskas reakcijas, iegūstot nekūstošus un nešķīstošus materiālus. Termoreaktīvie polimēri sastāv no makromolekulām, kas ir savstarpēji šķērssaitītas ar ķīmiskām saitēm. Šāda režģveida struktūra ir nemainīga. Sildot reaktoplasti nekļūst plastiski, sagrūst telpiskās struktūras, ko pavada materiāla destrukcija.

Reaktoplastu cietēšana, iegūstot gatavus izstrādājumus, notiek augstā temperatūrā (80–160 °C), kas ir tā saucamā, karstā cietēšana, bet zemās temperatūrās – aukstā cietēšana. Cietēšana notiek, veidojoties šķērssaitēm starp makromolekulām, mijiedarbojoties funkcionālām grupām vai ievadot materiālā speciālus reaģentus – cietinātājus.

Pateicoties sazarotai tīklveida struktūrai, reaktoplastiem piemīt no termoplastiem atšķirīgas īpašības. Tos raksturo īpaša stiprība, elastības modulis, termiska izturība. Reaktoplasti parasti satur daudz pildvielu – šķiedras, kvēpus, minerālās pildvielas u. c. Visizplatītākie ir reaktoplasti uz fenolformaldehīda, epoksīda, poliesteru, karbamīda sveķu, poliuretāna bāzes.

Elastomēri sastāv no daļēji „sašūtām” makromolekulām. Slodzes ietekmē tie var deformēties, piemēram, deformācija var sasniegt vairākus simtus procentu. Noņemot slodzi, tie atgūst sākotnējo formu. Sildot elastomēri nekļūst termoplastiski, palielinot temperatūru notiek to termodestrukcija. Pie elastomēriem pieder visdažādākie kaučuki, gumijas u. c.

Turpmāk apskatīsim atsevišķu polimēru veidus, to lietošanu.

1.2.1. Termoplasti

Polietilēns 

Polietilēnu iegūst etilēna polimerizācijas procesā. Izšķir zema un augsta blīvuma polietilēnu. Zema blīvuma polietilēnu iegūst gāzes fāzē, kad spiediens ir ~ 2500 bar, bet temperatūra ir 200 °C, tad procesa rezultātā rodas makromolekulu ķēdes ar īsiem atzarojumiem. Augsta blīvuma polietilēnu iegūst, izmantojot zemu spiedienu (0,3–0,5 MPa), ~ 80 °C temperatūru un katalizatoru.

Rodas lineāras makromolekulas ar zemu sazarotības pakāpi, bet kristāliskuma pakāpe sasniedz ~ 85 %, uzlabojot polimēra fizikāli mehāniskās īpašības.

Polietilēns ir viens no visvairāk ražotajiem polimēriem. Darba temperatūra ir robežās no $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ līdz $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, izturīgs pret skābēm, sārmiem, sāļu šķīdumiem, labas dielektriskās īpašības. Plaši lieto, izgatavojot visdažādākās cauruļveida sistēmas, tajā skaitā ūdensvada caurules, savukārt ķīmiskajās iekārtās izmanto polietilēna tvertnes, sietus, pildķermeņus, dažādas konstruktīvas detaļas, to izmanto arī par antikorozīvo pārklājumu.



Polivinilhlorīdu iegūst vinilhlorīda polimerizācijas procesā. Polivinilhlorīds ir otrs nozīmīgākais polimēru materiāls. Tā darba temperatūra ir no $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ līdz $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, tas ir ļoti noturīgs pret skābēm, sārmiem, spirtiem, eļļām, benzīnu. Benzolā, hlorītos, ogleņūdeņražos uzbriest. Polivinilhlorīdu var metināt un līmēt. No tā izgatavo visdažādākās caurules, tvertnes, kanālus, dažādas detaļas, iekārtu un reaktoru oderējumu.



Polipropilēnu iegūst propilēna polimerizācijas rezultātā. Darba temperatūra polipropilēnam ir no $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ līdz $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$, to raksturo augstas fizikāli mehāniskās un dielektriskās īpašības, noturīgs pret skābēm, sārmiem, eļļām pat paaugstinātā temperatūrā. Temperatūrā virs $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ šķīst aromātiskajos ogleņūdeņražos.

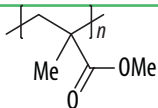
No polipropilēna izgatavo caurules, tvertnes, filtrpreses plates, kolontipa aparātu detaļas, izmanto cauruļu un tvertņu oderēšanai.



Politetrafluoretilēnu jeb ftoroplastu iegūst tetrafluoretilēna polimerizācijas procesā. To var ekspluatēt ļoti plašā temperatūras intervālā no $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ līdz $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$, ķīmiski izturīgākais polimērs, noturīgs praktiski pret visiem ķīmiskajiem reaģentiem. Virsmu raksturo neliels berzes koeficients. Materiālu nevar līmēt un metināt. Presējot ftoroplasta pulveri, iegūst gatavas detaļas.

No ftoroplasta izgatavo iekārtu daļas, ko ekspluatē agresīvā vidē un paaugstinātā temperatūrā – caurules, blīvējumus, ventiļus. Lokšņu veidā izmanto iekārtu, reaktoru oderēšanai.

Polimetilmetakrilāts



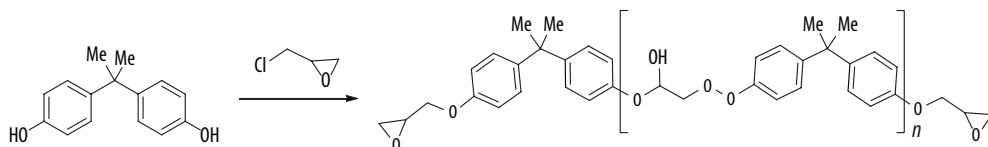
1.

Polimetilmetakrilātu iegūst, polymerizējot metakrīlskābes metilēsteri. Caurspīdīgs materiāls, laiž cauri redzamo un UV gaismu. Temperatūrās, kas augstākas par 120 °C, materiāls kļūst mīksts. Izmanto galvenokārt lokšņu veidā kā organisko stiklu. Izgatavo caurspīdīgus kupolus, iekārtu detaļas, cauruļvadus.

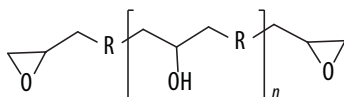
1.2.2.Reaktoplasti

Fenoloplasti ir plastmasas, ko iegūst, paaugstinātās temperatūrās sacietējot fenola formaldehīda sveķiem kopā ar dažāda veida pildvielām. Fenola formaldehīda sveķus iegūst fenola un formaldehīda polikondensācijā. Atkarībā no apstākļiem iegūst lineāras uzbūves produktu – novolaku vai sazarotas struktūras polimērus – rezolus. Fenoplastus raksturo labas mehāniskās, elektroizolācijas un antikorozīvas īpašības. Izgatavo detaļas un elementus mašīnām, elektrotehniskām iekārtām, ķīmiski izturīgus aparātu korpusus, caurules, zobratrus, spararatus, bremžu klučus u. c.

Epoksīdsveķi ir oligomēri, to makromolekulu sastāvā jābūt vismaz divām epoksīdgrupām, kas cietinātāja klātbūtnē var veidot sašūtas telpiskas struktūras. Epoksīdu polimēru cietēšana notiek, to gala grupām reaģējot ar cietinātājiem – diamīniem un poliamīniem, dikarbonskābju aldehīdiem u. c.

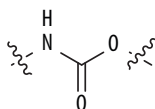


Epoksīdu polimēri vispārīgā veidā:

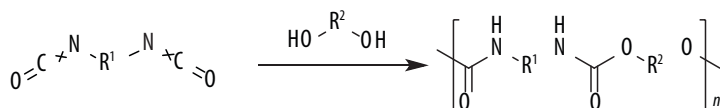


Cietējošām epoksīdu sveķu kompozīcijām piemīt liela mehāniskā izturība, spēja saistīties ar dažādiem materiāliem, tos izmanto laku, līmju, hermetizējošu materiālu izgatavošanai, kopā ar stikla oglekļa šķiedrām iegūst kompozītmateriālus, ko izmanto par konstruktīviem materiāliem.

Poliuretāni ir lielmolekulāri savienojumi, kuri satur uretāngrupas:



Poliuretānus iegūst glikolu un diizocinātu polikondensācijas rezultātā:



Poliuretāna fizikāli mehāniskās īpašības galvenokārt nosaka hidroksilgrupas saturošais komponents jeb makromolekulu uzbūve, ķēdes posmu garums starp uretāngrupām, molekulmasa, kristāliskuma pakāpe. Iegūst no elastīgiem līdz cietiem, stingriem poliuretāna materiāliem.

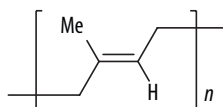
Cietos poliuretānus izmanto par konstrukciju materiālu mašīnu detaļu izgatavošanai. Poliuretāna elastomērus izmanto aizsargpārklājumiem, amortizatoru, dzensiksnu, kurpju zoļu izgatavošanai.

Telpiskas struktūras poliuretānus lieto līniju, hermētisku materiālu, mākslīgās ādas, putuplastu iegūšanai.

1.2.3. Elastomēri

Elastomēri ir ļoti elastīgi polimēri, slodzes ietekmē deformējoties, tie var vairākkārt pārsniegt sākotnējos izmērus. Noņemot slodzi, elastomērs ieņem iepriekšējo formu.

Dabisko kaučuku iegūst no Brazīlijas hevejas (*Hevea Brasiliensis*) koka sulas jeb lateksa. Pēc ķīmiskā sastāva dabiskais kaučuks ir poliizoprēns:

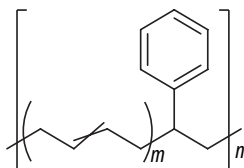


Tā makromolekulas veido spirālveida konformāciju, kas ļauj elastīgi reaģēt stiepes laikā. Vulkanizējot ar sēru, veidojas gumija, kuras īpašības ir atkarīgas no vulkanizācijas pakāpes.

Dabiskais kaučuks novoco gaismas, temperatūras, skābekļa ietekmē – tas kļūst trausls. Lai uzlabotu dabiskā kaučuka īpašības, to modificē ar kvēpiem, plastifikatoriem.

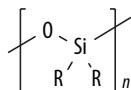
1.

Butadiēnstirola kaučuks – viens no gumijas, tajā skaitā tehniskās gumijas, ražošanā visplašāk izmantotajiem kaučukiem. Iegūst butadiēna un stirola kopolimerizācijas rezultātā:



Vulkanizācijai izmanto galvenokārt sēru, par pildvielu – kvēpus. No butadiēnstirola ražotas gumijas īpašības galvenokārt ir atkarīgas no saistītā stirola daudzuma, piemēram, gumijai, kas satur līdz 8 % saistītā stirola, piemīt augsta elastība un salizturība, ja saistītā stirola daudzums sasniedz 45 %, tai piemīt lielāka stiprība un nodilumizturība, bet elastība mazinās. Izgatavo visdažādākos gumijas izstrādājumus.

Silikona kaučuks ir augstmolekulārs skābekli saturošs silīcijorganisks polimērs ar kopējo formulu:



kur R – metil-, etil-, fenilgrupa u. c.

Silikona kaučuks ir ļoti noturīgs pret skābēm, sārmjiem, sāļu šķīdumiem, tas saglabā elastību temperatūras intervālā no $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ līdz $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$, bet temperatūrā virs $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ tam ir ļoti labas elektroizolācijas īpašības. Blīvgumijas no silikona ir stabilas, saskaroties ar ozonu, jūras ūdeni, spirtu, ūdeņraža peroksīda šķīdumu, eļļu. Silikona izstrādājumi ir pietiekami noturīgi pret radiāciju un UV starojumu, tie ir bioloģiski inerti.

1.3. Kompozītmateriāli

Par kompozītmateriāliem sauc mākslīgi iegūtus materiālus, kas sastāv no diviem vai vairākiem komponentiem. Parasti kompozīti sastāv no plastiskas pamatnes (matricas), kas armēta ar pildvielām. Variējot matricas un pildvielas sastāvu, attiecības, orientāciju iegūst materiālus ar nepieciešamajām īpašībām. Kompozītmateriālus var veidot uz metālu, keramikas, stikla, polimēru bāzes. Pildvielas nosaka materiāla izturību, stiprību, deformējamību, bet matrica nodrošina viendabību, spriegumu pārnesi uz pildvielu, noturību pret ārējo iedarbību. Pēc struktūras kompozītus var iedalīt vairākās klasēs: armētie, slāņainie,

pildītie ar dispersām pildvielām. Ķīmiskās iekārtās visplašāk izmanto polimēru kompozītmateriālus. Nozīmīgākie no tiem:

- ♦ stikloplasti, polimēru materiāli, kas armēti ar stikla šķiedru. Par matricu parasti izmanto reaktoplastus (epoksīda, poliestera, fenola sveķus). Šos materiālus raksturo liela stiprība, zems siltumvadītspējas koeficients. No stikloplasta izgatavo caurules, tvertnes, dažādas iekārtu detaļas;
- ♦ ogļplasti, polimēru matrica, armēta ar oglekļa šķiedru. Galvenā atšķirība no stikloplastiem ir to mazais blīvums ($\sim 1500 \text{ kg/m}^3$) un lielāks elastības modulis ($\sim 13 \cdot 10^4 \text{ MPa}$). Ogļplasti ir viegli un ļoti izturīgi materiāli. Izmanto aviācijā, mašīnbūvē, medicīnas tehnikā, sporta inventāra ražošanā;
- ♦ pildītas polimēru kompozīcijas. Lai veidotu nepieciešamās īpašības, izmanto dažādas pildvielas, ir zināmi vairāk nekā 10 000 pildīti polimēru kompozīti. Par pildvielām lieto minerālvielas, grafitu, pigmentus, svina pulveri, smalcinātas šķiedras, nanomateriālus.

1.4. Neorganiskie materiāli

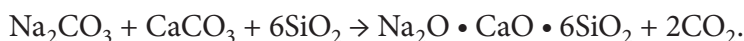
1.4.1. Stikls

Stikls ir ciets, amorfs, dzidrs materiāls, ko iegūst, atzdesējot nemetālisku vielu kausējumu. Šajos kausējumos ir stiklu veidojošie komponenti (silīcija, bora, alumīnija oksīdi) un metālu (litija, kālija, magnija, svina u. c.) oksīdi. Atšķirībā no kristāliskām vielām stiklam nav noteikta kušanas punkta. Karšējot tas kļūst mīksts un pakāpeniski pāriet no cieta stāvokļa šķidrā. Tehnisko robežu starp kausējumu un cietu stiklu apzīmē ar jēdzienu „transformācijas temperatūra”. Maksimālā ekspluatācijas temperatūra parasti sasniedz 50–60 % no šīs transformācijas jeb pārejas temperatūras.

Stiklam piemīt virkne izcilu īpašību – tas ir ķīmiski stabils, ciets, viegli tīrāms, higiēnisks, nav toksisks, nedarbojas par katalizatoru, salīdzinoši lēts.

Stikla masu un izstrādājumus parasti klasificē pēc ķīmiskā sastāva, komponentu skaita, lietošanas veida. Apskatīsim dažus piemērus.

Sodas stiklu iegūst no sodas (Na_2CO_3), kaļķa (CaCO_3) un kvarca smiltīm (SiO_2), tās sakausējot:



Sodas stikls ir visvairāk izmantotais stikls, no tā izgatavo, piemēram, logu

stiklu, pudeļu stiklu. Tas ir noturīgs pret skābju, mazāk noturīgs pret sārmu iedarbību, kas struktūrā var izšķīdināt SiO_2 .

1.

Kālija stikls, ko sauc arī par Bohēmas stiklu, Na_2O vietā satur kālija oksīdu – $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 8\text{SiO}_2$. Bohēmas stikls sliktāk kūst, ir cietāks nekā sodas stikls, izteiktāk lauž gaismu, to izmanto smalku slīpētu izstrādājumu izgatavošanai (vāzes, glāzes).

Svina stiklu optisko īpašību dēļ sauc arī par kristālstiklu. Kristālstiklā kalcijs oksīds tiek aizvietots ar svina oksīdu – $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{PbO} \cdot 6\text{SiO}_2$. Izmanto slīpētu stikla izstrādājumu un optisko stiklu izgatavošanai.

Borsilīcija stikls ir visbiežāk izmantotais stikls ķīmiskajā rūpniecībā. Tas ir noturīgs praktiski pret visām ķīmikālijām un straujām temperatūras izmaiņām. Borsilikātstiklā SiO_2 ir daļēji aizvietots ar Al_2O_3 , B_2O_3 un BaO , tā aptuvenais sastāvs ir $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{BaO}$.

No šī stikla izgatavo cauruļvadus, siltummaiņus, reaktorus, kolontipa aparātus, atsevišķu iekārtu elementus. Izmantojot speciālus blīvējošos materiālus un savienojumus, no šīm detaļām var komplektēt veselas tehnoloģiskās līnijas.

Vēl jāpiemin **kvarca stikls**. Tas ir tehniski izturīgs (līdz $1000\text{ }^\circ\text{C}$), laiž cauri UV starojumu, tam ir minimāls termiskās izplešanās koeficients ($1/20$ no parastā stikla). Kvarca stikls sastāv no praktiski tīra SiO_2 . Augstas kvalitātes kvarca stiklu iegūst no kalnu kristāla, to kausējot $2000\text{--}2200\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrā, tas nesatur nekādus citus jonus. Parastās kvalitātes kvarca stiklu iegūst, kausējot kvarca smiltis $\sim 1700\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrā, tas satur Fe , Ca , B un Al piemaisījumus, kā arī kausējumā ieslēgtus gaisa burbuļus, kurus praktiski nevar atdalīt. Izmanto speciālās ķīmiskās iekārtās, piemēram, kvarca aparatūrā iegūst īpaši tīras skābes.

1.4.2. Keramika

Sākotnēji par keramiku sauca tikai no māla ražotus produktus, tagad tā sauc arī no citiem neorganiskiem materiāliem izgatavotus izstrādājumus, ja tos pēc formēšanas apdedzina. Pie tās pieder, piemēram, mālu keramika, porcelāns, karstumizturīgi ķieģeļi u. c. Galvenās īpašības, kas nosaka to lietojumu ķīmiskajā un farmaceitiskajā rūpniecībā, ir:

- ♦ ļoti augsta ķīmiskā izturība,
- ♦ cietība,
- ♦ termiskā izturība,
- ♦ praktiski nav toksiski,
- ♦ izejmateriālu pieejamība.

Materiāla trūkums ir trauslums, tas nav noturīgs pret termisko šoku, slikti apstrādājams.

Atkarībā no apdedzināšanas temperatūras un sastāva var iegūt visdažādākos keramiskos materiālus.

Apdedzinot māla masu temperatūrās līdz 1150 °C, iegūst porainu māla keramiku, ko izmanto par filtrējošo materiālu. Palielinot apdedzināšanas temperatūru līdz 1300 °C, iegūst blīvu, saķepušu, viendabīgu keramiku. Lai palielinātu izstrādājuma ķīmisko noturību, tos glazē ar viegli kūstošu glazūru. No tās gatavo skābes izturīgus ķieģeļus, reaktoru oderējuma veidgabalus, Rašiga gredzenus, rūpniecībā lietojamus keramikas traukus, caurules, skābju absorbcijas trauku daļas u. c.

Viens no nozīmīgākajiem keramikas veidiem ir porcelāns. To iegūst no kaolīna (50 %), kvarca (25 %) un laukšpata (25 %). Porcelāns ir blīva, plānā slānī caurspīdīga masa. To iegūst, apdedzinot 900 °C temperatūrā, pēc tam pārklājot ar glazūru un otrreiz apdedzinot 1400–1450 °C temperatūrā. Porcelāns ir noturīgs praktiski pret visām skābēm, to izmanto speciālo laboratorijas trauku, piemēram, tīģeļu, kā arī pildķermeņu, iekārtu detaļu, izgatavošanai

Vēl jāpiemin karstumizturīgie materiāli, piemēram, šamots. Tas ir keramisks materiāls, ko iegūst no speciāla māla ar augstu kušanas temperatūru. Mālus pēc pirmās apdedzināšanas samaļ, samaisa ar svaigu plastisku masu un otrreiz apdedzina 1450 °C temperatūrā.

2. CAURUĻVADI UN ARMATŪRA

2.1. Tehnoloģiskie cauruļvadi

2.

Cauruļvadi ir neatņemama tehnoloģisko iekārtu daļa – ar tiem savieno atsevišķus aparātus, iekārtas, mašīnas. Tehnoloģiskajās līnijās parasti runā par cauruļvadu sistēmām vai cauruļvadu tīklu.

Cauruļvadu sistēma ir konstrukcija, kas sastāv no šādiem galvenajiem elementiem:

- ♦ caurules,
- ♦ veidgabaliem,
- ♦ armatūras,
- ♦ izolācijas,
- ♦ cauruļvadu stiprinājuma elementiem,
- ♦ savienojumu elementiem.

Elementu daudzveidības dēļ svarīga vieta ir ierādīta to standartizācijai un unifikācijai, tātad cauruļvadi un to elementi tiek izgatavoti pēc noteiktiem standartiem, kas nodrošina to savstarpējo savietojamību. Tiek unificēti divi cauruļvadu pamatlīkumi, pēc kuriem ir iespējams savietot dažādas caurules un cauruļvadu elementus:

- ♦ nosacītais diametrs (caurplūde) – DN,
- ♦ nosacītais spiediens – PN.

Jebkura cauruļvada galvenie raksturlielumi ir diametrs, sieniņas biezums un materiāls, no kā tas izgatavots. Katrai caurulei ir divi diametri: iekšējais – d_{ie} un ārējais – d_a , starp minētajiem lielumiem ir šāda sakarība:

$$d_{ie} = d_a - 2\delta,$$

kur δ – caurules sieniņas biezums.

Mainoties sieniņas biezumam, mainās caurules iekšējais diametrs, bet ārējais diametrs nemainās, jo tā izmaiņas nenovēršami radītu veidgabalu, armatūras utt. izmēru pārmaiņas. Lai nodrošinātu visiem cauruļvada elementiem aprēķinātās šķīduma, gāzes vai tvaika caurplūdes vērtības, tiek ieviests jēdziens „nosacītais diametrs” jeb „nosacītā caurplūde”. Nosacītā caurplūde ir vidējais iekšējais caurules diametrs (gaismas laukums), kas atbilst vienam vai vairākiem ārējiem diametriem. Nosacītajam diametram nav mērvienību, to apzīmē ar burtiem DN, pievienojot nosacītās caurplūdes lielumu, piemēram, DN 100. Faktiskais iekšējais diametrs parasti neatbilst nosacītās caurplūdes diametram (2.1. att.)

Piemēram, tērauda caurulei ar ārējo diametru $d_a = 88,9$ mm un sienas biezumu $\delta = 3,2$ mm iekšējais diametrs ir $d_{ie} = 82,5$ mm, bet caurulei ar sienas biezumu $\delta = 3,6$ mm iekšējais diametrs ir $d_{ie} = 81,7$ mm. Abos gadījumos tiek pieņemts, ka caurplūde ir DN 80.

Ja diviem cauruļvada elementiem ir viena un tā pati nosacītā caurplūde DN, tad tiem ir vienāds šķērsriezuma (gaismas) laukums un vienādi savienojšo elementu izmēri.

Nosacītās caurplūdes vērtības caurulēm, savienojumu un armatūras elementiem ir standartizētas, to sadalījums ir aprēķināts, lai, pārejot no viena standartizētā izmēra uz citu, cauruļvada caurplūdes spēja mainītos par 60–100 %.

Atbilstīgi Eiropas normām DN EN ISO 6708 ir noteikti šādi nosacītie diametri jeb caurplūde:

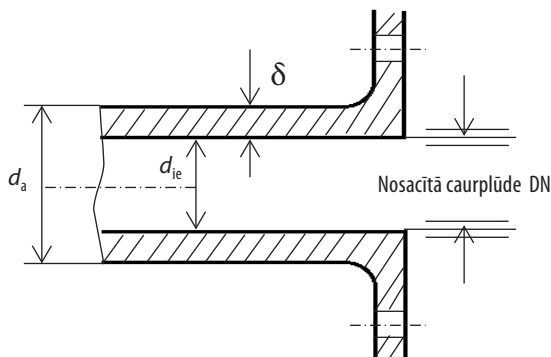
10; 15; 20; 25; 32; 40; 50; 60; 80; 100; 125; 150; 200; 250; 300; 350; 400; 450; 500; 600; 700; 800; 900; 1000; 1100; 1200; 1400; 1500; 1600; 1800; 2000; 2200; 2400; 2600; 2800; 3000; 3200; 3400; 3600; 3800; 4000.

Atbilstīgi GOST 28388-89 normām arī ir noteikta līdzīga cauruļvadu nosacītās caurplūdes lielumu rinda:

2,5; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 12; 15; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 65; 80; 100; 125; 150; 160; 175; 200; 250; 300; 350; 400; 450; 500; 600; 700; 800; 900; 1000; 1200; 1400; 1600; 1800; 2000; 2200; 2400; 2600; 2800; 3000; 3200; 3400; 3600; 3800; 4000.

Nosacīto caurplūdi nosaka atkarībā no projektētās iekārtas ražības Q (m^3/s) un izvēlētā plūsmas ātruma ω (m/s). Tiek aprēķināts nepieciešamais cauruļvada diametrs d_{ie} (mm):

$$d_{ie} = 2\sqrt{\frac{Q}{\pi\omega}}$$



2.1. att. Caurules izmēri.

Par nosacīto diametru izvēlas nākamo standartizēto lielumu, kas ir lielāks par aprēķināto. Piemēram, ja aprēķinātais diametrs ir 75,8 mm, tad izvēlas cauruļvadu ar nosacīto diametru DN 80.

2.

Cauruļvadu sienas biezumu izvēlas atkarībā no iespējamā lielākā transportējamās vides (šķidrums, gāze) spiediena cauruļvadu sistēmā, no tās temperatūras un caurules materiāla īpašībām.

Lai saistītu transportējamās vides temperatūru un spiedienu cauruļvadā, ir ieviests jēdziens „nosacītais spiediens”, saīsināti PN (*nominal pressure*). Par nosacīto spiedienu sauc transportējamās vides maksimālo virsspiedienu 20 °C temperatūrā, kad var nodrošināt cauruļvadu un to elementu drošu un ilglaicīgu ekspluatāciju.

Saskaņā ar GOST 356-80 cauruļvadu armatūrai un cauruļvadu detaļām norādīta šāda iespējamā nosacīto spiediena lielumu rinda (MPa):

0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,63; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 10,0; 12,5; 16,0; 20,0; 25,0; 32,0; 40,0; 50,0; 63,0; 80,0; 100,0; 160,0.

Atbilstīgi Eiropas normām DIN EN 1333 ir noteiktas nosacītā spiediena pakāpes:

PN 2,5; PN 6; PN 10; PN 16; PN 25; PN 40; PN 63; PN 100.

Piemēram, ja ir nepieciešama cauruļvadu sistēma iekārtai, kurā darba spiediens var sasniegt 20 bar, izvēlamies cauruļvadu un detaļas, ko var ekspluatēt augstāka nosacītā spiediena apstākļos, šajā gadījumā PN 25. Cauruļvadu sienas biezumam atkarībā no izmantojamā materiāla jābūt tādām, lai caurule izturētu attiecīgo nosacīto spiedienu. Atbilstīgos izmērus cauruļvadiem no dažādiem materiāliem parasti uzrāda cauruļu ražotājs.

Kā mainās caurules izmēri atkarībā no piemērojamā nosacītā spiediena (PN) pakāpes, varam redzēt turpmāk minētajā piemērā. Nelegētas tērauda caurules DN 200 izmēri atkarībā no nosacītā spiediena (PN) pakāpes:

	d_a	d_{ie}	δ (mm)
PN 6	219,1	207,3	5,9
PN 25	219,1	206,5	6,3
PN 63	219,1	204,9	7,1

Kā jau minēts iepriekš, nosacītā spiediena vērtības ir definētas videi, kurā temperatūra ir 20 °C. Pieaugot darba temperatūrai, palielinās slodze uz cauruļvadu sistēmu, pieļaujama darba spiediens samazinās (2.2. att.).

2.2. attēlā redzams, kā mainās pieļaujama darba spiediens (P_p) dažādās temperatūrās caurulei no tērauda 15Mo3 ar nosacīto spiedienu PN 63.

20 °C temperatūrā pieļaujamais darba spiediens ir 63 bar. Temperatūrai pieaugot līdz 400 °C, pieļaujamais darba spiediens ir vairs tikai 60 bar.

Visi cauruļvadi tiek klasificēti atkarībā no darba apstākļiem. Klasifikācijas pamatā ir trīs galvenie nosacījumi:

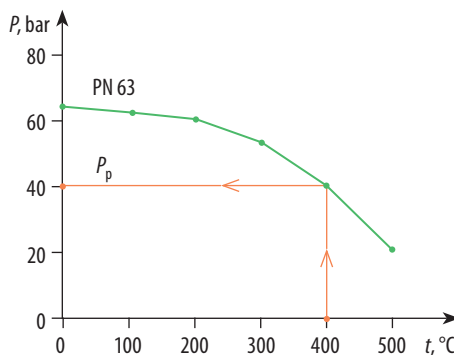
- ◆ darba spiediens,
- ◆ darba temperatūra,
- ◆ pārvietojamās vides īpašības.

Atbilstīgi DIN 2403 normām visi cauruļvadi ir sadalīti desmit grupās, un katrai no tām ir noteiktas krāsas apzīmējums (2.1. tab.).

2.1. tabula

Cauruļvadu iedalījums grupās pēc DIN 2403

Grupa	Vide	Cauruļvada krāsa
1.	Ūdens	Zaļa
2.	Ūdens tvaiks	Sarkana
3.	Gaiss	Pelēks
4.	Deģošas gāzes	Dzeltena
5.	Nedegošas gāzes	Dzeltena / Melna
6.	Skābes	Oranža
7.	Sārmi	Violeta
8.	Deģoši šķidrums	Brūna / Sarkana
9.	Nedegoši šķidrums	Brūna / Melna
10.	Skābeklis	Zila



2.2. att. Pieļaujamā darba spiediena izmaiņas atkarībā no temperatūras.

Saskaņā ar cauruļvadu izbūves un ekspluatācijas drošības noteikumiem ПБ 03–75–94 (Krievija) visus cauruļvadus iedala piecās grupās, ņemot vērā, kāda viela pa tiem tiek transportēta:

- A** – toksiskas, šķidrās un gāzveida vielas,
- B** – degošas gāzes un viegli degoši šķidrums,
- B** – pārkarsēts ūdens tvaiks,
- Г** – karsts ūdens un piesātināts ūdens tvaiks,
- D** – nedegošas gāzes, tvaiki, šķidrums.

Katra grupa atkarībā no pieļaujamā darba spiediena un temperatūras tiek sadalīta kategorijās. Piemēram, grupa B – pārkarsēts ūdens tvaiks:

- I** kategorija – P_d – nav limitēts, $t = 450 \div 660$ °C,
- II** kategorija – P_d – līdz 3,9 MPa, $t = 350 \div 450$ °C,
- III** kategorija – P_d – līdz 2,9 MPa, $t = 250 \div 350$ °C,
- IV** kategorija – P_d – līdz 1,6 MPa, $t = 120 \div 250$ °C.

Grupas un cauruļvadu kategorijas izvēle ir atkarīga no pārvietojamās vielas un konkrētajiem apstākļiem. Piemēram, viegli degoša šķidrums pārvietošana 400 °C temperatūrā – nepieciešams B grupas I kategorijas cauruļvads, ja šķidrums temperatūra nepārsniedz 100 °C, vajadzīgs B grupas IV kategorijas cauruļvads.

Katras grupas cauruļvadiem ir noteiktas projektēšanas, montāžas, ekspluatācijas un remonta normas.

2.2. Cauruļvados izmantojamie materiāli

Materiālu izvēle cauruļu izgatavošanai ir atkarīga no pārvietojamās vielas īpašībām, plānotā darba spiediena un temperatūras. Caurules izgatavo no tērauda, čuguna, krāsainajiem metāliem, stikla, keramikas, plastmasas, tas ir, praktiski no visiem materiāliem, ko lieto ķīmiskajā mašīnbūvē. Visplašāk izmanto tērauda caurules.

Izšķir metinātas un bezšuves caurules. Metinātām caurulēm ir garenvirziena vai spirālveida šuve, tās ir mazāk izturīgas, izmanto ūdens, gāzes, zema spiediena tvaika transportēšanai temperatūras intervālā no –16 °C līdz +200 °C. Bezšuves caurules ir izturīgākas, tās lieto visdažādākajiem mērķiem, plašas temperatūras un spiediena diapazonā – no –180 °C līdz +800 °C un spiedienam jābūt līdz 200 MPa. Caurules izgatavo no dažādas markas tērauda. Vispārīgiem mērķiem izmanto caurules no parastā oglekltērauda (10, 20 marka). Paaugstināta spiediena un temperatūras gadījumā lieto caurules no mazlēģēta tērauda, kas satur Cr un Mo (13CrMo44, 15XM). Gadījumā, kad vide ir agresīva

va, augsta temperatūra un spiediens, tiek izvirzītas speciālas prasības produktu tīrībai, izmanto augsti leģēta tērauda caurules (X6CrNiTi1810, 12X18H10T).

Speciālās iekārtās, tajā skaitā zinātniskā aparātūrā, medicīnas ierīcēs, iekārtās, kas kontaktē ar jūras ūdeni u. c., izmanto caurules no niķeļa, vara vai to kausējumiem, piemēram, *Mokels* grupas metālus – satur līdz 67 % Ni un līdz 30 % Cu. *Mokels* ir tirdzniecības marka, kas pieder *Special Metals Corporation*.

Stikla caurules plaši lieto pārtikas un farmaceitiskajā rūpniecībā, ķīmiskajās ražotnēs izmanto tur, kur ir vajadzīga īpaša tīrība un plūsmas optiska kontrole. Laboratorijas un pilotiekārtas tehnoloģisko procesu pētīšanai praktiski vienmēr ir komplektētas ar stikla caurulēm.

Analītiskajās, laboratorijas un pilotiekārtās izmanto cauruļvadus no plastmasas. Plašās lietošanas iespējas nosaka polimēru materiālu īpašības – tie ir korozijas noturīgi, viegli, higiēniski, ērti montējami. Caurules un to veidgabalus galvenokārt izgatavo no polietilēna, polivinilhlorīda, polipropilēna, fluoroplasta, silikona kaučuka.

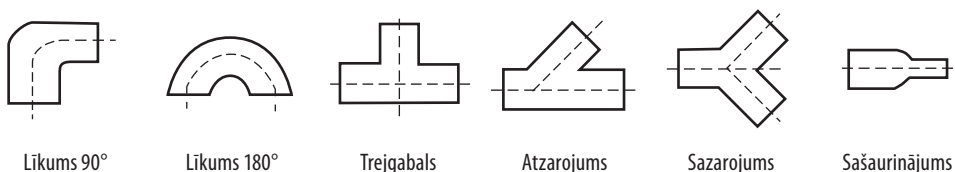
Liela diametra cauruļvadus izgatavo no kompozītmateriāliem – stiklaplasta, oglekļaplasta, ko raksturo pietiekami liela stiprība, turklāt salīdzinoši tie ir ļoti viegli.

Ķīmiskajās iekārtās speciāliem mērķiem – aukstumtehnikā, siltummaiņos – lieto vara caurules, slāpekļskābes, etiķskābes transportēšanai – alumīnija caurules, bet sērskābes transportēšanai – svina caurules.

Speciālos gadījumos dažādu agresīvu šķīdumu aizvadīšanai izmanto skābju izturīgās keramiskās caurules.

2.3. Cauruļu savienošana

Cauruļvadu sistēmu veido no atsevišķām caurulēm un veidgabaliem, tos savienojot. Arī cauruļvadu armatūra un aparāti tiek savienoti ar cauruļvadu sistēmu. Svarīgākie cauruļvadu veidgabali ir likumi, trejgabali, atzarojumi, atzarojumi, sašaurinājumi (2.3. att.).

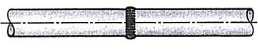

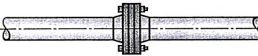
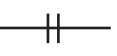

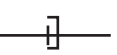




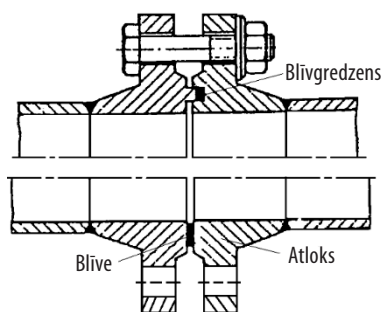
2.3. att. Cauruļvadu veidgabali.

Eksistē dažādi cauruļu un veidgabalu savienošanas veidi. Savienojuma veidu nosaka šādi apstākļi:

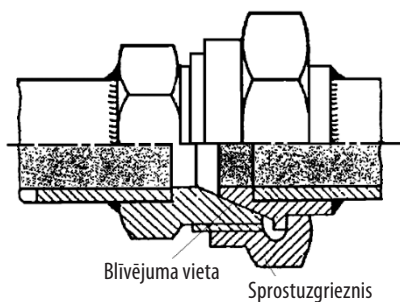
- ◆ tehnoloģiskās prasības,
 - ◆ savienojumam jābūt izjaukamam vai ne,
 - ◆ savienojuma elementi ir metināmi vai ne.
- Galvenie savienojuma veidi ir parādīti 2.2. tabulā.

2.2. tabula
Cauruļu savienojumu veidi

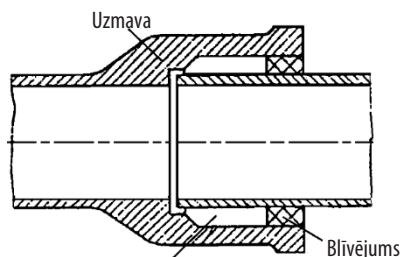
Savienojuma veids	Princips	Simbols	Jaucams/ nejaucams	Izmantošana
Metinājums			Nejaucams	Visiem P Visām t
Atloku			Jaucams	Augstiem P Ierobežotām t
Vītņveida			Jaucams	Vidējiem P Vidējām t
Uzmavas			Jaucams	Zemiem P Zemām t



2.4. att. Atloku savienojums.



2.5. att. Vītņu savienojums.



2.6. att. Uzmavas savienojums.

Cauruļu metināšana ir lētākais, ātrākais un drošākais savienošanas veids. Kvalitatīvi sametinātas caurules iztur to pašu slodzi, ko vienlaidus materiāls.

No izjaucamiem savienojumiem cauruļvadu sistēmās visbiežāk izmanto atloku savienojumus (2.4. att.). Izmantojot atlokus, savieno caurules, pievieno armatūru, tvertnes, reaktorus sūkņus u. c. Atloki ar vienādu DN un PN ir identiski izmēri, un tie ir savstarpēji savienojami. Starp atlokiem ievieto dažādas formas blīvgredzenus, kas tiek saspiesti, izmantojot skrūves. Neliela spiediena gadījumā blīvgredzenu izgatavo no gumijas. Augsta spiediena un lielas temperatūras gadījumā blīves gatavo no speciāliem presmateriāliem, kas satur varu, azbestu u. c.

Vītņu savienojums sastāv no divām koniskām virsmām, kas tiek savilkta ar sprostuzgriezni. Šāda veida savienojumus lieto caurulēm ar nelielu nosacīto diametru (DN).

Uzmavas tipa savienojumus lieto zema spiediena (līdz 10 bar) cauruļvadiem. Izmanto čuguna un plastmasas cauruļu savienošanai. Blīvēšanai lieto dažādus hermētiskus materiālus un gumijas blīvējumus.

2.4. Cauruļu termiskā deformācija

Pa cauruļvadiem transportējamās vides (šķidrums, tvaiks, gāze) temperatūra var būt samērā augsta. Caurules uzkarst, radot termisko deformāciju (2.7. att.). Cauruļvadu sistēmu kopējā deformācija var sasniegt būtisku apjomus.

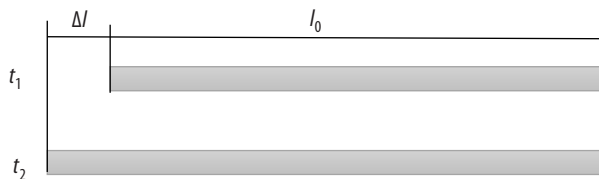
Cauruļu lineāro deformāciju nosaka:

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t, \quad (2.1.)$$

kur l_0 – sākotnējais garums, m;

α – lineārais termiskās izplešanās koeficients, mm/m·°C;

Δt – temperatūras starpība, °C.



2.7. att. Cauruļu lineārā deformācija.

Piemērs: 10 m gara augsti legēta tērauda caurule tehnoloģiskajā procesā uzkarst no 0 °C līdz 200 °C. Caurules termiskā deformācija sasniedz šādas vērtības:

$$\Delta l = 10 \text{ m} \cdot \frac{0,017 \text{ mm}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 200^\circ\text{C} = 34 \text{ mm}.$$

2.3. tabulā dotas lineārās termiskās izplešanās koeficientu vērtības dažiem materiāliem.

2.3. tabula

Termiskās izplešanās koeficients, α

Materiāls	α , mm/m·°C
Oglekļa tērauds	0,012
Legēts tērauds	0,017
Alumīnijs	0,024
Varš	0,020
PVC	0,07
PE	0,22
Stikls	0,001–0,004

Termiskā izplešanās var izraisīt ievērojamus cauruļvadu bojājumus, kas var radīt avārijas situāciju. Ja caurules gali ir nekustīgi un nevar mainīt garumu, mainoties temperatūrai, materiālā veidojas termisks spriegums:

$$\sigma_t = \varepsilon \cdot E, \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \text{MPa}, \quad (2.2.)$$

kur E – materiāla elastības modulis stiepē, MPa;

ε – caurules relatīvā deformācija, $\varepsilon = \Delta l/l_0$.

Aprēķinātais spriegums nekādā gadījumā nedrīkst pārsniegt materiāla robežstiprību stiepē. Ja caurules šķērsriezuma laukums ir S (m²), tad uzkarstētā caurule izrādīsies saspiesta ar šādu spēku:

$$P = \sigma_t \cdot S = \varepsilon \cdot E \cdot S, \text{N}. \quad (2.3.)$$

Termiskās deformācijas kompensēšanai izmanto dažādus kompensatorus. Projektējot iekārtas un uzstādot kompensējošās ierīces, ir svarīgi noteikt temperatūras starpību (Δt), pie kuras ir jāuzstāda kompensējošās ierīces. Minēto temperatūras starpību var aprēķināt ar vienādojumu:

$$\Delta t = \frac{\sigma}{E \cdot \alpha}, ^\circ\text{C},$$

kur σ – materiāla robežstiprība stiepē, N/mm².

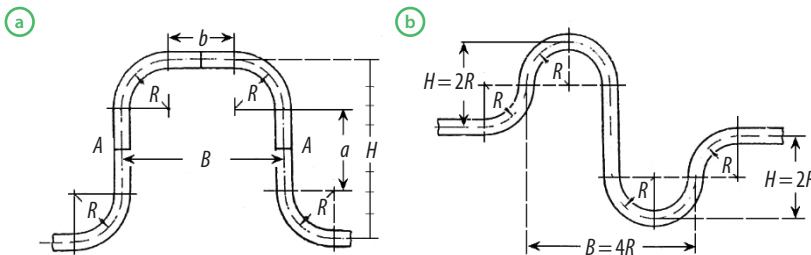
Visplašāk tiek izmantoti lokanie kompensatori, kas pēc būtības ir cauruļvados iemontētas dažādas formas cilpas, parasti U vai S veidā (2.8. att.).

Šie kompensatori ir vienkārši, droši ekspluatācijā, to kompensācijas spēja var sasniegt 600–700 mm, un tos var izmantot augstās temperatūrās un augsta spiediena gadījumā. Lokano kompensatoru kompensācijas lielumu var aprēķināt. Piemēram, S veida kompensatoram kompensācijas lielumu, kad $R = 4DN$, $H = 8DN$ un $B = 4R$ (2.8. (b) att.), var noteikt ar orientējošu formulu:

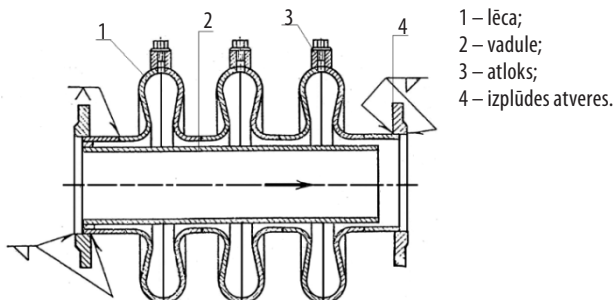
$$\Delta_K \approx 0,75DN. \quad (2.4.)$$

Viļņveida jeb lēcu kompensatori sastāv no plānsienu viļņveida caurules, kurai abos galos ir atloki, bet iekšpusē atrodas vadule (2.9. att.).

Šāda veida kompensatorus izmanto cauruļvados ar diametru no 100 mm līdz 1600 mm, spiediens parasti nepārsniedz 1,6 MPa. Kompensācijas lielums vienai lēcai parasti nepārsniedz 10–50 mm. Ja transportē tvaiku, kas var kondensēties, lēcās ierīko izplūdes atveres. Šīs konstrukcijas var izmantot arī sānu



2.8. att. (a) – U veida kompensatori, (b) – S veida kompensatori.



2.9. att. Lēcu kompensators.

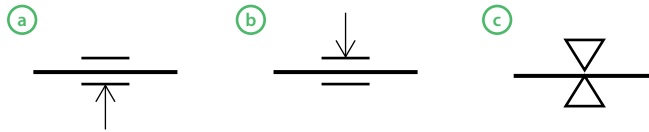
svārstību kompensēšanai, piemēram, no sūkņiem.

2.5. Cauruļvadu stiprināšana

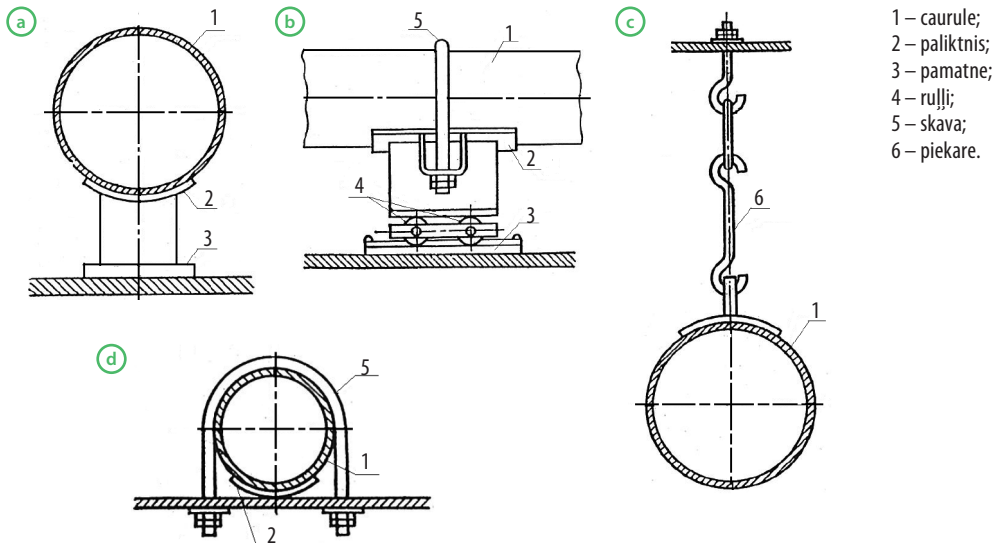
2.

Izmantojot dažādus paņēmienus, caurules var stiprināt nekustīgi, bet tās var nostiprināt, arī lietojot kustīgus balstus. Cauruļu nostiprināšanas paņēmiena attēlošanai ir pieņemti noteikti apzīmējumi (2.10. att.).

Caurules stiprina uz balstiem tā, lai tās būtu nekustīgas un tādējādi izslēgtu to pārvietošanās vai griešanās iespēju. Balsti uzņem vertikālo slodzi no caurules un pārvietojamās vides svara. Nekustīgus, piemētinātus balstus izmanto caurulēm ar diametru līdz 1600 mm, vides temperatūrai jābūt mazākai par 300 °C (2.11. (a) att.). Liela izmēra cauruļu gadījumā izmanto kustīgus balstus uz ruļļiem, kas uzņem vertikālo slodzi no caurules svara un nodrošina aksiālo pārvietošanos temperatūras radītas deformācijas rezultātā (2.11. (b) att.). Mon-



2.10. att. Cauruļu nostiprināšanas veidu apzīmējumi: (a) – novietota uz balstiem, (b) – iekārta, (c) – nekustīgi nostiprināta.



2.11. att. Cauruļu stiprināšanas veidi: (a) – nekustīgi uz balsta, (b) – kustīgi uz ruļļiem, (c) – iekārta caurule, (d) – nekustīgi ar skavām.

tējot cauruļvadus ceļā vai estakādēs, izmanto piekares balstus vai padara tās nekustīgas ar skavām (2.11. (c) un (d) att.).

2.6. Cauruļvadu izolācija

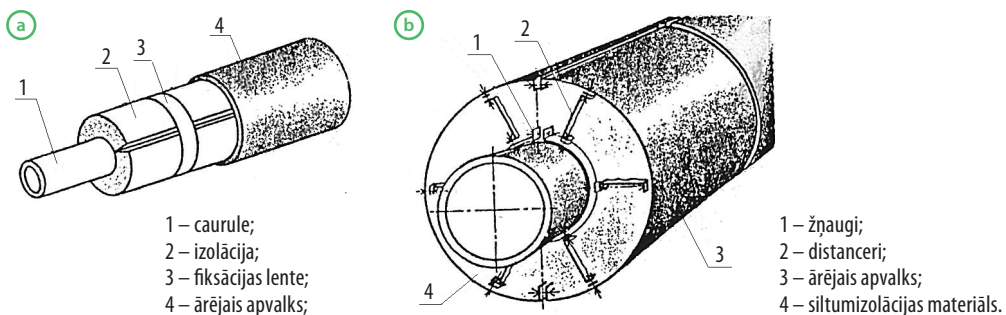
Cauruļu izolācija ir būtisks elements cauruļvadu sistēmā. Izolācija mazina siltuma zudumu, pārvietojot karstu vidi dažādā agregātstāvoklī, un pasargā no uzsilšanas, pārvietojot aukstu vidi dažādā agregātstāvoklī. Par izolācijas materiāliem temperatūrā līdz 100 °C izmanto polistirola vai poliuretāna cieto putu materiālus. Temperatūrā līdz 600 °C lieto stikla šķiedras vai akmens vati.

Cauruļvadu izolēšanas princips ir atkarīgs no caurules nosacītā diametra (DN). Caurulēm ar DN < 80 parasti izmanto gatavus izolācijas materiāla elementus, kurus montē un nostiprina virs caurulēm (2.12. (a) att.).

Ja caurules DN > 80, veido konstrukciju, kas sastāv no žņauga, distanceriem un leģēta tērauda skārda apvalka. Telpu starp skārda apvalku un cauruli piepilda ar siltumizolācijas materiālu (2.12. (b) att.).

Izolācijas slāņu biezums vienmēr ir kompromiss starp izmaksām un siltuma zudumu, parasti tas svārstās no 50 mm līdz 250 mm. Ja cauruļvados transportējamā vide nedrīkst uzsilt vai atdzist, piemēram, transportējot viskozus šķidrumus, cauruļvadus papildus aprīko ar sildelementiem (glodenes tipa vai elektriskiem), kurus savukārt papildus izolē.

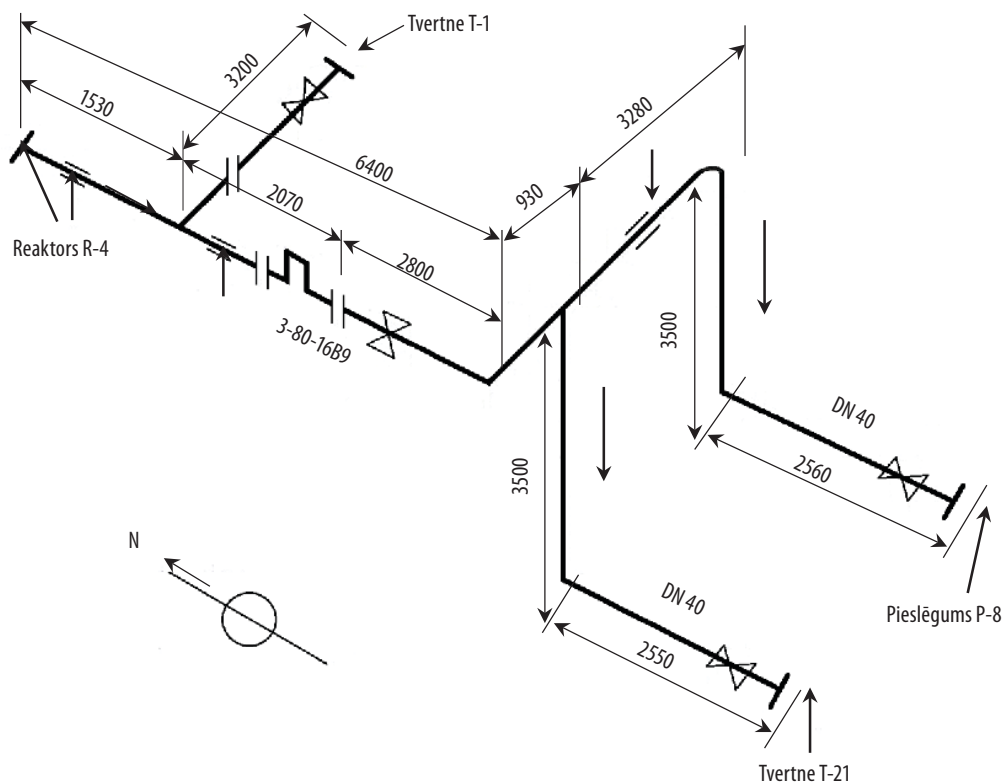
Pareizi izveidota cauruļvadu izolācija ļauj atrisināt virkni problēmu - trans-



2.12. att. Cauruļvadu izolācijas veidi: (a) – DN < 80; (b) – DN > 80.

portējot gāzes, tās neatdziest zem rasas punkta, līdz ar to neveidojas kondensāts, tas nerodas arī tvaika vadus, tā ir enerģijas ekonomija, neļaujot videi atdzist.

2.



2.13. att. Izometriskā cauruļvadu shēma.

2.7. Cauruļvadu grafiskā attēlošana

Lai sniegtu papildu informāciju par cauruļvadu sistēmu, to attēlo grafiski. Atbilstīgi DIN EN ISO 10628 cauruļvadus un iekārtas attēlo tehnoloģiskas shēmas veidā. Tehnoloģiskā shēma dod shematisku priekšstatu par ķīmiskās iekārtas uzbūvi un funkcionēšanu.



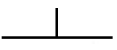

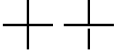
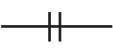
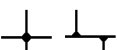

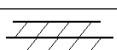



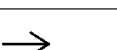

Cauruļvadu sistēmas bieži attēlo izometriskas projekcijas veidā. Izometriskā cauruļvadu shēma netiek zīmēta mērogā, tā ietver informāciju par cauruļu izvietojumu dabā, cauruļu garumu, plūsmas virzienu, cauruļu stiprinājuma veidu, izmantoto materiālu, nosacīto diametru un spiedienu.

Atbilstīgi DIN EN ISO 10628 cauruļvadu grafiskajam attēlam shēmās ir pievienoti attiecīgi apzīmējumi, 2.4. tabulā doti atsevišķi piemēri.

2.13. attēlā redzams cauruļvadu izometriskās shēmas piemērs. Atbilstīgi DIN EN ISO 10628 shēmā norādīti galvenie cauruļvadu elementi, izmēri, stiprinājuma veidi.

Piemērs: cauruļvads 3–80–16B9, tas nozīmē – cauruļvads Nr. 3, tā nosacītais diametrs DN 80, nosacītais spiediens PN 16, izgatavots no leģēta tērauda (B), 9. cauruļvadu klase.

2.4. tabula
Cauruļvadu apzīmējumi

Elements	Apzīmējums	Elements	Apzīmējums
Pamatlīnija		Cauruļu savienojums	
Pieslēguma vieta		Metināts savienojums	
Līniju krustojums bez savienojuma		Atloku savienojums	
Līniju krustojums ar savienojumu		Vītņu savienojums	
Līnija ar izolāciju		Uznavas savienojums	
Līnija ar papildu sildīšanu vai dzesēšanu		U veida kompensators	
Plūsmas virziens		S veida kompensators	

2.8. Armatūra

Armatūra ir ierīce, kas nodrošina transportējamās vides vadību un kontroli, to iemontē cauruļvados, aparātos, tvertnēs. Pēc funkcionālās nozīmes cauruļvadu armatūru iedala šādās grupās:

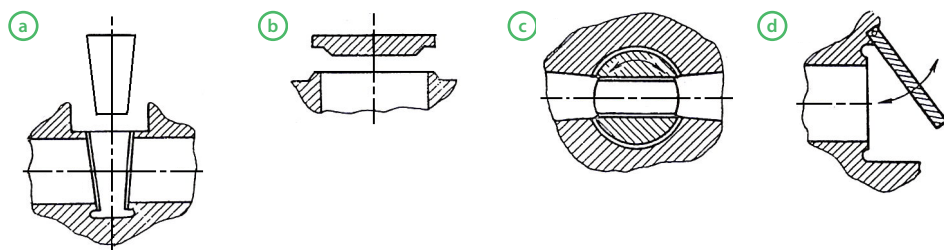
- ◆ noslēdzošā armatūra, kas kalpo, lai noslēgtu plūsmu (apmēram 80 % no visas armatūras);
- ◆ regulējošā armatūra, lai regulētu vai mainītu plūstošās vides patēriņu vai spiedienu;
- ◆ drošības armatūra, lai pasargātu sistēmu no pēkšņām ekstrēmām parametru izmaiņām, nepieļautu vides plūsmu pretējā virzienā;
- ◆ fāžu sadalošā armatūra, lai novadītu kondensātu no tvaika vadiem un iekārtām.

Tehnoloģiskajās iekārtās visbiežāk tiek izmantota noslēdzošā armatūra. Atkarībā no noslēģelementa konstrukcijas un pārvietošanās veida noslēdzošā armatūrā izšķir aizbīdņus, vārstus, krānus un ventiļus (2.14. att.).

Aizbīdņi kalpo, lai pilnīgi noslēgtu vai atvērtu cauruļvadus. Tos parasti nelieto plūsmas regulēšanai. Aizbīdņos, griežot darbvārpstu, ķīlis tiek pacelts uz augšu, nodrošinot plūsmai maksimālo atveri. Ja aizbīdnis ir atvērts, rodas maza hidrauliskā pretestība, turklāt plūsma var notikt abos virzienos (2.15. att.).

Ventiļi kalpo par noslēdzošu un regulējošu armatūru, kurā plūsmas atveres atvēršana un aizvēršana notiek, pārvietojot noslēģelementu jeb plūsmdali, kas ir pievienots darbvārpstas galā (2.16. att.). Plūsmdalis ir pieslēgts gredzenveida sēžai. Darbvārpstas augšējā daļā ir vītne, griežot tā kopā ar plūsmdali pārvietojas augšup vai lejup.

Ar ventiļiem iespējams vienmērīgi regulēt caurteci. Salīdzinot ar aizbīdņiem, ventiļiem ir liela hidrauliskā pretestība. Ķīmiskajās iekārtās plaši izmanto membrānas ventiļus (2.17. att.). Membrānas ventiļu korpuss no iekšpuses ir pārklāts ar aizsargpārklājumu no gumijas vai plastmasas. Vides plūsmu regulē, mainot membrānas stāvokli. Membrāna ir izgatavota no elastīgas gumijas vai polimēra materiāla, savienota ar darbvārpstu, griežot darbvārpsta kopā ar



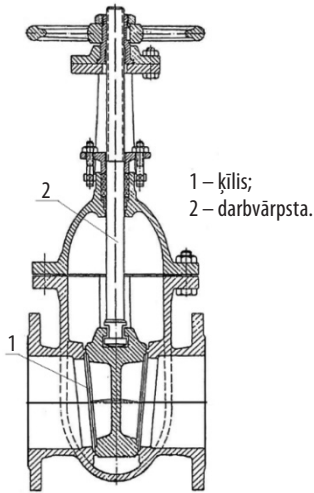
2.14. att. Noslēdzošās armatūras uzbūves shēmas:
(a) – aizbīdnis, (b) – ventilis, (c) – krāns, (d) – vārsts.

membrānu pārvietošanas augšup vai lejup, noslēdzot vai atverot plūsmu.

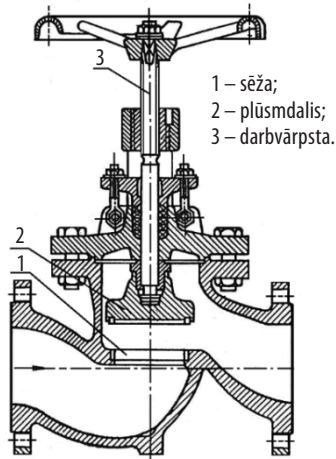
Par krāniem sauc armatūru ar slēgu lodes vai konusa formā, kas var griezties ap plūsmai perpendikulāru asi (2.18. att.).

Slēdzējķermeņa vidū ir cilindriska atvere, atvērtiem krāniem ir neliela hidrauliskā pretestība. Krānus parasti izmanto, lai noslēgtu vai atvērtu plūsmu. Lodveida krānus izveido arī kā trīs ceļu krānus, ar kuriem plūsmu var sadalīt divās plūsmās un otrādi.

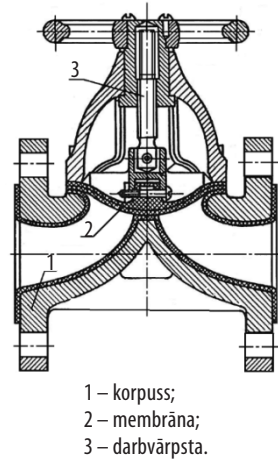
2.



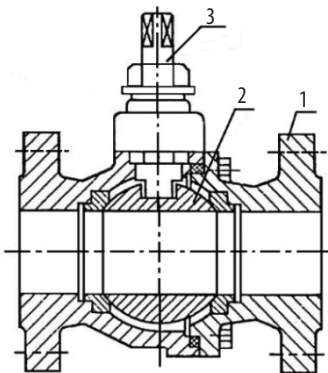
2.15. att. Aizbīdnis.



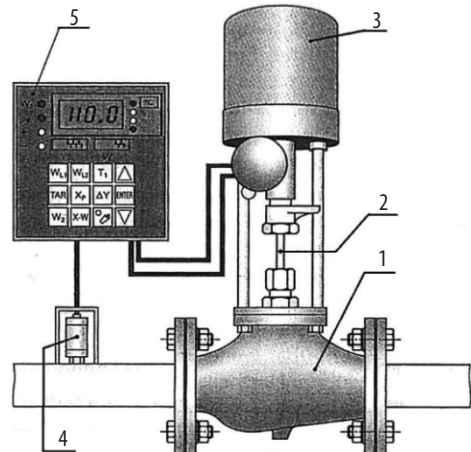
2.16. att. Ventilis.



2.17. att. Membrānas ventilis.



2.18. att. Lodveida krāns.

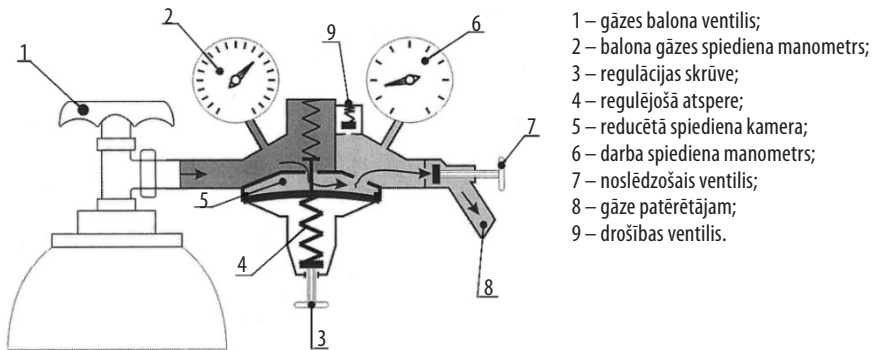


2.19. att. Regulējošais ventilis.

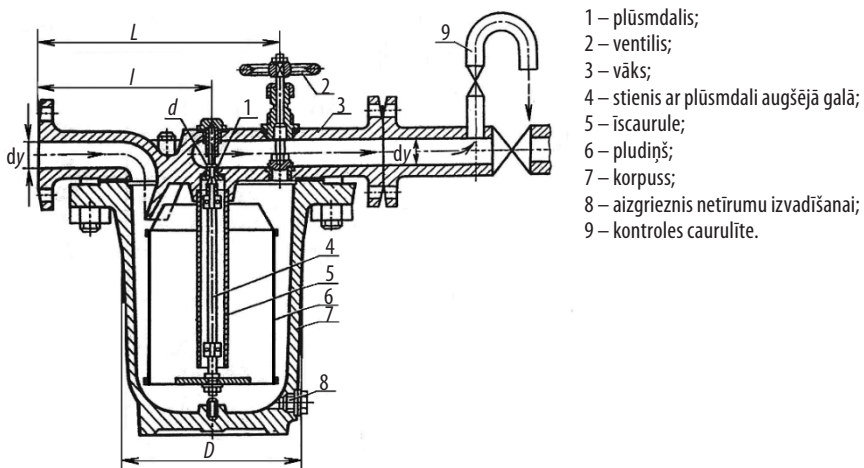
Regulējošā armatūra sastāv no dažāda veida regulējošiem vārstiem, ventiļiem, reduktoriem. To izmantojot, procesa tehnoloģiskos parametrus uztur noteiktās robežās. Parasti regulējošā armatūra ir daļa no automatiskās procesa regulēšanas sistēmas. Dažreiz tā var darboties kā pastāvīga ierīce, piemēram, nelielās ķīmiskās iekārtās, kas netiek vadītas no centrālās tehnoloģiskā procesa vadības pulsts. 2.19. attēlā redzams ventilis ar elektropiedziņu, kas ir izveidots kā caurteces regulators.

Procesorā iestāda nepieciešamo plūsmas patēriņu, servopiedziņa atver ventili noteiktam caurplūdes daudzumam. Kontrolieris – patēriņa mērītājs – fiksē faktisko tilpuma ražību. Ja rodas novirzes no nepieciešamās ražības, procesors caur servopiedziņu maina ventiļa atvērumu, līdz tiek sasniegta nepieciešamā ražības vērtība.

Pie regulējošās armatūras pieder arī ierīces spiediena samazināšanai un re-



2.20. att. Gāzes balona spiediena reduktors.



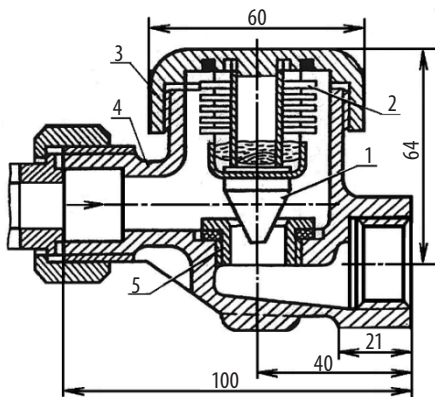
2.21. att. Kondensāta novadītājs ar atvērtu pludiņu.

gulēšanai. Spiediena regulatori gāzes spiedienu balonā reducē uz nepieciešamo pazemināto spiedienu. 2.20. attēlā redzama balona gāzes reduktora principiālā shēma.

Pie fāžu sadalošās armatūras galvenokārt pieder condensāta aizvadītāji. Ja siltuma apmaiņas iekārtās par siltuma nesēju izmanto tvaiku, to efektīvas darbības nodrošināšanai no siltummaiņa automātiski jānovada condensāts, bet jāaiztur tvaiks, kas vēl nav atdevis siltumu. Lai atdalītu tvaiku no condensāta, izmanto condensāta izvadītājus, no kuriem condensāts pa cauruļvadiem tiek novadīts atpakaļ uz katlu māju. To darbība pamatojas uz condensāta un tvaika temperatūras vai blīvuma starpību.

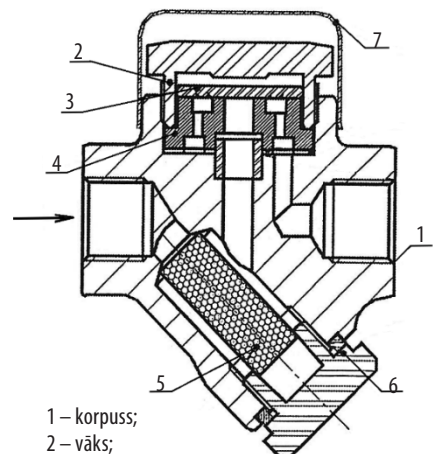
Eksistē virkne condensāta aizvadītāju konstrukciju, no kurām populārākās ir pludiņveida, termostatiskais un termodinamiskais condensāta aizvadītājs.

Viena no vecākajām un rūpniecībā plaši lietotajām konstrukcijām ir condensāta aizvadītājs ar atvērtu pludiņu (2.21. att.). Tā darbības princips ir šāds: condensāts no siltummaiņa ieplūst korpusā (7), pludiņš (6), kas tajā atrodas, uzpeld, ar plūsmdali (1), kas atrodas stienā (4) galā, aizverot atveri korpusa vākā (3). Stienis ir stingri piestiprināts pludiņa dibenam. Ūdens pakāpeniski piepilda korpusu (7) un sāk pārlīt vaļējā pludiņā (6), kas pēc laika sava svara ietekmē nogrimst, atverot caurumu vākā (3). Tvaika virsspiediena ietekmē pa šo caurumu condensāts no pludiņa tiek izspiests kondensāta maģistrālajā



- 1 – plūsmdalis;
- 2 – silfons;
- 3 – vāks;
- 4 – korpus;
- 5 – plūsmdaļa ligzda;
- 6 – ieejas išcaurule.

2.22. att. Termostatiskais condensāta aizvadītājs.



- 1 – korpus;
- 2 – vāks;
- 3 – disks;
- 4 – maināma slēdzēj mehāniska ligzda;
- 5 – sietveida filtrs;
- 6 – aizgrieznis;
- 7 – aizsegvāks.

2.23. att. Termodinamiskais condensāta aizvadītājs.

cauruļvadā. Iztukšotais pludiņš uzpeld, aizverot caurumu vākā. Pludiņš un līdz ar to arī kondensāta aizvadītājs darbojas periodiski.

2.22. attēlā redzams termostatiskais kondensāta aizvadītājs. Tā darba elements ir silfons (termostats) no plāna elastīga metāla, kas pildīts ar viegli virstošu šķidrumu, parasti metilspirta un propilspirta maisījumu.

Ieplūstot tvaikam, silfons (2) uzsilst un izplešas, plūsmдалис (1) noslēdz caurumu ligzdā (5). Kondensātam atdziestot, silfons saraujas, pa caurumu ligzdā iztek karsts, bet ne verdošs kondensāts.

Tehnoloģiskajās līnijās vidēja un augsta spiediena sistēmās ļoti plaši lieto termodinamiskos kondensāta aizvadītājus (2.23. att.). Maksimālais darba spiediens šajās iekārtās var sasniegt vairāk nekā 40 bar, maksimālā darba temperatūra – 300 °C.

Kondensāta aizvadītājs sastāv no korpusa (1), vāka (2), diska (3) un maināmas slēdzēj mehānisma ligzdas (4). Iekārta apgādāta ar sietveida filtru, kas neļauj tai ātri aizsērēt. Kondensāta aizvadītāja darba elements ir kustīgs disks (3), kas atrodas virs maināmas ligzdas (4). Termodinamiskā kondensāta aizvadītāja darbības pamatā ir kondensāta un tvaika plūsmas ātrumu starpība spraugā starp disku un ligzdu (Bernulli princips). Plūstot kondensātam ar nelielu ātrumu, disks plūsmas spiediena ietekmē paceļas un izlaiž no sistēmas kondensātu. Pieplūstot tvaikam ar lielu ātrumu, plūsmas kinētiskais spiediens pieaug, bet statiskais samazinās un disks nolaižas ligzdā. Tvaiks nonāk diska aizmugurē, palielinot tur statisko spiedienu, atvere pilnīgi noslēdzas. Īsā laikā tvaiks atdziest, kondensējas, statiskais spiediens uz diska virsmu samazinās, pieplūstošā kondensāta un tvaika maisījuma spiediena rezultātā disks atkal paceļas un cikls atkārtojas. Atstarpi virs diska (3) regulē, izmantojot otru vāku. Termodinamiskais kondensāta aizvadītājs strādā ritmiski, tā ražība ir atkarīga no tvaika virsspiediena sistēmā un nosacītā caurteces diametra.

3. BIRTOŠU MATERIĀLU GLABĀŠANA, TRANSPORTĒŠANA, DOZĒŠANA

Par birstošiem materiāliem sauc materiālus, kas sastāv no noteikta izmēra cietām daļiņām: putekļiem, pulveriem, graudainiem un gabalveida materiāliem. Tie ir sastopami praktiski visās pārstrādes rūpniecības nozarēs, ieskaitot ķīmisko rūpniecību. 3.1. tabulā doti daži birstošo materiālu izmantošanas piemēri.

3.

3.1. tabula
Birstošo materiālu izmantošana

Birstošais materiāls	Rūpniecības nozare
Kaļķis, cements, ģipsis, smiltis, grants	Būvmateriālu ražošana
Oksīdi, māli, minerālsmiltis	Keramika, stikla ražošana
Ķīmikālijas, mazgājamie līdzekļi	Ķīmiskā industrija
Zāļu formas, pūderi	Farmaceutiskā, kosmētiskā rūpniecība
Pigmenti, pildvielas	Laku un krāsu rūpniecība
Polimēru granulas, pildvielas	Polimēru pārstrāde
Putraimi, milti, pildvielas	Pārtikas rūpniecība

Birstošo materiālu tilpumu veido dažādas formas daļiņas, kas saskaras cita ar citu, kā arī tukšums starp tām. Daļiņas ir saistītas savā starpā ar dažādām saitēm, kas ir atkarīgas no daļiņu formas un izmēra, mitruma, vielas īpašībām utt. Tās veido un nosaka birstošā materiāla struktūru.

Birstošie materiāli pēc savas dabas nav pieskaitāmi ne cietiem ķermeņiem, ne šķidrumiem. Šo materiālu spēja pieņemt trauka formu un kustēties plūsmā dara tos līdzīgus šķidrumiem. Tajā pašā laikā katrai atsevišķai daļiņai ir cieta ķermeņa īpašības. Birstošie materiāli, kas sastāv no šīm daļiņām, spēj uzņemt ārējo slodzi, kas tos dara līdzīgus cietiem ķermeņiem. Vienlaicīgi atšķirībā no šķidrumiem tiem ir ierobežots kustīgums, ko nosaka daļiņu un virsmas mijiedarbības jeb berzes spēki, daļiņu savstarpējās saķeres spēki. Ja saķeres spēki ir mazāki par berzes spēkiem, materiāls ir viegli birstošs. Materiāla birstamību ietekmē mitrums, daļiņu forma, granulometriskais sastāvs u. c. faktori. Mītriem materiāliem ir raksturīgi lielāki savstarpējās saķeres spēki, un tie noteikti slikti birst.

Atbilstīgi konkrētam tehnoloģiskam procesam visi birstošie materiāli ir jāglabā, jātransportē un jādozē.

3.1. Silosi un bunkuri

Lai nodrošinātu jebkuras tehnoloģiskās līnijas stabilu darbību, vajadzīga izejvielu rezerve. Birstošie materiāli parasti tiek glabāti bunkuros un silosos. Atsevišķos tehnoloģiskajos procesos bunkurus vai silosus izmanto, lai glabātu starpproduktus, nodrošinot atsevišķu iekārtu nepārtrauktu darbību, kā arī glabātu gatavo produkciju pirms fasēšanas.

3.

3.1. attēlā redzamas divas tipiskākās kvadrātbunkuru un silosu formas. To augšējai daļai parasti ir prizmas (a) vai cilindra (b) forma, bet apakšējā daļa ir izveidota konusa vai nošķeltas piramīdas formā. Tvertņu izmēru un formu nosaka materiāla īpašības, daļiņu lielums un tehnoloģiskā procesa prasības. Silosus izmanto, lai glabātu viegli birstošus sīkdispersus, granulveida materiālus. Pateicoties vienkāršai montāžai un ekspluatācijai, ķīmiskās rūpniecības uzņēmumos plaši lieto kvadrātbunkurus ar vienu centrālo izlādes atveri dažādu birstošu materiālu glabāšanai. Ekspluatācijas laikā šāda tipa tvertnēs sienas elementu savienojuma vietās var veidoties zonas, kur materiāls uzkrājas. Otra problēma, kas var rasties silosu un bunkuru ekspluatācijas laikā, ir birstošā materiāla daļiņu saķeršanās vai sablīvēšanās, kā rezultātā tvertnes koniskajā daļā izveidojas materiāla velves.

Tvertnes tilpumu V (m^3) nosaka birstošā materiāla patēriņš, beramais blīvums un paredzamais glabāšanas laiks, ko nosaka tehnoloģiskās prasības:

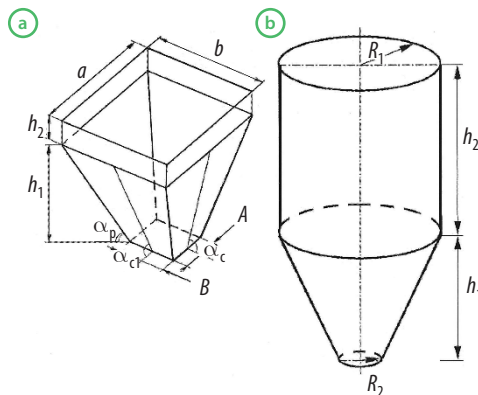
$$V = \frac{G_p \cdot \tau}{\rho_b \cdot \varphi}, m^3, \quad (3.1.)$$

kur G_p – materiāla patēriņš, kg/s (kg/h);

τ – glabāšanas laiks, s (h);

ρ_b – beramais blīvums, kg/m^3 ;

φ – aizpildījuma koeficients, parasti tas ir 0,85–0,9.



3.1. att. Kvadrātbunkuru un silosu formas.

Rūpnieciski izmantojamo bunkuru un silosu tilpums var sasniegt ievērojamu apjomu.

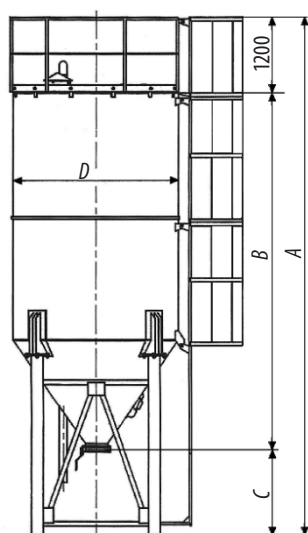
3.2. attēlā redzams silosa konstrukcijas, tvertnes tilpuma un atbilstīgo ģeometrisko izmēru piemērs.

Lai nodrošinātu drošu un efektīvu silonu un bunkuru izmantošanu, pareizi jāaprēķina slodzes, izlādes atvere un koniskās daļas slīpuma leņķis.

Slodze, kas jāiztur tvertnēm, ir atkarīga no birstošā materiāla īpašībām, lielā mērā no silosu lieluma un konstrukcijas, arī no uzpildīšanas un izlādes nosacījumiem. Atbilstīgi DIN 1055-6 normām aprēķinus veic un silosus iedala trīs klasēs:

- ◆ silosi, kuru ietilpība ir mazāka par 100 t;
- ◆ silosi, kuru ietilpība ir 100–10 000 t;
- ◆ silosi, kuru ietilpība ir lielāka par 10 000 t.

No silosu un bunkuru stiprības viedokļa svarīgi ir noskaidrot, kāda ir slodze uz konstrukcijas sienām, piepildot tās ar birstošu materiālu. Kā piemēru var apskatīt aprēķina principus slodzes noteikšanai uz silosa sienām vertikālajā daļā. Aprēķiniem pieņem, ka birstošais materiāls ir nepārtraukta vide, tātad šajā gadījumā ir piemērojami mehānikas likumi, kas attiecas tieši uz nepārtrauktu vidi.



V, m^3	A, mm	B, mm	C, mm	D, mm
20	8425	6120	1105	2480
40	12925	10620	1105	2480
60	13200	10500	1500	2900
120	15685	12435	2050	3812
300	23558	20308	2050	4143

3.2. att. Silosa konstrukcijas un galveno ģeometrisku izmēru piemērs.

Slodzi uz konstrukcijas sienām var aprēķināt, izmantojot A. Jansena (1895) teoriju, apskatot spēkus, kas darbojas uz horizontālu elementu diska formā silosa iekšienē noteiktā attālumā (z) no materiāla slāņa virsmas (3.3. att.).

Silosa šķērsriezuma laukumā (S) vertikālā slodze (P_v) ir nemainīga, ja materiāla blīvums (ρ) ir nemainīgs, spēku līdzsvars uz horizontālā elementa ir:

$$S \cdot P_v + \rho \cdot g \cdot S \cdot dz = S(P_v + dP_v) + \tau \cdot U \cdot dz, \quad (3.2.)$$

3.

kur S – šķērsriezuma laukums, m^2 ;

P_v – vertikālā slodze, Pa;

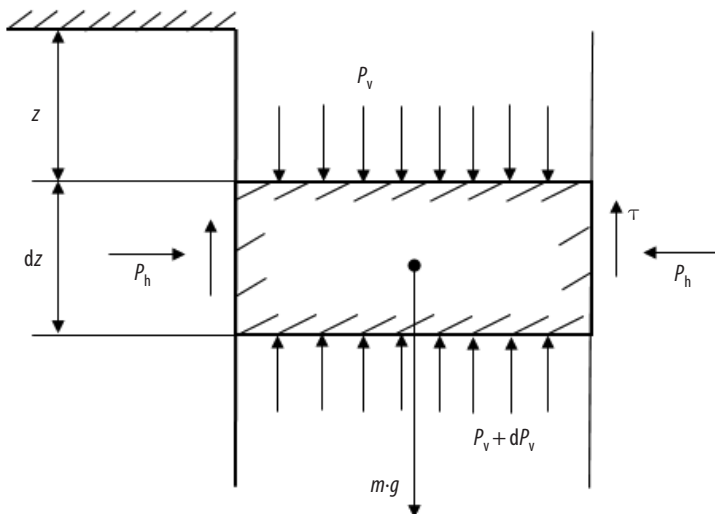
ρ – materiāla blīvums, kg/m^3 ;

τ – bīdes spriegumi berzes dēļ, Pa;

U – silosa iekšējais perimetrs, m.

Ja vertikālā virzienā uz materiāla elementu darbojas vertikālā slodze (P_v), tā izraisa spriegumu jeb slodzes rašanos horizontālā virzienā (P_h). Lai aprakstītu attiecību starp šīm slodzēm (P_v) un (P_h), izmanto no grunts mehānikas zināmo horizontālās slodzes attiecību $1 = P_h/P_v$. Aprēķinot silosa raksturlielumus, šo attiecību apzīmē ar K un sauc par silosa slodzes koeficientu (*stress ratio*). K vērtības katram birstošam materiālam atšķiras. Ja ideālam cietam ķermenim $K=0$, tad šķidrūmam $K=1$, vidējās K vērtības birstošiem materiāliem atrodas robežās no 0,3 līdz 0,6. Tātad šajā gadījumā horizontālo slodzi var noteikt:

$$P_h(z) = K \cdot P_v(z). \quad (3.3.)$$



3.3. att. Materiāla elements silosā.

Bīdes spriegumu materiāla un sienas berzes dēļ var noteikt šādi:

$$\tau(z) = \mu \cdot P_h = \operatorname{tg} \varphi \cdot P_h(z), \quad (3.4.)$$

kur φ – berzes leņķis;

$\mu = \operatorname{tg} \varphi$ – sienas berzes koeficients.

No (3.3.) un (3.4.) vienādojuma iegūst bīdes spriegumu:

$$\tau(z) = K \cdot \mu \cdot P_v(z). \quad (3.5.)$$

Ievietojot iegūto izteiksmi (3.5.) līdzsvara vienādojumā (3.2.) un izsakot to diferenciālvienādojuma formā, iegūst:

$$\frac{dP_v(z)}{dz} + \frac{U}{S} \cdot K \cdot \mu \cdot P_v(z) = \rho \cdot g. \quad (3.6.)$$

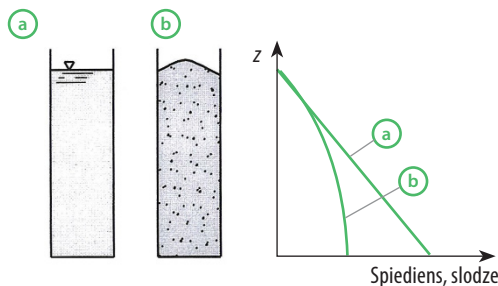
No iegūtā vienādojuma iespējams aprēķināt vertikālo slodzi piepildītā silosā ar robežnosacījumu, ka slodze virs birstošā materiāla ir nulle ($P_v = 0$ pie $z = 0$):

$$P_v = \frac{\rho \cdot g \cdot S}{K \cdot \mu \cdot U} \left[1 - e^{\left(-K \cdot \mu \cdot \frac{U}{S} \cdot z \right)} \right]. \quad (3.7.)$$

Kā redzams no (3.7.) vienādojuma, pieaugot materiāla slāņa augstumam (z), vertikālais spiediens atšķirībā no šķidrums (slodze) nepieaug lineāri (3.4. att.).

Berzes dēļ starp birstošo materiālu un tvertnes sienu materiāls uzņem daļu no sava svara, kā rezultātā vertikālā slodze virzienā uz leju pakāpeniski samazinās un robežgadījumā kļūst nemainīga, sasniedzot maksimālo lielumu:

$$P_{v \max} = \frac{\rho \cdot g \cdot S}{K \cdot \mu \cdot U}. \quad (3.8.)$$



3.4. att. Spiediena jeb slodzes lieluma izmaiņas silosā šķidrums (a) un birstošā materiāla (b) gadījumā.

Attiecīgi maksimālā slodze uz tvertnes sienām horizontālā virzienā no (3.3) vienādojuma ir:

$$P_{h\max} = \frac{\rho \cdot g \cdot S}{\mu \cdot U}. \quad (3.9)$$

Slodzes koeficienta K , berzes koeficienta μ un īpatnējā svara $\gamma = \rho \cdot g$ skaitliskās vērtības jānosaka katram materiālam eksperimentāli, turklāt berzes koeficienta vērtības ir atkarīgas no virsmas raupjuma. Atkarībā no sienas virsmas stāvokļa tās iedala četrās kategorijās, piemēram, D1 atbilst pulētai virsmai, bet kategorija D3 – raupjai, nelīdzenei virsmai. 3.2. tabulā dotas attiecīgo lielumu skaitliskās vērtības dažiem birstošiem materiāliem.

Silosus iztukšojot, materiāla masa, kas atrodas silosā, tiek pilnīgi vai daļēji iekustināta, tā mainot slodzes sadalījumu. Vertikālā slodze kļūst mazāka, bet horizontālā – lielāka. Aprēķinos šo efektu vērtē ar tā saucamo izlādes faktoru $C_h > 1$. Horizontālo slodzi, iztukšojot silosu, nosaka:

$$P'_h = C_h \cdot P_h, \quad (3.10)$$

kur $C_h \approx 1,15-1,20$.

3.2. tabula
Dažu birstošo materiālu parametru skaitliskās vērtības slodzes aprēķiniem silosos

Materiāls	Īpatnējais svars γ , KN/m ³	Iekšējais berzes leņķis φ , grad	K	Berzes koeficients	
				μ_1	μ_3
Kvieši	7,5–9,0	30	0,54	0,24	0,57
Lopbarības milti	6,5–7,0	42	0,36	0,24	0,48
Betona grants	17,0–18,0	31	0,52	0,39	0,59
Kaļķu milti	11,0–13,0	30	0,54	0,41	0,56
Cements	13,0–16,0	30	0,54	0,41	0,51
Fosfāti	16,0–22,0	29	0,56	0,39	0,54

Lielākā horizontālā slodze rodas pārejā no silosa cilindriskās daļas uz konisko, tur mainās slodzes sadalījums un var rasties ekstrēmas slodzes $P'_{h\max}$, kuras var novērtēt:

$$P'_{h\max} \approx P_{v\max} \cdot \frac{(1 + \sin \varphi_e)}{(1 - \sin \varphi_e)}, \quad (3.11)$$

kur φ_e – iekšējais jeb efektīvais leņķis, materiālam stacionāri plūstot.

Iztukšojot silosus vai bunkurus, no tehnoloģiskā viedokļa ir divi svarīgi momenti: iztecēšanas plūsmas profils un velyju veidošanās. Iztektot birstošam

materiālam, novērojami divi principiāli atšķirīgi materiāla plūsmas profili: masas plūsma un kodolu plūsma (3.5. att.).

Masas plūsmas gadījumā notiek vienlaicīga materiāla kustība visā tvertnē, kas nodrošina vienmērīgu materiāla plūsmu.

Kodolu plūsma veidojas, ja materiāla kustība notiek šaurā zonā virs izplūdes atveres. Materiāliem no augšējiem slāņiem pārvietojoties lejup, var veidoties nevienmērīga, pulsējoša materiāla plūsma.

Plūsmas veidu ietekmē tvertnes sienas berzes leņķis (φ), efektīvais berzes leņķis (φ_e), tvertnes atveres lielums un konusa leņķis.

Stabilu birstošā materiāla plūsmu gravitācijas spēka ietekmē dažādiem materiāliem var nodrošināt tikai noteikta izmēra un formas izplūdes atvere, turklāt nav pieļaujama arī materiāla sablīvēšanās un statisko velvju veidošanās virs atveres. Atveres izmērus parasti aprēķina, izmantojot empīriskas formulas, kas ļauj vērtēt birstošu materiālu fizikāli mehāniskās īpašības. Pietiekami vienmērīgu plūsmu, kas turklāt mazina iespēju veidoties velvēm, nodrošina apaļas formas atvere ar diametru:

$$D > 10d_{\max}, \quad (3.12.)$$

kur d_{\max} – maksimālais daļiņas lielums.

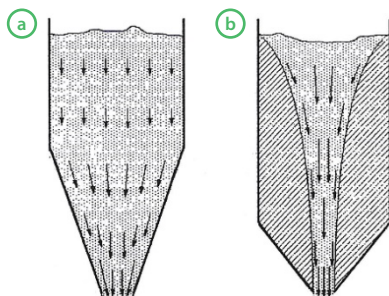
Taisnstūra formas atveres platums:

$$B > 7d_{\max}. \quad (3.13.)$$

Birstošā materiāla plūsmu būtiski ietekmē arī tvertnes koniskās daļas slīpuma leņķis (α). Parasti slīpuma leņķi nosaka, izmantojot empīrisku formulu:

$$\alpha = \varphi_e + (5 - 10^\circ), \quad (3.14.)$$

kur φ_e – materiāla iekšējās berzes leņķis, kas viegli birstošiem materiāliem ir vienāds ar dabiskā nobiruma leņķi.

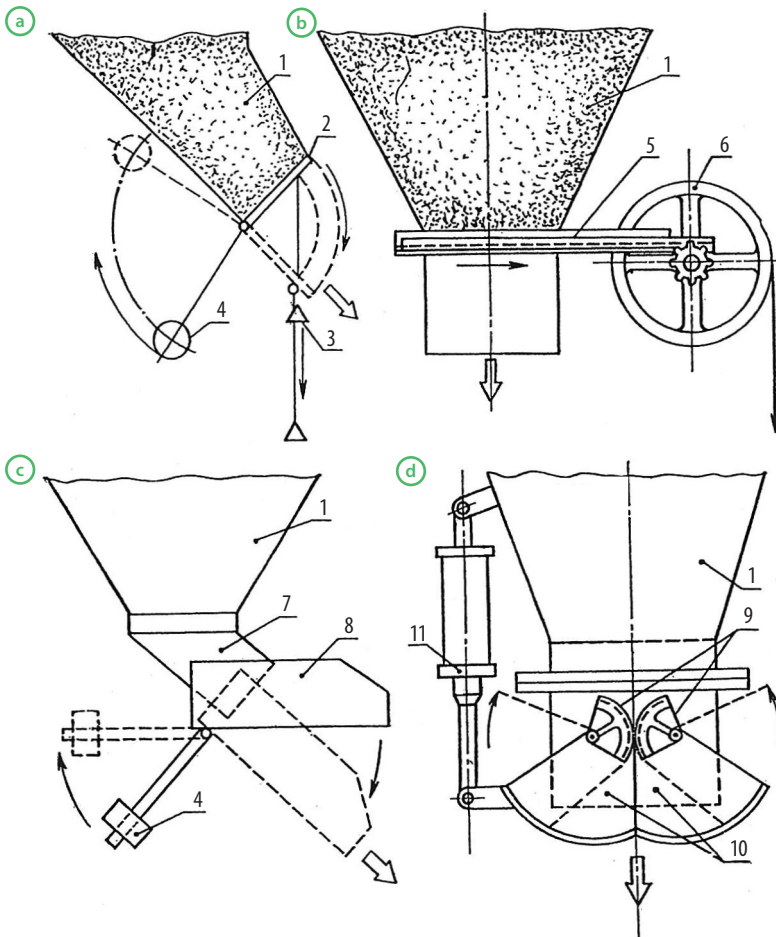


3.5. att. Birstošu materiālu plūsmu pamatveidi: masas (a), kodolu (b).

Bunkuru un silosu izplūdes atveri parasti noslēdz, izmantojot dažāda tipa slēgus. Slēgiem jāiztur maksimāla slodze. Tos izmanto, ja materiāls nav jādozē.

Visplašāk lieto šādus tvertņu slēgus: aizvara tipa, aizbīdņa, renes un sektora slēgus (3.6. att.).

Aizvara tipa slēgu (3.6. (a) att.) lieto, ja tvertne jāiztukšo pilnīgi. Daļēja izkraušana nav iespējama, jo aizvērt slēgu slodzes apstākļos nav iespējams. Slēgs sastāv no kustīga vārsta (2), kas piestiprināts tvertnes (1) izplūdes atveres galā un tiek piespiests ar atsvaru (4).



3.6. att. Slēgu veidi: (a) – aizvara, (b) – aizbīdņa, (c) – renes, (d) – sektora slēgi.

Aizbīdņa slēgā (3.6. (b) att.) tvertnes (1) izplūdes atvere tiek noslēgta ar plakanu plāksni (5), ko pārvieto ar zobpārveda (6) palīdzību. Aizbīdņa slēgus var novietot horizontāli, vertikāli, slīpi. Ar to palīdzību iespējams regulēt padevi.

Renes slēgs (3.6. (c) att.) dod iespēju slēgt izplūdes atveri pilnai tvertnei, kā arī regulēt padevi, mainot renes leņķi. Tvertnes (1) izplūdes atveri (7) noslēdz kustīga rene (8), kas savienota ar atsvaru (4).

Dažādu birstošu materiālu gadījumā plaši lieto sektora slēgu (3.6. (d) att.) ar manuālu vai automātisku vadību. Slēga sektori (10) kinemātiski saistīti ar zobpārvedu (9), sektoru kustību nodrošina pneimatiskais pievads (11).

3.2. Birstošu materiālu transportēšana

Tehnoloģiskie procesi pamatķīmijas uzņēmumos, pārtikas rūpniecībā, cementa, būvmateriālu, stikla ražošanā ir saistīti ar liela apjoma birstošu materiālu transportēšanu. Pēc spēka pielikšanas veida pārvietojamam materiālam transporta iekārtas iedala: 1) iekārtās, kurās materiālu pārvieto mehāniskā spēka ietekmē, lietojot elektromotora piedziņu (dažāda veida konveijeri); 2) pneimotoporta vai hidroporta iekārtās, kurās materiālu attiecīgi transportē ar gaisa vai ūdens plūsmu. Savukārt konveijerus iedala mašīnās ar lokanu velkošo mehānismu un bez tā. Pie pirmajiem pieder lentes, skrāpju konveijeri, elevatori, pie otriem – gliemežkonveijeri un vibrokonveijeri.

3.2.1. Lentes konveijeri

Lentes konveijeri ir visplašāk izplatītie mehānismi visādu materiālu nepārtrauktai pārvietošanai. Šāda tipa konveijerus plaši izmanto visdažādākajās nozarēs materiālu transportēšanai – sākot no pulverveida līdz gabalveida krāvām. Lentes konveijeri var būt stacionāri vai pārvietojami. Ķīmiskajā rūpniecībā izmanto galvenokārt stacionārus konveijerus.

Lentes konveijeru priekšrocības ir to vienkāršā konstrukcija, stabilitāte un drošība ekspluatācijā, iespēja mainīt raksturlielumus plašās robežās un pārvietot materiālu ievērojamā attālumā (līdz 3000 m), mazs elektroenerģijas patēriņš. Jāatzīmē arī galvenie lentes konveijera trūkumi. Ar tiem nevar pārvietot materiālus, kas stipri put, karstus ($t > 90\text{ °C}$) materiālus, maksimālais celšanas leņķis ir tikai 20° .

3.

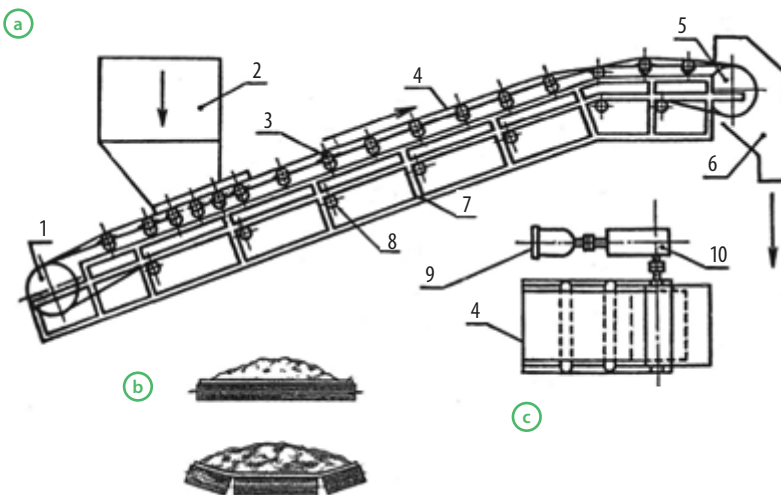
Lentes konveijers (3.7. att.) sastāv no spriegotājveltņa (1), kas ir kustīgs un nostiprināts rāmītī (7) un ar kuru var nospriegot bezgalīgu lenti (4), piedziņas veltņa (5), kurš nodrošina lentes kustību un kuru caur reduktoru (10) griež elektromotors (9). Lente balstās uz rulliņiem (3, 8), materiālu padod, izmantojot bunkuru (2) un izkrauj, lietojot piltuvi (6).

Lentes izgatavo no gumijas, daudzkārtainas armētas gumijas vai citiem sintētiskiem materiāliem speciāliem nolūkiem. Lentes materiāls un izmēri ir standartizēti, tās platums var būt robežās no 300 mm līdz 2400 mm, kustības ātrums parasti ir robežās no 1 m/s līdz 4 m/s. Atkarībā no atbalsta ruļļu veida lentei ir plakana vai renes forma. Konveijerus ar plakānu lenti biežāk izmanto gabalveida izstrādājumu vai materiālu transportēšanai.

Konveijeru tehnoloģiskais aprēķins ietver lentes platuma aprēķinus, ņemot vērā ražību G_r (t/h, kg/s) un piedziņas jaudu N (kw). Konveijera masas ražību nosaka ar vienādojumu:

$$G_r = S \cdot v \cdot \rho_b, \text{ t/h}, \quad (3.15.)$$

kur S – materiāla šķērsriezuma laukums uz lentes, m^2 (atkarīgs no lentes platuma B (m), lentes formas un birstošā materiāla dabiskā slīpuma leņķa);
 v – lentes kustības ātrums, m/s;
 ρ_b – beramais blīvums, t/m^3 .



3.7. att. Lentes konveijers:
 (a) – kopskats no sāniem, (b) – atbalsta rulliņu veidi, (c) – konveijera piedziņa.

Nepieciešamo lentes platumu B (m), ņemot vērā ražību, var aprēķināt:

$$B = 1,1 \left(\sqrt{\frac{G}{C \cdot K_b}} + 0,05 \right), \text{ m}, \quad (3.16.)$$

kur C – koeficients, kas ir atkarīgs no lentes formas, birstošiem materiāliem no dabiskā slīpuma leņķa, $C \approx 240-650$;

K – koeficients, kas novērtē pacēluma leņķi:

Pacēluma leņķis	$\beta, ^\circ$	10	12	16	20
Koeficients	K	1,0	0,97	0,92	0,85

Jaudu uz piedziņas elementa vārpstas N_v (W) var aprēķināt ar orientējošu vienādojumu:

$$N_v = \frac{G_r (f_0 L \pm H) g}{3,6}, \text{ W}, \quad (3.17.)$$

kur G_r – masas ražība t/h;

f_0 – kopējais pretestības koeficients, ar kuru vērtē pretestību veltnos, atbalsta rullīšos u. c., $f = 0,1 \dots 4,2$;

L – konveijera garums, m;

H – celšanas augstums, m.

Elektromotora jauda ir

$$N_{Dz} = \frac{K_r \cdot N_v}{\eta}, \text{ W}, \quad (3.18.)$$

kur K_r – jaudas rezerves koeficients ($K_r = 1,15 \dots 1,25$);

η – piedziņas mehānisma lietderības koeficients.

3.2.2. Skrāpju konveijeri

Skrāpju konveijeri ir iekārtas birstošu materiālu nepārtrauktai transportēšanai, izmantojot skrāpjus, kas ir piestiprināti pie velkošajām ķēdēm un kustas pa noteikta izmēra reni. Izmanto birstošu, galvenokārt karstu materiālu transportēšanai tieši no apdedzināšanas krāsnīm. Šos konveijerus raksturo vienkārša konstrukcija, iespēja ekspluatēt ar lielāku celšanas leņķi (līdz 40°), vienlaicīgi ar transportēšanu var realizēt citas tehnoloģiskās operācijas (dzesēšana, mazgāšana u. c.).

Skrāpju konveijeru galvenie parametri ir skrāpju izmērs, ķēdes kustības ātrums (0,1–0,4 m/s), transportēšanas attālums (līdz 60 m), transportiera ražība (līdz 300 t/h).

Skrāpju konveijers (3.8. att.) sastāv no piedziņas zobrata (1), kas caur reduktoru ir savienots ar elektromotoru, un spriegotājzobrata (2). Materiāls pārvietojas pa reni (3), izmantojot skrāpjus (4), kas nostiprināti uz velkošajām ķēdēm (5). Ķēdes balstās uz atbalsta ruļļiem (6), spriegojumu regulē ar skrūvēm (7). Ķēdes balstās uz atbalsta ruļļiem (6), spriegojumu regulē ar skrūvēm (7).

Skrāpju konveijeru tilpuma ražību V_k (m^3/s) var aprēķināt ar vienādojumu:

$$V_k = S \cdot v \cdot \varphi \cdot C_2 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}}, \quad (3.19.)$$

kur S – renes šķērsriezuma laukums, m^2 ;

v – skrāpju kustības ātrums, m/s ;

φ – renes piepildījuma koeficients, kas mainās atkarībā no skrāpju augstuma un pārvietojamā materiāla (0,5–0,8);

C_2 – koeficients, ar kuru vērtē celšanas leņķi.

Masas ražību G (kg/s) var noteikt:

$$G_r = V_k \cdot \rho_b \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}, \quad (3.20.)$$

kur ρ_b – beramais blīvums, kg/m^3 .

Dzinēja jaudu var aprēķināt, izmantojot šādu vienādojumu:

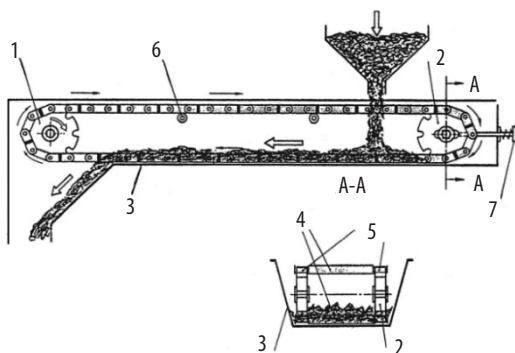
$$N_{Dz} = \frac{N_v \cdot v}{102 \eta_k} \beta, \text{ kW}, \quad (3.21.)$$

kur N_v – vilcējspēks, N ;

v – kustības ātrums, m/s ;

η_k – piedziņas kopējais lietderības koeficients;

β – jaudas rezerves koeficients.



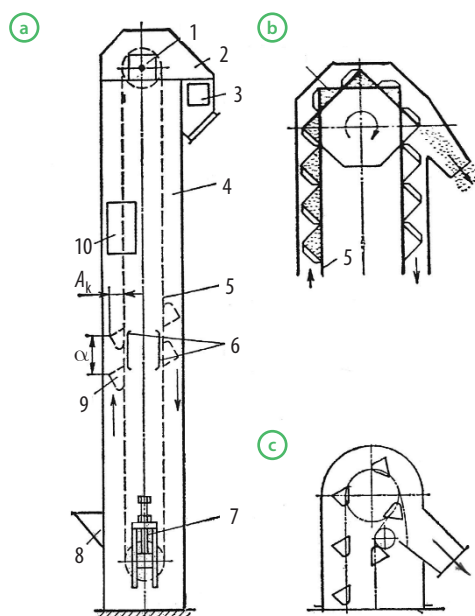
3.8. att. Skrāpju konveijers.

3.2.3. Elevatori

Elevatori pieder pie konveijera veida mašīnām ar velkošo mehānismu. Tos lieto, lai pārvietotu birstošus materiālus vertikālā virzienā. Elevatoros materiālu pārvieto ar kausiem, kas piestiprināti pie elastīgas lentes vai ķēdes – kausi var būt vai nu stingri piestiprināti pie lentes, vai arī kustīgi, šūpuļveida, nostiprināti uz ass starp divām velkošām ķēdēm. Ar šāda tipa elevatoriem materiālus var pārvietot gan horizontāli, gan vertikāli.

Elevatorus raksturojošie parametri ir ražība, celšanas augstums, lentes kustības ātrums un nepieciešamā dzinēja jauda. Elevatoru priekšrocība ir vienkārša konstrukcija, stabila darbība, iespēja izveidot slēgtu, hermētisku apvalku, kas aizsargā apkārtējo vidi no putekļiem un trokšņa. Izmantojot elevatorus, var pacelt materiālus ievērojamā (60–90 m) augstumā un sasniegt ražību līdz 500 m³/h.

Elevatori (3.9. att.) birstošu materiālu pacelšanai noteiktā augstumā sastāv no bezgalīgas lentes (5) vai velkošām ķēdēm, kurai piestiprināti kausi (9), lentes kustību nodrošina piedziņas veltnis (1), kas caur reduktoru savienots ar elektromotoru. Lentes saķeri ar veltni nodrošina spriegošanas mehānisms (7). Materiālu pilda kausos pa atveri (8), ceļ augšup un izkrauļ pa atveri elevatora augšpusē (2).



3.9. att. Elevatora shēma: (a) – vertikālais kausu elevators, (b) – brīvā vai centrālās izmantošana, (c) – pašteses izmantošana.

Pēc izkraušanas veida elevatorus iedala:

car centrālās birstošās materiāla izkraušanas mehānismu (3.9. (b) att.), lieto ātrgaitas elevatoros;

- ♦ ar pašteces brīvās izkraušanas mehānismu (3.9. (c) att.), atpakaļgaitā lentes nobīdīta, lieto lēngaitas elevatoros. Elevatora korpusā (4) parasti ierīko lūkas (10), (3) kustīgo elementu apskatei un remontam. Lai stabilizētu lenšu kustību, korpusā (4) uzstāda vadules (6).

Lentes kustības ātrums (v) elevatoros ir robežās no 0,4 m/s līdz 2,5 m/s, ātrgaitas elevatoros $v = 1,3-2,0$ m/s, lēngaitas elevatoros $v = 0,4-0,8$ m/s. Elevatoru ražību orientējoši var aprēķināt ar vienādojumu:

$$G_r = 3,6 \frac{i_k \cdot \psi \cdot \rho_b \cdot v}{a}, \text{ t/h}, \quad (3.22.)$$

kur i_k – kausa tilpums, m^3 ;

ψ – piepildījuma koeficients, kas atkarīgs no birstošā materiāla ($\psi = 0,6-0,85$);

ρ_b – beramais blīvums, kg/m^3 ;

v – lentes kustības ātrums, m/s ;

a – kausu solis, $a = (2,5-3,0)h$, m ;

h – kausu augstums, m .

Nepieciešamo dzinēja jaudu elevatora darbināšanai var noteikt ar šādu formulu:

$$N_{Dz} = \frac{G_r \cdot H}{367 \eta_k} \left(1,15 + \frac{K}{\rho_b} \right) \beta, \text{ kW}, \quad (3.23.)$$

kur H – celšanas augstums, m ;

η_k – kopējais motora un piedziņas lietderības koeficients;

K – koeficients, kas atkarīgs no elevatora ražības ($K \approx 1500-550$);

β – jaudas rezerves koeficients.

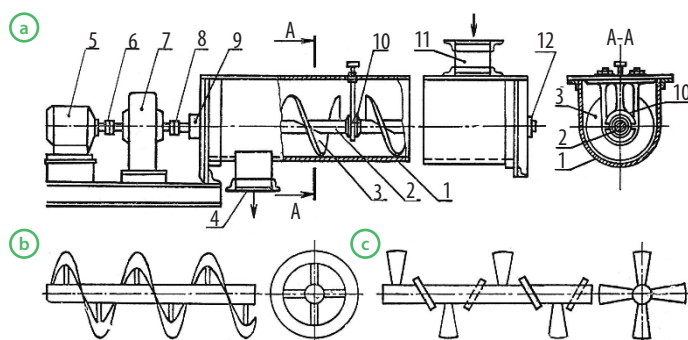
3.2.4. Gliemežtransportieri

Gliemežtransportierus izmanto, lai transportētu materiālus horizontāli vai nelielā slīpumā, celšanas leņķis nedrīkst būt lielāks par dabiskā nobiruma leņķi (3.10. att.).

Korpusā (1) ar cilindrisku dibenu novietota vārpsta (2), ko elektromotors (5) griež caur reduktoru (7). Vārpsta parasti sastāv no vairākām sekcijām, kas balstās gala (9), (12) un starpsekciju (10) gultņos. Sajūgi (6), (8) savieno elektromotora, reduktora un gliemeža vārpstas. Pārvietojamais materiāls tiek padots pa atveri (11) un izkrauts pa atveri (4). Atkarībā no transportējamā materiāla izmanto dažādas konstrukcijas gliemežus. Pulverveida, viegli birstošu sīkdispersu materiālu gadījumā izmanto gliemežus ar vienlaidu vītņi (3.10. (a) att.), mitru, lipīgu materiālu vai plastisku masu gadījumā – lentveida (3.10. (b) att.) vai lāpstiņus (3.10. (c) att.), kas uzmontētas uz vārpstas.

Gliemežtransportierus ķīmiskajā un pārtikas rūpniecībā izmanto, lai transportētu galvenokārt sausus un labi birstošus materiālus. Tie ir droši ekspluatācijā, tos ir vienkārši apkalpot, pastāv iespēja transportēt putekļainus, indīgus materiālus.

Gliemežtransportiera garums var sasniegt 60 m, atsevišķas gliemeža sekcijas garums no 2 m līdz 4 m, gliemeža diametrs parasti ir standartizēts un atsevišķiem iekārtu ražotājiem tas mainās robežās no 80 mm līdz 800 mm, gliemeža apgriezību skaits atkarībā no diametra un pārvietojamā materiāla mainās robežās no 20 līdz 180 apgriezieniem minūtē.



3.10. att. Gliemežtransportieris: (a) – vienlaidus, (b) – lentveida, (c) – lāpstiņu gliemeži.

Gliemežtransportiera ražību var aprēķināt ar šādu formulu:

$$G_r = 60 \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot S \cdot \psi \cdot \rho_b \cdot C_2, \text{ kg/h}, \quad (3.24.)$$

kur D – gliemeža diametrs, m;

S – vītnes solis, m;

ψ – konveijera piepildījuma koeficients;

ρ_b – beramais blīvums, kg/m^3 ;

C_2 – koeficients, kas ir atkarīgs no celšanas leņķa ($C_2 \approx 1,0-0,6$).

Izmantojot orientējošas formulas, var novērtēt nepieciešamo dzinēja jaudu (W):

$$N_{Dz} = \frac{9,81 G_r}{\eta_k} (L_g \cdot f + H) \beta, W, \quad (3.25.)$$

kur η_k – kopējais lietderības koeficients;

L_g – gliemežtransportiera horizontālās projekcijas garums, m;

f – pretestības koeficients, kas mainās atkarībā no transportējamā materiāla ($f \approx 1,2-4,0$);

H – celšanas augstums, m;

β – jaudas rezerves koeficients.

3.2.5. Pneimotransports

Pneimotransportu izmanto, lai pārvietotu sīkdispersus vai pulverveida materiālus. Pneimotransporta iekārtās materiāls pārvietojas pa cauruļvadiem ar gaisa plūsmu. Izmantojot šo metodi, iespējams transportēt materiālus ievērojamos attālumos – līdz pat 1800 m.

Pneimotransports ir progresīvs birstošu materiālu transportēšanas veids. Salīdzinot ar mehānisko transportu, tam ir virkne priekšrocību:

- ◆ elastīga transportēšanas virziena maiņa, kas ļauj organizēt transportēšanu mazās ražošanas platībās;
- ◆ cauruļvadi ir hermētiski, transportējamais materiāls nesaskaras ar apkārtējo vidi, tāpēc uzlabojas ražošanas telpu sanitārie apstākļi;
- ◆ vienkārša iekārtas montāža un procesa vadība, nav mehānisko pievadņu un kustīgu detaļu;
- ◆ iespējams pārvietot materiālus no dažādiem punktiem uz vienu vai no viena punkta uz dažādiem punktiem.

Šīs metodes galvenie trūkumi – palielinās elektroenerģijas patēriņš un

cauruļvadu abrazīvais nodilums.

Pneimatiskā transporta iekārtas atkarībā no gaisa plūsmas organizācijas iedala:

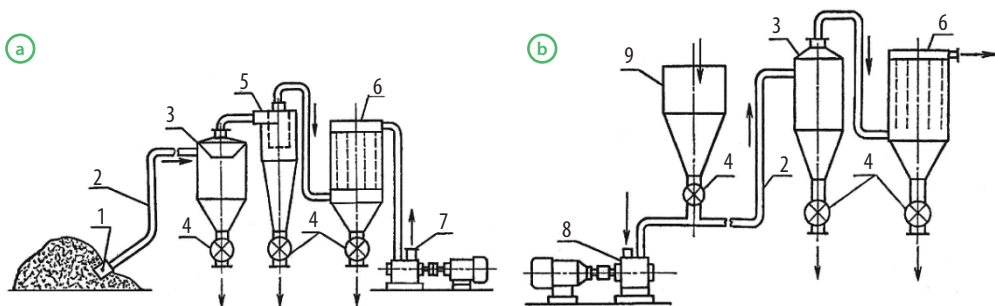
- ♦ iesūcošā pneimotransporta iekārta – darbojas retinājumā, materiāls pārvietojas pa cauruļvadiem ar gaisa spiedienu, kas mazāks par atmosfēras spiedienu (līdz 0,01 MPa);
- ♦ spiediena pneimotransporta iekārta – transportējamais materiāls pārvietojas ar saspiestu gaisu līdz 0,8 MPa spiedienam.

Iesūcošā tipa iekārtās (3.11. (a) att.) transportējamais materiāls caur sprauslu (1) kopā ar gaisu tiek iesūkts cauruļvadā (2). Lielākā daļa materiāla tiek atdalīta no gaisa plūsmas separatorā (3) un caur slēgu (4) izvadīta no sistēmas. Ciklonā (5) un filtrā (6) gaisu pirms vakuumsūkņa (7) attīra no materiāla daļiņām. Šādas iekārtas lieto vagonu izkraušanai, lai savāktu birstošos materiālus no 2 līdz 4 vietām vienlaicīgi. Transportēšanas attālums parasti nepārsniedz 50 m.

Būtisks iesūcošā tipa pneimotransporta iekārtu trūkums ir liels īpatnējās enerģijas patēriņš transportam, jo gaisa plūsmā ir zema materiāla koncentrācija (mazāka par 10 kg/kg) un ir vajadzīgs liels gaisa ātrums (20–30 m/s).

Spiediena tipa pneimotransporta iekārtās (3.11. (b) att.) var sasniegt lielāku materiāla koncentrāciju (līdz 100 kg/kg). Transportējamais materiāls no bunkura (9) caur padevēju (4) nonāk gaisvadā (2), kurā tiek padots gaiss no kompresora (8). Pēc materiāla atdalīšanas separatorā (3) un filtrā (6) gaiss izplūst atmosfērā. Spiediena kritums visā pneimotransporta sistēmā var sasniegt 0,5–1,3 MPa, materiāla transportēšanas attālums, kā jau minēts iepriekš, var sasniegt 1800 m. Izmantojot šo pneimotransporta metodi, materiāls no vienas vietas var tikt transportēts vienlaicīgi uz vairākām vietām vai iekārtām.

Iekārtas ekonomiskums ir atkarīgs no transportējamā materiāla koncentrācijas gaisā un gaisa plūsmas ātruma. Materiāla pieļaujamā koncentrāci-



3.11. att. Pneimotransporta iekārtas.

ja μ_m (kg/kg) ir atkarīga no materiāla blīvuma un daļiņu izmēra, kā arī no pneimotransporta veida. To nosaka šādi:

$$\mu_m = \frac{G_m}{G_g}, \text{ kg/kg}, \quad (3.26.)$$

kur G_m – materiāla patēriņš, kg/h;

G_g – gaisa patēriņš, kg/h.

3.

Iesūcošajās iekārtās šo lielumu limitē retinājums, kura gadījumā gaisa blīvums nodrošina materiāla pārvietošanos, tāpēc maisījuma koncentrācija iesūcošajās pneimotransporta iekārtās svārstās plašās robežās, no 0,05 kg/kg līdz 10 kg/kg.

Gaisa plūsmas ātrumam vertikāla transporta izmantošanas gadījumā jābūt ievērojami lielākam par daļiņu pārvietošanās ātrumu (pirmo kritisko ātrumu W'_{kr}), transportēšana pa horizontālām caurulēm notiek ar ātrumu, kas vidēji ir par 100 % lielāks nekā atbilstīgais gaisa plūsmas ātrums vertikāla transporta gadījumā, ja cauruļvadu izmēri ir vienādi.

Tehnisko pneimotransporta iekārtas ražību G_T (kg/s) var noteikt ar vienādojumu:

$$G_T = G_m \cdot K_1 \cdot K_2, \text{ kg/s}, \quad (3.27.)$$

kur G_m – transportējamā materiāla vidējā uzdotā ražība, kg/s;

K_1 – ražības rezerves koeficients, pieņem 1,1–1,25;

K_2 – materiāla padeves sistēmā nevienmērības koeficients, pieņem vidēji 1,5.

Gaisa patēriņu V (m^3/s) nosaka (parastos apstākļos, $p \approx 0,1$ MPa, $\rho_g = 1,2$ kg/m^3):

$$V_g = \frac{G_T}{\mu_m \cdot \rho_g}, \text{ m}^3/\text{s}, \quad (3.28.)$$

kur μ_m – materiāla koncentrācija, kg/kg;

ρ_g – gaisa blīvums, kg/m^3 .

Cauruļvadu diametru d_c (m) nosaka ar patēriņa formulu:

$$d_c = \sqrt{\frac{V_g}{0,785w}}, \text{ m}, \quad (3.29.)$$

kur w – gaisa plūsmas ātrums, m/s.

3.3. Birstošu materiālu dozēšana

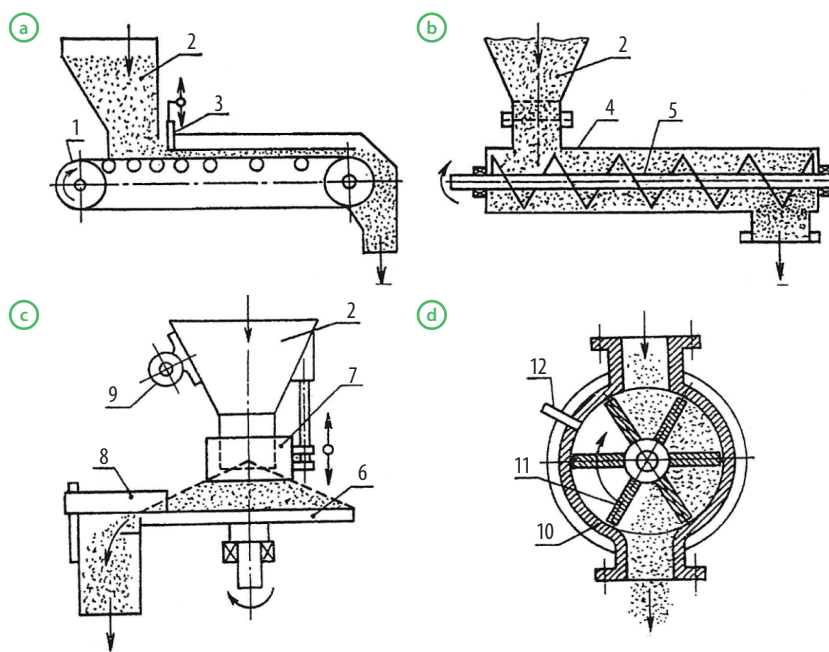
Materiāla patēriņš un gatavās produkcijas kvalitāte daudzās ražotnēs ir atkarīga no izejvielu precīzas dozēšanas. Par dozēšanu sauc materiāla padeves procesu tehnoloģiskajās iekārtās turpmākai apstrādei vai fasēšanai tarā.

Dozatora izvēli galvenokārt nosaka dozējamā materiāla īpašības: beramais blīvums, daļiņu forma un lielums. Visus dozatorus pēc darbības principa iedala tilpuma un svara dozatoros.

Tilpuma dozatori. Tos sauc arī par padevējiem, ir vienkāršas konstrukcijas, to ekspluatācija nav sarežģīta, tomēr lietojumu ierobežo vājā precizitāte. Tilpuma dozatorus izmanto procesos, kur nav nepieciešama ļoti augsta dozēšanas precizitāte – padot materiālu uz žāvēšanu, granulāciju, separāciju, klasifikāciju utt.

Pie tilpuma dozatoriem (padevējiem) pieskaitāmi lentes, gliemeža, šķīvja, sektoru dozatori (3.12. att.).

Lentes padevējs (3.12. (a) att.) sastāv no īsa lentes konveijera (1), virs kura piestiprināts padeves bunkurs (2) ar materiālu, kura slāņa biezumu uz lentes regulē ar aizbīdni (3). Materiāla padevi var regulēt arī ar lentes kustības ātrumu (0,08–0,4 m/s).



3.12. att. Tilpuma (padevēji) dozatori: (a) – lentes, (b) – gliemeža, (c) – šķīvja, (d) – sektoru dozatori.

Atšķirībā no konveijera lentes padevējā materiāls tiek novietots plānā slānī, un tā ražību var noteikt:

$$G_r = v \cdot B_m \cdot h_m \cdot \rho_b, \text{ kg/s}, \quad (3.30.)$$

kur B_m – materiāla slāņa platums uz lentes, m, ($B_m = B - 0,1$ m);

h_m – materiāla slāņa augstums, m;

v – lentes kustības ātrums, m/s.

Lai padotu un dozētu pulverus, sikdispersus un hidroskopiskus materiālus, bieži izmanto gliemežpadevējus (3.12. (b) att.), kam parasti ir cilindrisks korpus. No padeves bunkura (2) materiāls birst padevēja korpusā (4) un ar gliemezi (5) pārvietojas uz izkraušanas atveri. Padotā materiāla daudzumu regulē ar gliemeža apgriezīgu ātrumu. Padevēja ražību var aprēķināt ar (3.24.) vienādojumu.

Šķīvja padevēji (3.12. (c) att.) sastāv no diska (6), kas griežas zem padeves bunkura (2). Materiāla augstumu virs diska regulē ar teleskopisku manžeti (7), materiālu no diska dozēti aizvāc ar nazi (8). Lai padeves bunkurā neveidotos sablīvējumi (velves), periodiski lieto elektrovibratoru (9). Šķīvja dozatorus – padevējus – raksturo vienkārša uzbūve un dozēšanas precizitāte, ja materiāla granulometriskais sastāvs ir nemainīgs un mitruma novirzes nepārsniedz 2 %. Lai materiāls centrālās spēka ietekmē netiktu nomests no šķīvja (diska), tā griešanās ātrums ir ierobežots un nepārsniedz 0,2–1,0 apgr./min. Lai nodrošinātu stabilu dozatora darbību, jāievēro šāds nosacījums:

$$n < 2\sqrt{\frac{f}{R}}, \quad (3.31.)$$

kur n – griešanās ātrums, s⁻¹;

f – daļiņu berzes koeficients, tām saskaroties ar disku;

R – diska rādiuss, m.

Sektora dozatorus (3.12. (d) att.) izmanto pulverveida, graudainu materiālu un materiālu gabalu padevei un dozēšanai. Cilindriskā korpusā (10) ievietota rumba ar spārnēm (11), kas sadala cilindra šķērsriezuma laukumu 4–12 sektoros. Padeves un dozēšanas precizitāte ir atkarīga no birstošā materiāla granulometriskā sastāva un mitruma. Pa īscauruli (12) no tukšajiem sektoriem izvada gaisu.

Sektoru dozatora ražību G_r (kg/s) var aprēķināt ar formulu:

$$G_r = V_s \cdot n \cdot \rho_b \cdot \varphi, \text{ kg/s}, \quad (3.32.)$$

kur V_s – sektora kopējais tilpums, m^3 ;

n – apgriezienu skaits, s^{-1} ;

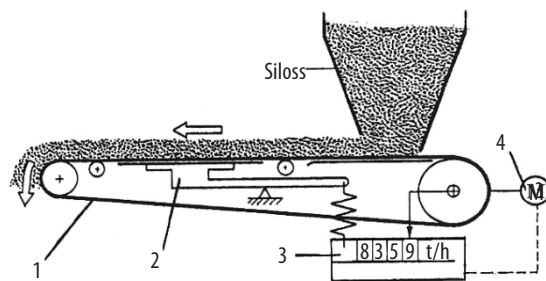
φ – piepildījuma koeficients, kas vidēji ir 0,75.

Kā jau minēts, tilpuma dozatora precizitāte ir atkarīga no materiāla granulometriskā sastāva un mitruma pakāpes. Precīzāk materiālu var dozēt, izmantojot svara dozatorus.

Svara dozatori. Pēc darbības principa svara dozatorus iedala periodiskas darbības dozatoros, kas nodrošina uzdotās masas daļas padevi (sākot no dažiem gramiem līdz vairākām tonnām) noteiktos laika intervālos (parasti svēršanas cikla laiks nepārsniedz 20–30 sek.), un nepārtrauktas darbības dozatoriem, kas nepārtraukti padod dozējamo materiālu noteiktā ātrumā. Pēdējā laikā visplašāk lieto nepārtrauktas darbības automātiskos lentes svara dozatorus (3.13. att.).

Lentes automātiskais svara dozators sastāv no lentes padevēja (1), svaru mehānisma (2), procesora (3), kas pārveido signālu ciparu formā un koriģē lentes piedziņas mehānismu (4).

Automātiskie dozatori ļauj ievērojami ekonomēt izejvielas un nodrošina galaprodukta kvalitāti.



3.13. att. Nepārtrauktas darbības lentes automātiskais svara dozators.

4. CIETU MATERIĀLU ŠĶIROŠANA (KLASIFIKĀCIJA)

4.

Cieti birstoši materiāli, kurus izmanto dažādos tehnoloģiskajos procesos, parasti sākotnēji ir daļiņu, graudu maisījumi, kuros daļiņas atšķiras pēc izmēriem, formas, blīvuma, sastāva, mitruma un citām īpašībām. Tehnoloģiskos procesos ķīmiskajā, silikātu, pārtikas, kurināmā un citās rūpniecības nozarēs izmanto birstošus materiālus ar noteiktām definētām īpašībām. No sākotnējā maisījuma jāizdala materiāla klases ar nepieciešamajām īpašībām.

Beramo materiālu maisījuma, kas satur neviendabīgus graudus, sadalīšanu atsevišķās klasēs vai frakcijās pēc kādas no pazīmēm sauc par klasifikāciju. Dažreiz literatūrā izmanto terminu „separācija”. Ja no sākotnējā maisījuma atdala daļiņas ar vajadzīgajām īpašībām, piemēram, noteiktu graudu izmēru, tad tādu procesu sauc par šķirošanu.

Klasifikāciju parasti izmanto par palīgprocesu, lai sagatavotu birstošo graudaino materiālu turpmākai pārstrādei vai izmantošanai. Lietojot klasifikāciju, iespējams no polidispersa maisījuma izdalīt šauras graudaino materiālu frakcijas, kurām piemīt noteiktas pazīmes, kas vislabāk atbilst tehnoloģiskā procesa nosacījumiem.

Ķīmiskajā tehnoloģijā izmanto galvenokārt trīs birstošu materiālu klasifikācijas metodes: sijāšanu, klasifikāciju blīvos šķīdumos, hidraulisko un pneimatisko klasifikāciju.

Sijāšana ir graudaina birstoša materiāla sadalīšana atsevišķās klasēs pēc graudu izmēriem uz sieta vai režģa iekārtās, ko sauc par sietiem vai kretuļiem. Sijāšanas procesa pamatā ir graudu izkrišana caur noteikta izmēra caurumiem jeb acīm, mazākie graudi izkrīt cauri sietam, lielākie – paliek virs sieta. Lietojot dažāda izmēra sietu komplektu, iegūst vienlaicīgi vairākas klases, katrā no tām graudu izmērs ir noteiktā robeždiapazonā. Ražošanā sijāšanu izmanto tādu birstošu materiālu klasifikācijai, kuru graudu izmērs ir robežās no 250 mm līdz 1 mm. Laboratorijas apstākļos var sijājot sadalīt maisījumus, kuru graudu izmērs ir lielāks par 0,04 mm. Mazāka izmēra daļiņas ar sietiem atdalīt nav iespējams – tām ir liela īpatnējā virsma un virsmas enerģija. Daļiņas veido noteikta lieluma noturīgus aglomerātus.

Klasifikācija blīvos šķīdumos notiek smaguma spēka ietekmē atkarībā no graudu blīvuma. Šķidrums tiek piemeklēts tā, lai smagākie graudi no-

grimtu, bet vieglākie - uzpeldētu. Ar šo metodi var sadalīt samērā lielas daļiņas (graudu izmērs ir lielāks par 1 mm). Mazāka izmēra graudi blīvajā šķidrumā gan grimst, gan uzpeld lēnāk. Tādā gadījumā no ražības viedokļa process kļūst mazefektīvs.

Hidrauliskās un pneimatiskās klasifikācija pamatā ir cieta materiāla graudu un šķidruma vai gāzes plūsmas mijiedarbība smaguma spēka ietekmē. Cietās daļiņas parasti kustas lēnāk nekā plūsma, turklāt dažāda izmēra, blīvuma un formas daļiņas dažādi atpaliek no plūsmas, kas ļauj tās atdalīt citu no citas, tātad klasificēt. Ar šo metodi rūpnieciskos apstākļos sadala maisījumus, kuros graudu izmēri svārstās no 5 mm līdz 0,05 mm.

4.1. Dispersu birstošu materiālu granulometriskā sastāva noteikšana, sietu analīze

Pētāmā materiāla graudu lieluma noteikšanu, sijājot to caur standartizētu sietu komplektu, sauc par sietu analīzi. Sietu komplektus izgatavo no austiem sietiem ar kvadrātveida acīm, kuru izmērs ir robežās no 0,04 mm līdz 2,5 mm. Sietu izgatavošanai parasti izmanto speciāla kausējuma stieples (tērauda, misiņa, bronzas, niķeļa kausējumi). Graudainu materiālu sijāšanai ar lielākiem graudu izmēriem (līdz 150 mm) izmanto metāla plāksnes ar štancētiem vai urbtiem caurumiem.

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

4.1. tabulā doti standartizēto stieplu sietu piemēri atbilstīgi dažādu valstu standartiem. Parasti laboratoriskajā praksē no pilnā standartizētā sietu komplekta izmanto tikai tos sietus, kas ir vajadzīgi, lai veiktu analīzi. Parasti pietiek ar 5–6 sietiem, kas aptver visu pētāmā materiāla iespējamo daļiņu lielumu diapazonu. Dispersitātes analīzei no pētāmā materiāla ir jāpaņem reprezentatīvs paraugs, kura sastāvs atbilst visam pētāmā birstošā materiāla sastāvam. Viena no metodēm, ko plaši izmanto, ir tā saucamā „dalīšana ceturtdaļās” (DIN 51701). Lietojot šo metodi, analizējamais materiāls tiek izvērtēts uz līdzenas virsmas, veidojot konusu (4.1. att.). Ar plānu priekšmetu konusu sadala

četros kvadrantos. Divus pretējos kvadrantus atmet. No atlikušajiem diviem kvadrantiem veido jaunu konusu, ko atkal sadala četrās daļās. Šo operāciju atkārti, līdz ir iegūts attiecīgā lieluma paraugs (vidēji no 50 g līdz 100 g).

Granulometriskā sastāva noteikšana, izmantojot sijāšanu, pamatojas uz to, ka materiālu sijā caur dažāda izmēra sietiem, kas novietoti viens virs otra. Sietu izmērs samazinās virzienā no augšējā sietā uz apakšējo. Sietu komplekta apakšā novieto sietu šķīvi, lai savāktu caur pēdējo sietu izkritušo produktu. Materiālu sijāšanai parasti izmanto speciālas mehāniskās sijāšanas iekārtas, kurās ievieto izmantoto sietu kompleksus, piešķirot sietiem noteiktas vibrācijas.

4.

4.1. tabula

Stieņu sietu acu izmēru (no 40 μm līdz 1 mm) piemēri
atbilstīgi dažādiem standartiem

Nr. p. k.	GOST 6613-86	ISO 3310-1	DIN 4188	ASTM 11 2004	
	Sietu acs izmērs				meš
	mm	μm	μm	μm	
1.	0,040	40	40	38	400
2.	0,045	45	45	45	325
3.	0,050	50	50	53	270
4.	0,063	63	63	63	230
5.	0,071	71	71	75	200
6.	0,090	90	90	90	170
7.	0,100	100	100	106	140
8.	0,125	125	125	125	120
9.	0,140	140	140	150	100
10.	0,180	180	180	180	80
11.	0,200	200	200	212	70
12.	0,250	250	250	250	60
13.	0,315	315	315	300	50
14.	–	355	355	355	45
15.	0,400	400	400	425	40
16.	0,500	500	500	500	35
17.	0,630	630	630	–	–
18.	–	710	710	710	25
19.	0,800	800	800	850	20

Sijāšanas laiku dažādiem sietiem atkarībā no analizējamā materiāla nosaka eksperimentāli. Jo mazāki ir analizējamā materiāla graudu izmēri, jo ilgāks ir tīrais sijāšanas laiks, piemēram, labi birstoša materiāla gadījumā:

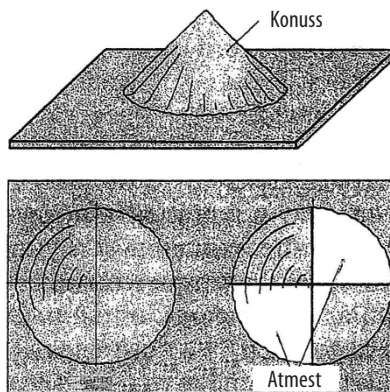
Sieta acs izmēri, μm	Sijāšanas laiks, min
40–60	20–30
71–160	10–20
> 160	5–10

Sijāšanas procesā dispersā daļiņa tiek salīdzināta ar sieta acs izmēru. Daļiņas, kas ir lielākas, paliek uz sieta, tas ir, tā saucamais, augšējais produkts. Mazāka izmēra daļiņas izkrīt cauri sietam, nonākot uz nākamā sieta. Katram nākamajam sietam ir mazāks acu izmērs, uz tā atkārtoti notiek pētāmā materiāla dalījums augšējā un apakšējā. Caur pēdējo sietu izbirušo produktu savāc sietu šķīvī. Starpību starp augšējā sieta, caur kuru produkts ir izbiris, acs izmēriem un apakšējā sieta, uz kuru produkts ir palicis, acs izmēriem sauc par dispersā materiāla lieluma klasi, bet attiecīgo birstošo materiālu par frakciju. Atlikums uz sieta atbilst noteiktai lieluma klasei vai frakcijai.

Pēc sadalīšanas katru frakciju nosver. Iegūtos rezultātus izsaka procentos no iesvara, tos ieteicams attēlot noteiktas formas tabulās un grafiskā veidā (4.2. tab. un 4.2. att.). Frakcijas A procentuālo saturu nosaka ar šādu vienādojumu:

$$A = \frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n} \cdot 100\%, \quad (4.1.)$$

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

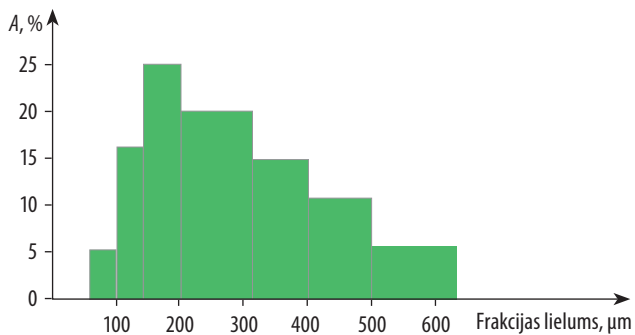


4.1. att. Birstoša materiāla dalīšana ceturtdaļās.

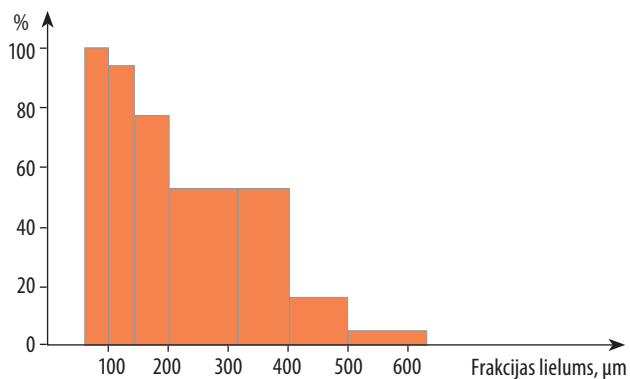
Sietu analīzes piemērs un rezultātu vērtējums

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

4.



4.2. att. Daļiņu lieluma sadalījuma diagramma.



4.3. att. Atlikumu summas diagramma.

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

4.2. tabulā parādīts sieta analīzes piemērs un iegūto rezultātu vērtējums. Ja atlikumu A (%) katrai frakcijai parāda diagrammas veidā, iegūst birstošā materiāla sadalījumu pēc daļiņu lieluma (4.2. att.). Pēc šīs diagrammas var noteikt katras frakcijas procentuālo sastāvu pēc daļiņu lieluma noteiktā birstošā materiāla daudzumā.

Piemērs. Daļiņas ar izmēru no 300 μm līdz 400 μm beramā materiāla masā ir 15 %. Visvairāk tur ir sastopamas daļiņas, kuru izmērs ir no 140 μm līdz 200 μm .

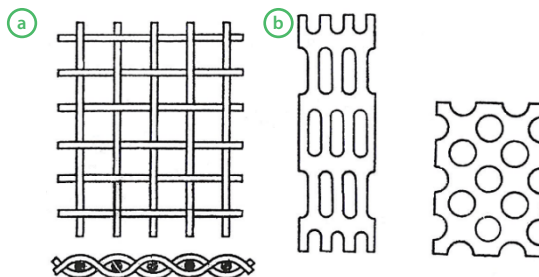
Ja, sākot no sieta ar lielāko acs izmēru, saskaita atlikuma procentuālo sastāvu, iegūst visu atlikumu summu, kas kopā ir 100 % (4.2. tabulas pēdējā kolonna). Ja šo rādītāju attēlo kā funkciju no attiecīgo frakciju lieluma, iegūst atlikuma summas diagrammu (4.3. att.). Pēc tās var noteikt, kāda birstošā materiāla masas daļa ir lielāka par noteikta izmēra graudiem.

Piemērs. Konkrētajā materiāla bērumā (4.3. att.) 53,0 % no kopējās masas ir graudi, kuru izmērs ir lielāks par 200 μm .

4.2. Materiālu sijāšana

Materiālu sijā, izmantojot noteiktas formas un izmēra sietus, režģus vai ārdus. Kalnrūpniecībā, būvmateriālu, pārtikas un lauksaimniecības produktu ražošanā sieta iekārtas pieņemts saukt par kretuļiem.

Sietus izmanto galvenokārt sijāšanai (daļiņu izmērs no 100 mm līdz 0,04 mm) un sieta analīzei (4.1. nodaļa). Sietus parasti izgatavo no metāliskas stieples, zīda vai sintētiskas šķiedras pavediena (4.4. (a) att.). Kā jau minēts iepriekš, sietus izgatavo atbilstīgi standartiem ar noteiktu kvadrātveida acs izmēru (mm), kas parasti atbilst sieta numuram, piemēram, sietam Nr. 0,4 acs malas



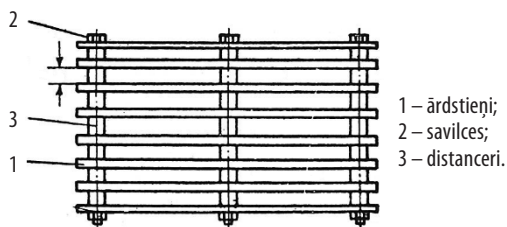
4.4. att. Sietu veidi: austi (a), štancēti (b).

garums ir 0,4 mm.

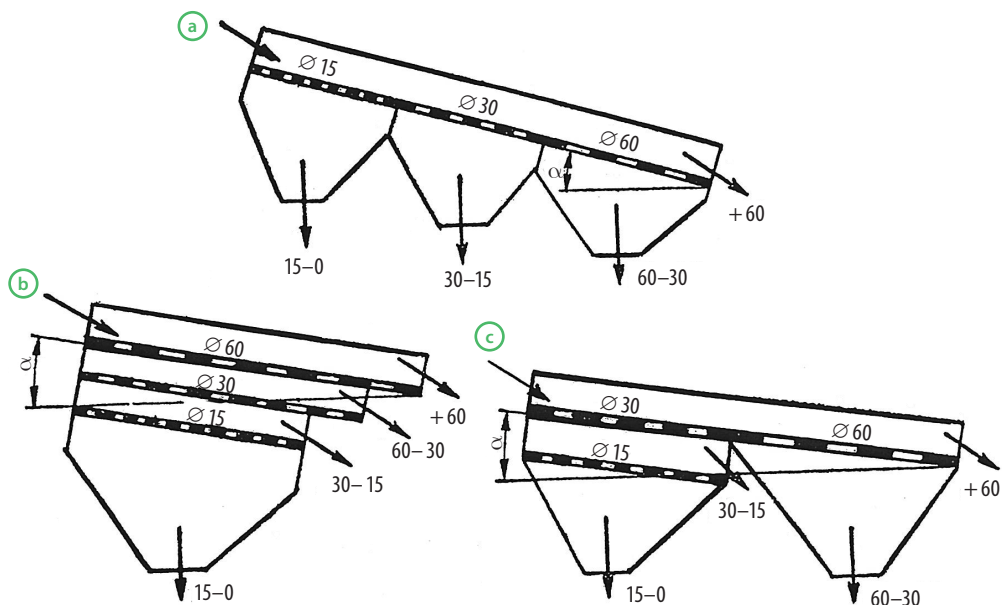
Režģus izgatavo no 3 mm līdz 12 mm biežām metāla plāksnēm. Uz speciālām presēm tajās izštancē apaļus vai retāk garenas formas caurumus (4.4. (b) att.). Caurumiem parasti ir konusa forma ($\approx 7^\circ$), plāksnes iekārtās montē ar paplašinājumu uz leju, kas mazina iespēju, ka caurumi varētu aizblīvēties ar sijājamo materiālu. Caurumu izmēri šādās plāksnēs ir no 5 mm līdz 80 (retāk 100) mm. Plāksnes biezuma un caurumu diametra attiecība parasti ir $\delta \approx 0,6 d$.

Lielāku gabalu sijāšanai lieto ārdū sietu (4.5. att.). Ārdū sieti izgatavoti no stieņiem (parasti ar trapecveida šķērsriezumu). Ārdstieņu trapecveida forma atvieglo materiāla gabalu izkrišanu cauri spraugām, kas atrodas starp stieņiem, spraugas ir paplašinātas uz leju.

Materiālam kustoties pa sietu virsmu, tas sadalās divās daļās: apakšējā pro-



4.5. att. Ārdū siets.



4.6. att. Daudzpakāpju sijāšanas veidi.

duktā (atsijas), - daļiņās, kas izgājušas cauri sietam, un augšējā produktā (atlikums), - daļiņās, kas ir palikušas virs sieta. Uz kustīga sieta materiāla kustību nodrošina, novietojot to slīpi noteiktā leņķī, kas ir lielāks par materiāla berzes leņķi. Sieta darbvirsma var kustēties arī dažādos virzienos.

Materiāla sadalīšanai vairākās frakcijās izmanto vairākus sietus – daudzpakāpju sijāšanu (4.6. att.). To parasti veic trīs veidos: 1) no smalkākā uz rupjāko (4.6. (a) att.); 2) no rupjākā sieta uz smalkāko (4.6. (b) att.); 3) jaukti sijājot (4.6. (c) att.). Turklāt sietus novieto vienu aiz otra (4.6. (a) att.) vai vienu virs otra (4.6. (b), (c) att.). Abos gadījumos sijāšanas efektivitāte un iekārtas ražība ir apmēram vienāda, taču vertikālais novietojums aizņem mazāk vietas.

Dažādās ķīmiskās tehnoloģijas nozarēs plaši lieto šādus sietu veidus: nekustīgo ārdū, cilindriskos, šūpojamos plakanos un vibrāciju sietus.

4.

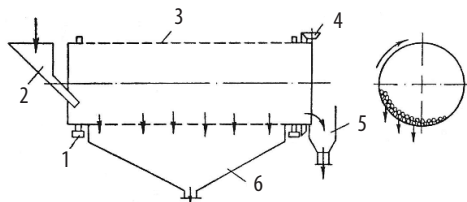
4.2.1. Nekustīgo ārdū siets

Nekustīgo ārdū siets redzams 4.5. attēlā. Šādus sietus parasti novieto 30° līdz 50° slīpumā. Sijājamais materiāls smaguma spēka ietekmē pārvietojas pa slīpiem ārdū uz leju, smalkumi izbirst pa spraugām, bet rupjos gabalus aizvada no sieta augšējā gala. Atstarpe starp ārdū parasti nav mazāka par 50 mm. Ārdū garumam vismaz divas reizes jāpārsniedz platums.

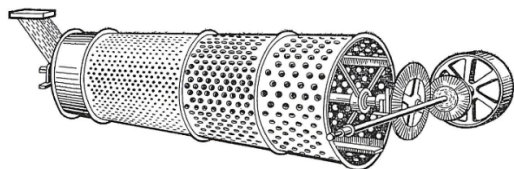
4.2.2. Cilindriskie sieti

Cilindriskos rotējošos sietus (4.7. att.) izgatavo no caurumota skārda vai stieplu pinuma. Tos novieto 4° līdz 14° slīpumā. Cilindram rotējot, materiāls tajā vispirms pārvietojas uz zemāko cilindra galu, kur smalkais materiāls izbirst pa caurumiem. Parasti cilindrisko sietu sānus veido joslās ar dažāda iz-

- | | |
|-----------------------|--------------------------------|
| 1 – atbalsta rāmis; | 4 – pievadmehānisms; |
| 2 – materiāla padeve; | 5 – rupjās frakcijas bunkurs; |
| 3 – cilindrs; | 6 – smalkās frakcijas bunkurs. |



4.7. att. Cilindriskā sieta shēma.



4.8. att. Cilindriskais siets.

mēra caurumiem, caurumu izmēri palielinās materiāla kustības virzienā (4.8. att.).

Cilindrisko sietu aploces ātrums ir robežās no 0,6 m/s līdz 1,2 m/s. Pieaugot cilindra apgriezību skaitam, pastiprinās centrālās spēku ietekme. Sasniedzot kritisko apgriezību skaitu, materiāls tiek piespiests sietam, rotē kopā ar sietu un šķirošana nenotiek.

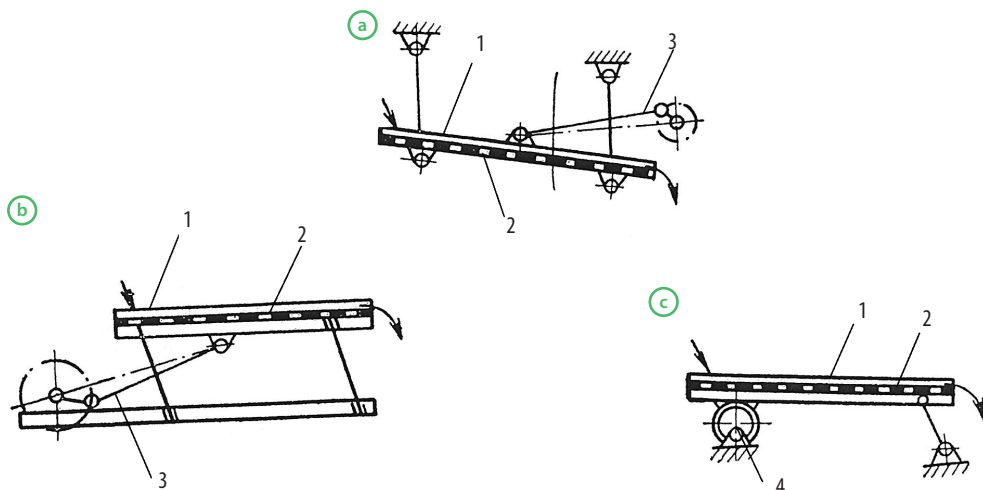
Optimālais apgriezību skaits (n) cilindriskiem sietiem ir atkarīgs no cilindra rādiusa R (m), un parasti to izvēlas šādās robežās:

$$n = \frac{8}{\sqrt{R}} \div \frac{14}{\sqrt{R}}, \text{ apgr./min.} \quad (4.2.)$$

Cilindrisko sietu trūkums ir nelielā īpatnējā ražība uz cilindra virsmas vienību, jo sijājot aktīvi izmanto tikai 1/6–1/8 no sietā virsmas, turklāt sijāšanas laikā materiālu var arī intensīvi smalcināt.

4.2.3. Šūpojamie plakanie sieti

Šūpojamie plakanie sieti (4.9. att.) sastāv no taisnstūrveida rāmja (1), kurā iestiprināts siets (2). Sietā darbu virsmu var novietot horizontāli vai ar slīpumu līdz 14°. Šūpošanas panāk ar kloķa kļāņa (3) vai ekscentra (4) mehānismu. Sietam šūpojoties, šķirojamais materiāls tiek pasviests uz augšu un uz priekšu. Cauri sietam izbirst smalkais materiāls. Lai materiāla daļiņas pārvietotos pa



4.9. att. Šūpojamo plakano sietu shēmas:

(a) pakārtais siets, (b) atbalstītais siets, (c) siets ar ekscentra mehānismu.

sietu, pievades mehānisma vārpstai jāgriežas noteiktā ātrumā, lai inerces spēki, kas darbojas uz daļiņu, būtu lielāki par berzes spēkiem, kas darbojas pret sietu. Minimālo vārpstas griešanās ātrumu (n) (apgr./min.), pie kura daļiņa pārvietojas pa sietu, var atrast ar šādu vienādojumu:

$$n \geq \sqrt{\frac{\operatorname{tg}(\varphi - \alpha)}{r}}, \quad (4.3.)$$

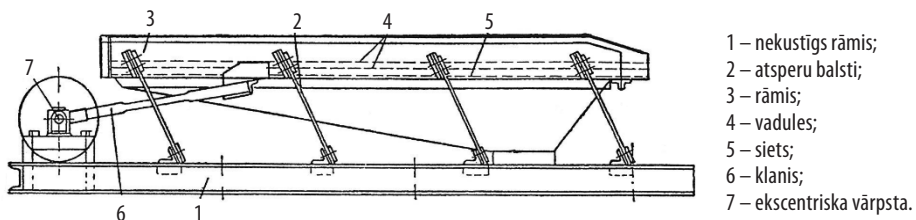
kur φ – daļiņu berzes leņķis, $\varphi = 32 \div 35^\circ$;

α – sietu slīpuma leņķis, $\alpha = 10 \div 12^\circ$;

r – kloķa rādiuss, m.

Kā jau minēts, šī sakarība ir orientējoša, jo tā raksturo atsevišķas daļiņas pārvietošanos. Reāli uz sietiem pārvietojas daļiņu slānis, kurā daļiņas mijiedarbojas cita ar citu. 4.10. attēlā parādīts šūpojamā plakanā sietā konstrukcijas piemērs.

Attēlotajā konstrukcijā kustīgais rāmis (3) ar sietu (5) novietots horizontāli uz slīpiem atsperīgiem balstiem (2). Rāmi iekustina, ekscentriskai vārpstai griežoties ar kļauņa palīdzību. Šūpojoties pa labi, rāmis vienlaicīgi ceļas augšup, bet, šūpojoties pa kreisi, – pārvietojas lejup. Materiāls, kas atrodas uz sietā, pie noteikta kustības ātruma tiks pasviests uz augšu, atrausies no sietā un gaisā pārvietosies no kreisās uz labo pusi, turklāt daļiņas intensīvi sajauksies, tā nodrošinot augstu sijašanas efektivitāti.



4.10. att. Šūpojamais plakanais siets.

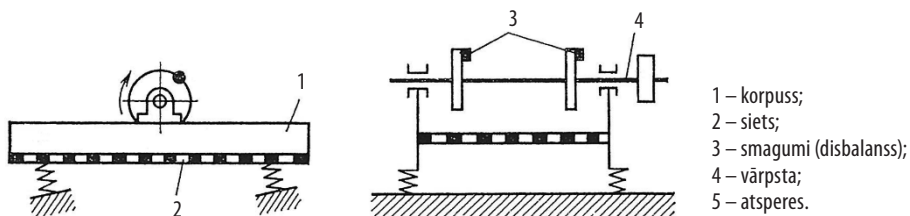
Šūpojamo plakano sietu svārstību skaits ir 100 līdz 400 minūtē, sieta gājiena garums ir no 5 mm līdz 125 mm.

4.2.4. Vibrāciju sieti

Vibrāciju sietos plakanais siets, izmantojot speciālu mehānismu (vibratoru), izdara biežas nelielas svārstības. Vibrāciju sieti pēdējos gados tiek arvien plašāk lietoti dažādās tehnoloģijās, pateicoties virknei priekšrocību: 1) augstas svārstību frekvences gadījumā sieta caurumi praktiski neaizsērē ar klasējamo materiālu; 2) liela sietu ražība; 3) konstrukcijas kompakts un lielākas regulēšanas iespējas; 4) mazāks enerģijas patēriņš, salīdzinot ar citiem sietiem.

4.11. attēlā parādīta vibrāciju sieta shēma. Korpuss (1) ar sietiem (2) novietots uz atsperēm (5). Griežoties vārpstai (4), smagumi (3), kas nostiprināti uz skriemeļiem, rada kustīgā korpusa (1) vibrācijas. Svārstību skaits ir 900–2000 svārst./min, bet var sasniegt arī 3000 svārst./min. Svārstību amplitūda parasti ir robežās no 0,5 mm līdz 6 mm. Vibrāciju sietiem, lai nodrošinātu efektīvu darbību, nepieciešama vienmērīga klasējamā materiāla padeve.

Pēc tāda paša principa darbojas arī elektrovibrāciju sieti: svārstības šajos sietos nodrošina, izmantojot elektromagnētiskos vibratorus.



4.11. att. Vibrāciju sieta shēma.

5. MATERIĀLU AGLOMERĀCIJA

5.

Aglomerācija ir process, kura laikā dažādu fizikālo spēku ietekmē vai arī veidojot „tiltiņus” starp daļiņām, kā arī pievienojot saistvielas, materiāla daļiņas saskaras un izveido lielākas vienības. Aglomerācija nozīmē, ka, apvienojot mazākas daļiņas, iegūst lielāka izmēra produktu. Bieži sīkdispersas vai pulverveida vielas nevar izmantot par starpproduktu vai galaproduktu, jo tām jābūt atsevišķu gabalu veidā ar noteiktu graudu izmēru, porainību, stiprību utt. Tātad aglomerācijas mērķis ir iegūt galaproduktu ar uzlabotām, definētām īpašībām: tas neput, nesalīp, nenoslāņojas glabāšanas laikā, tam piemīt laba plūstamība un dozējamība.

Atkarībā no rūpniecības nozares un materiālu grupas aglomerācijas procesa apzīmēšanai lieto dažādus jēdzienus: granulēšana, saķepināšana, kompaktēšana, tabletēšana, briketēšana u. c. Granulēšanu bieži lieto kā sinonīmu jēdzienam „aglomerēšana”. Visos gadījumos daļiņas palielinās. Eksistē vairākas aglomerācijas metodes, kuras var klasificēt šādi:

- ♦ aglomerācija, daļiņām augot (granulēšana, dražēšana);
- ♦ aglomerācija spiediena ietekmē (granulēšana, briketēšana, tabletēšana, kompaktēšana);
- ♦ termiskā aglomerācija (saķepināšana).

Ja aglomerēšanas procesā izmanto šķidru saistvielu, kas saista sīkdispersās daļiņas savā starpā, tām veļoties (sniega bumbas efekts), iegūst lielāka izmēra aglomerātus jeb granulas. Ideālā gadījumā iegūtajām granulām ir sfēras forma.

Ja, daļiņām augot, iegūtās granulas pārklāj ar papildu materiāla slāni, tad runā par dražēšanu (farmācijā, saldumu ražošanā).

Pārstrādājot pulverus vai citus dispersus materiālus (arī bez saistvielas), iekārtās zem spiediena iegūst dažādas formas granulas, briketes u. c. Tabletēšanas procesā, izmantojot noteikta izmēra matricu un puansonu, no sausa pulvera iegūst noteiktas formas un lieluma tabletes.

Saķepināšana paredz ar dažādām metodēm īstenotu sīkdispersu granulu termisko apstrādi. Daļiņu kontaktvietās difūzijas un sakušanas rezultātā veidojas pietiekami stingri tiltiņi, kas nodrošina aglomerātu mehānisko stiprību. Izkausētu materiālu izsmidzinot caur noteikta izmēra filjērām, iegūst lodveida granulas.

Šajā nodaļā tiks apskatīta materiālu aglomerācija, daļiņām augot, kā arī spiediena ietekmē.

hānisko stiprību raksturojošus lielumus.

Spiedes stiprība. Regulāras formas aglomerātiem (lodes, cilindriskas formas) spiedes stiprību nosaka, daļiņu slogojot starp divām virsmām līdz sagraušanai, un fiksē pielikto spēku (5.1. att.).

Ja attiecina sagraušanas slodzi P_S ar šķērsriezuma laukumu perpendikulāri iedarbības spēkam, iegūst aglomerāta spiedes stiprību:

$$\sigma_s = \frac{4P_S}{\pi d^2}, \text{ Pa}, \quad (5.1.)$$

kur P_S – sagraušanas slodze, N

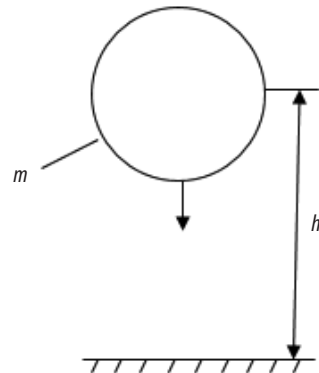
d – lodes diametrs, m.

Tablešu gadījumā sagraušanas slodzi attiecina uz tabletes diametru d (m) un biezumu b (m):

$$\sigma_s = \frac{P_s}{d \cdot b}, \text{ Pa}. \quad (5.2.)$$

Triecienizturība, daļiņai krītot. Šis parametrs ir svarīgs aglomerātiem, kuriem, tos transportējot, dozējot un glabājot, brīvi jākrīt, bet tie nedrīkst sadrupt (5.2. att.). Pārbaudāmajam materiālam ļauj brīvi krist no noteikta augstuma (h). No eksperimentā izmantotajām granulām tiek fiksēts to granulu daudzums procentos, kas nesadrūp. Var uzskaitīt arī sagraušanas biežumu atkarībā no krišanas enerģijas – $m \cdot g \cdot h$.

Nodiluma izturība. Nodiluma izturības testu realizē horizontāli novietotā rotējošā cilindrā, kurā materiālu, ņemot vērā konkrētu apgriezību skaitu, slogo noteiktu laiku. Sijājot caur sietu, nosaka noberzumu procentos.



5.2. att. Izturības testa shēma, aglomerātam brīvi krītot.

5.1.3. Aglomerātu porainība

Viens no svarīgākajiem parametriem, kas ietekmē gandrīz visas pārējās aglomerātu īpašības, ir porainība. Aglomerāti sastāv no atsevišķām daļiņām, kas arī var būt porainas. Daļiņās esošo tukšumu (slēgtās un vaļējās poras) aizņemtā tilpuma (V_T) attiecība pret kopējo daļiņas tilpumu (V_D) ir daļiņas porainība (ε_d).

$$\varepsilon_d = \frac{V_T}{V_D} = \frac{V_{DS} + V_{DV}}{V_D}, \quad (5.3.)$$

kur V_{DS} , V_{DV} – slēgto un vaļējo poru aizņemtais tilpums.

ε_d vērtības var atrasties robežās $0 < \varepsilon_d < 1$. Robežlielums $\varepsilon = 0$ ir raksturīgs viendabīgam blīvam ķermenim. Lielumam $\varepsilon = 1$, runājot par porainiem ķermeņiem, faktiski nav jēgas.

Agglomerāta porainību ε_A var izteikt kā attiecību starp tukšuma tilpumu V_{AT} aglomerātā starp daļiņām un aglomerāta aizņemto tilpumu V_A , turklāt $V_A = V_D + V_{AT}$.

$$\varepsilon_A = \frac{V_{AT}}{V_A}. \quad (5.4.)$$

Agglomerātu porainību iespējams novērtēt, arī izmantojot datus par atsevišķu daļiņu tilpumu V_D :

$$1 - \varepsilon_A = \frac{V_D}{V_A}. \quad (5.5.)$$

Tāpat kā porainību, var dažādi definēt arī aglomerātu šķietamo blīvumu. Daļiņu blīvumu var izteikt kā masas (m) un daļiņas aizņemtā tilpuma (iekļaujot porainību) attiecību, iegūstot daļiņas šķietamo blīvumu:

$$\rho_d = \frac{m}{V_D}, \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \quad (5.6.)$$

Agglomerāta gadījumā novērtē aglomerāta masu (m) un aizņemto tilpumu (V_A), iegūstot aglomerāta šķietamo blīvumu:

$$\rho_A = \frac{m}{V_A}, \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \quad (5.7.)$$

Ir noteikta sakarība starp aglomerāta blīvumu, porainību un materiāla blīvumu:

$$\rho_A = \rho_d(1 - \varepsilon_A) = \rho_m(1 - \varepsilon_d)(1 - \varepsilon_A). \quad (5.8.)$$

Lietojot dažādas aglomerācijas metodes, iegūst aglomerātus ar dažādu porainību un blīvumu. Visblīvākos produktus iegūst, aglomerējot materiālu spiediena ietekmē jeb presējot.

5.2. Daļiņu saistīšanās mehānisms

Zinātnieki H. Rumpfs (1958) un vēlāk H. Šuberts (1979) izstrādāja un sistematizēja iespējamās daļiņu saistīšanās mehānismus aglomerātos. 5.3. att. parādīti nozīmīgākie saistīšanās mehānismi.

Starp daļiņām aglomerātos var darboties šādi galvenie saistīšanās mehānismi daļiņu saskares punktos:

- ♦ starp daļiņām veidojas cieti tiltiņi, tām saķepot, sakūstot kontaktvietās, ķīmiskās reakcijas vai saistvielu sacietēšanas rezultātā, iztvaikojot šķīdumam, kas satur kristalizēties spējīgas vielas;
- ♦ saistīšanās savā starpā, izmantojot augsti viskozu saistvielu (cements, māls, bitums);
- ♦ daļiņas var saistīties ar šķidruma tiltiņu palīdzību (ūdens, ūdens šķīdumi u. c.);
- ♦ daļiņu saistīšanās savā starpā savstarpējās pievilksnās spēku rezultātā – *Van der Waals*, elektrostatiskie spēki.

Ar modeļu palīdzību, kuros izmanto simetriskas formas (lode) ķermeņus ar ideālu gludu virsmu, iespējams teorētiski aprēķināt daļiņu savstarpējās saistīšanās spēku, kas bieži vien atšķiras no praktiskajos mērījumos iegūtajiem rezultātiem. Tajā pašā laikā teorētiskie aprēķini parāda būtiskāko lielumu ietekmi uz aglomerātu veidošanos.

Cieti tiltiņi starp daļiņām, tām saķepot vai sakūstot, var rasties, ja temperatūra kontaktpunktos sasniedz vismaz 60 % no vielas kušanas temperatūras un kontaklaiks ir pietiekams. Tas var notikt, piemēram, kad, materiālu presējot, rodas lokālas enerģijas koncentrācijas vietas. Žūstot mitram, birstošam materiālam, un gadījumā, kad iztvaikojošais šķīdums satur kristalizēties spējīgas vielas, daļiņu kontaktvietās var veidoties cieti tiltiņi. Abi šo cieto tiltiņu veidi var uzņemt ievērojamu slodzi.

Uz sīkdisperso daļiņu virsmas var veidoties adsorbcijas slāņi, kuru biezums ir mazāks par 3 nm (piemēram, ūdens). Šie slāņi kontaktpunktos var mijie-



5.3. att. Saistīšanās mehānismi starp cietā materiāla daļiņām.

darboties, tie var šķīdināt cietās daļiņas virsējos slāņus, kas žūstot var veidot cietos tiltniņus. Šajā gadījumā daļiņu savstarpējās saistīšanās stiprību nosaka kohēzijas spēki saistvielas slānī un tā adhēzija pret daļiņu.

Viens no visbiežāk sastopamajiem daļiņu saistīšanās mehānismiem aglomerātos ir tā saucamie šķidrums tiltniņi, kas veidojas, ja starp daļiņām atrodas šķidrums ar zemu viskozitāti. Ja šķidrums tiek padots nelielā daudzumā, tas koncentrējas kontaktpunktos „šķidru” kustīgu tiltniņu veidā. Šķidrums virsmas spraigums šķidrums un daļiņu saskares vietā, kā arī pazemināts kapilārais spiediens tiltniņa iekšienē nosaka daļiņu savstarpējās mijiedarbības intensitāti.

Ja tiltniņa virsma ir ieliekta (5.4. att.), šķidrums iekšienē veidojas pazemināts kapilārais spiediens un daļiņām ir tendence tuvuoties. Pētījumu rezultāti pierāda (H. Šuberts), ka simetrisku tiltniņu gadījumā starp vienādām daļiņām īpatnējais saistīšanās spēks (F/d) ir atkarīgs no ģeometriskiem parametriem (attālums starp daļiņām (a), to diametrs (d), kontaktvietas aizpildīšanas leņķis (2β)) un vielas īpašībām (virsmas spraigums (σ), slāpēšanas leņķis (Θ)):

$$\frac{F}{d} = f\left(\frac{a}{d}, \sigma, \beta, \Theta\right). \quad (5.9)$$

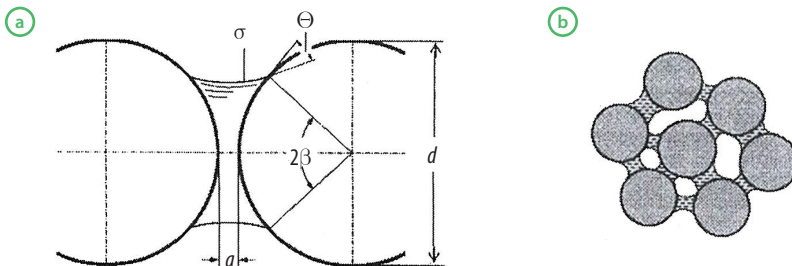
Vienkāršākos gadījumos (lode, plate) īpatnējo saistīšanās spēku kontaktvietā var aprēķināt. Ja pieņem, ka aglomerātu stiprība ir atkarīga no daļiņu savstarpējās saistīšanās spēka kontaktvietās, aglomerātu stiprību H . Rumpfs vērtē kā stiprību stiepē (γ_{ST}):

$$\gamma_{ST} = \frac{1 - \varepsilon_A}{\varepsilon_A} \frac{F}{d}, \quad (5.10)$$

kur ε_A – aglomerātu porainība;

F – saistīšanās spēks kontaktvietā;

d – daļiņu vidējais diametrs.



5.4. att. Šķidrums tiltniņš starp divām lodveida daļiņām (a), tiltniņu veidošanās aglomerātā (b).

No pēdējā vienādojuma izriet svarīga atziņa, ka $\gamma_{ST} \sim d^{-1}$ nozīmē – mazino-ties daļiņu izmēram, aglomerāta stiprība pieaug.

Starp sīkdispersām daļiņām bez saistvielas darbojas savstarpējās pievilkša-nās spēki, no kuriem jāatzīmē *Van der Waals* spēki un elektrostatiskie spēki. *Van der Waals* spēki rodas, savstarpēji mijiedarbojoties atomu un molekulu dipoliem. Pievilkšanās spēks ir atkarīgs no daļiņu lieluma, virsmas stāvokļa, virsmas izliekuma rādiusa kontaktvietās, tam ir ļoti niecīgs iedarbības attā-lums.

Spriežot līdzīgi, Rumpfs ideālu lodveida ķermeņu gadījumā teorētiski atrada apgrieztu proporcionalitāti starp stiprību stiepē *Van der Waals* spēku gadījumā un daļiņu izmēriem (d), bet attālumu starp tām aprēķina:

$$\gamma_{ST} = \frac{1}{a^2 d}. \quad (5.11.)$$

Kā redzams, aglomerātu starpību, kas iegūta no sīkdispersām pulverveida daļiņām, būtiski ietekmē attālums starp daļiņām kontaktvietās. Attāluma pa-lielināšanās daļiņu virsmas nelīdzenumu vai kādu citu iemeslu dēļ būtiski ma-zina stiprību. Tajā pašā laikā gadījumos, kad sīkdispersās daļiņas nonāk ciešā kontaktā, piemēram, presējot, *Van der Waals* spēkiem ir pietiekami nozīmīga loma.

Elektrostatisko spēku gadījumā Rumpfs ieguva šādu proporcionalitāti starp apskatītajiem lielumiem:

$$\gamma_{ST} = \frac{1}{a \cdot d}. \quad (5.12.)$$

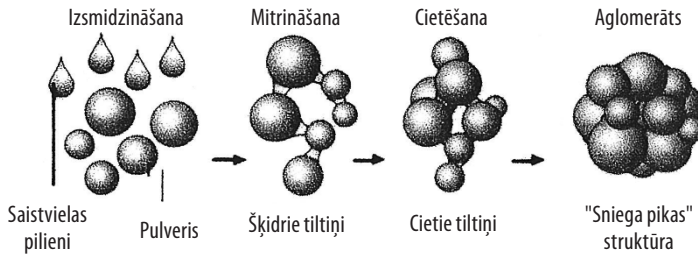
Tiem ir lielāks darbības attālums nekā *Van der Waals* spēkiem. Bieži elektro-statiskie spēki ir atbildīgi par daļiņu savstarpējo pievilkšanos, savukārt *Van der Waals* spēki – par daļiņu savstarpējo saistīšanos.

Salīdzinot savstarpējos daļiņu saistīšanās spēkus modeli lode-plate, jāse-ci-na, ka šķidrums tiltiņu gadījumā tas ir vislielākais, bet elektrostatisko spēku gadījumā – vismazākais.

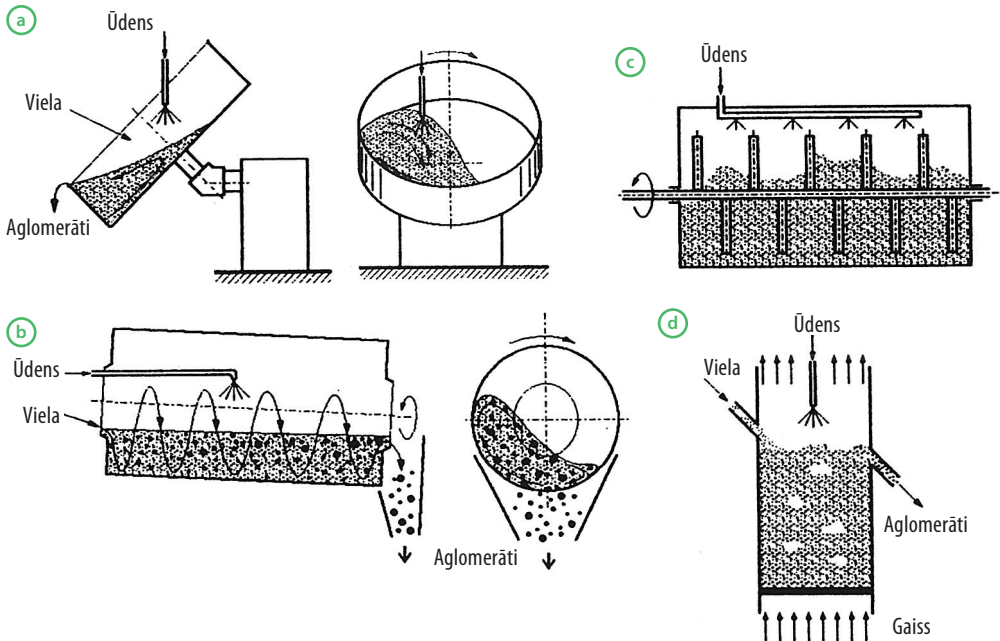
5.3. Aglomerācija, daļiņām augot

Viena no aglomerācijas metodēm ir aglomerācija, daļiņām augot, jeb augšanas aglomerācija. Sīkdispersās daļiņas veļoties vai sajaucoties saduras cita ar citu, iepriekš apskatīto spēku ietekmē veidojot primāros aglomerātus. Augšanas aglomerācijas procesā parasti papildus izmanto šķidru saistvielu (ūdeni), kuru izsmidzina virs pulverveida materiāla. Starp primāriem aglomerātiem vai atsevišķām daļiņām kontaktvietās veidojas šķidrie tiltiņi, kas žūstot sacietē. Daļiņām iekārtā veļoties un sajaucoties, veidojas lodveida aglomerāti jeb granulas, radot tā saucamo sniega bumbas efektu. Aglomerācijas process shematiski ir parādīts 5.5. attēlā.

5.



5.5. att. Aglomerācijas process.

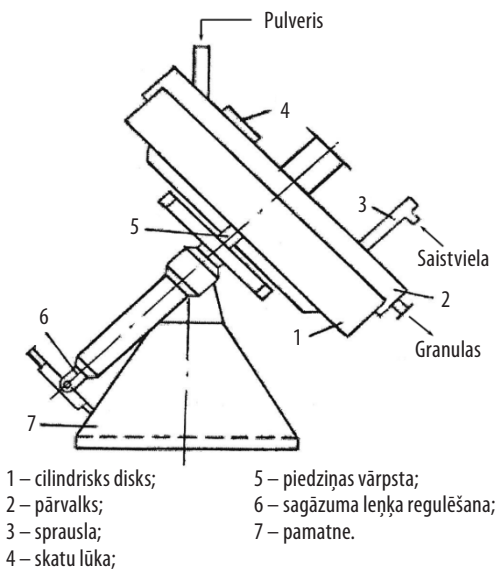


5.6. att. Granulēšanas iekārtas: (a) diska granulators, (b) cilindriskais granulators, (c) maisītājs, (d) verdošā slāņa granulators.

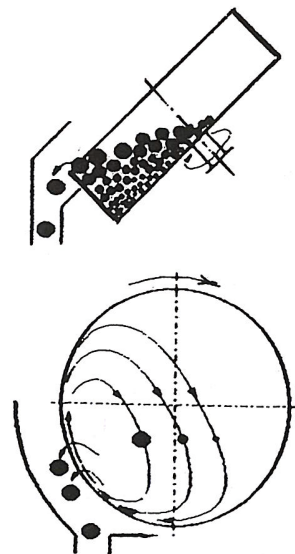
Jāņem vērā, ka vienlaicīgi ar daļiņu savstarpējo saistišanos kontaktpunktos notiek arī radušos struktūru daļēja sagraušana triecienu, spiedes un berzes rezultātā. Nesagrauti paliek tie aglomerāti, kuros daļiņu savstarpējās saistišanās spēki ir lielāki nekā sagraušanas spēki. Tehniski granulas, izmantojot apsmidzināšanu, iegūst diska, cilindriskā granulatorā, maisītājā un verdošā slāņa iekārtā (5.6. att.).

Diska granulators. Granulators sastāv no plakanas cilindriskas tvertnes, kas novietota 45° – 55° leņķī (5.7. att.).

Pulveri pa īscauruli padod uz slīpi novietotu rotējošu disku, vienlaicīgi tas tiek dozēti apsmidzināts ar ūdeni vai citu saistvielu. Centrbēdzes spēks piespiež materiālu pie diska apakšas un malām, tā novēršot materiāla slīdēšanu. Izveidojušās granulas kopā ar rotējošo disku paceļas noteiktā augstumā, pēc tam smaguma spēka ietekmē veļas lejā pa šītas slāni, kas pa sprauslu tiek apsmidzināts ar saistvielu. Granulas, kustoties uz diska, pieaug. Ņemot vērā berzes koeficienta atšķirības starp dažāda izmēra daļiņām un attiecībā pret rotējošo disku, notiek daļiņu klasifikācija pēc izmēriem. Lielākā izmēra granulas veļoties koncentrējas pie diska malas un tiek izvadītas no granulatora (5.8. att.). Rūpniecībā izmantotiem granulatoriem diska diametrs ir robežās no 0,8 m līdz 6 m, tajos iegūst granulas, kuru izmēri ir robežās no 2 mm līdz 15 mm. Rūpniecisko granulatoru ražība atkarībā no iekārtas izmēriem un apstrādājamā materiāla var mainīties robežās no 80 kg/h līdz 120 t/h.



5.7. att. Diska granulators.



5.8. att. Granulu klasifikācijas efekts diska granulatorā.

Iegūto granulu kvalitāte lielā mērā ir atkarīga no granulēšanas procesa parametriem, tajā skaitā no diska apgriezību skaita (n), sagāzuma leņķa (α) un pildījuma pakāpes (φ). 5.9. att. redzami diskveida granulatora darbību raksturojošie lielumi.

Iekārtas pildījuma pakāpe norāda, kādu daļu no diska tilpums aizņem pulverveida viela:

$$\varphi = \frac{4V}{\pi D^2 H}, \quad (5.13.)$$

kur V – materiāla aizņemtais tilpums, m^3 ;

D – diska diametrs, m;

H – diska malas augstums, m.

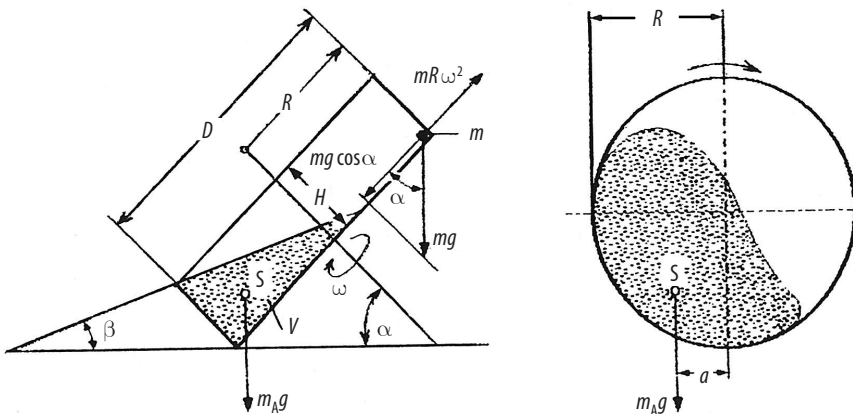
Parasti (φ) vērtības atrodas robežās starp $\varphi \approx 0,1-0,3$. Pildījuma pakāpe ir atkarīga no:

α – granulatora ass sagāzuma leņķa ($45^\circ-55^\circ$);

n – diska griešanās ātruma;

H/D – diska malas diametra attiecības, parasti $H/D \approx 0,2$.

Diska apgriezību skaitam jānodrošina intensīva materiāla velšanās rotācijas virzienā. Tajā pašā laikā tam jābūt mazākam par kritisko apgriezību skaitu (n_{kr}), kad aglomerāta daļiņas centrālās spēka ietekmē tiek piespiestas granulatora sienai. n_{kr} kalpo par aprēķinātā maksimālā apgriezību skaita robežu, kad tiek izjaukts līdzsvars starp daļiņu smaguma spēku un centrālās spēku (5.9. att.).



5.9. att. Diska granulatoru raksturojošie lielumi.

$$m_A R \omega_{kr}^2 = m_A g \cos \alpha, \quad (5.14.)$$

kur m_A – aglomerāta masa, kg;

ω_{kr} – kritiskais leņķiskais ātrums, 1/sek;

R – diska rādiuss, m;

α – sagāzuma slīpuma leņķis.

Ja $n_{kr} = \omega_{kr}/2\pi$ un $R = D/2$, tad kritiskais apgriezienu skaits būs:

$$n_{kr} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{g \cdot \cos \alpha}{2D}}, \text{ s}^{-1}. \quad (5.15.)$$

Parasti n izsaka min^{-1} , šādā gadījumā

$$n_{kr} = 42,3 \sqrt{\frac{\cos \alpha}{D}}, \text{ min}^{-1}. \quad (5.16.)$$

Darba un kritiskā apgriezienu skaita attiecība granulatoros parasti ir:

$$\frac{n}{n_{kr}} \approx 0,6 - 0,85. \quad (5.17.)$$

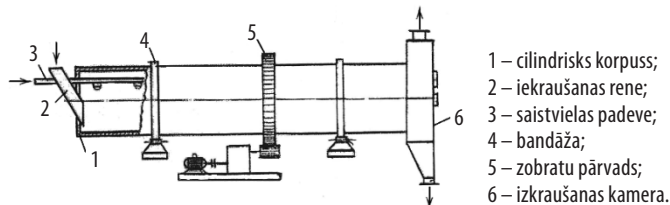
Diska granulatoru ražība ir proporcionāla diska laukumam:

$$Q = k \cdot D^2, \text{ t/h}, \quad (5.18.)$$

kur k – granulēšanas faktors: $\frac{t}{h \cdot m^2}$.

Granulēšanas faktors jeb īpatnējā ražība galvenokārt ir atkarīga no granulējamā produkta, tā vidējā vērtība ir $k \approx 0,5-1,2$.

Cilindriskais granulators. Šāda tipa granulatori plaši tiek lietoti ķīmiskajā, metalurģiskajā, pārtikas un citās rūpniecības nozarēs. Granulators sastāv no cilindriska korpusa, uz kura ir nostiprinātas tērauda bandāžas un zobrats. Bandāžas turas uz atbalsta rullīšiem, kas ļauj noturēt to nemainīgā stāvoklī. Parasti cilindrs ir novietots 1° līdz 3° slīpumā. Rotāciju nodrošina zobratu pārvads. Cilindrs rotē ar 4 apgr./min. līdz 18 apgr./min. Granulatora galos ir iekraušanas un izkraušanas kameras, kas vienlaicīgi hermetizē granulatora darba tilpumu (5.10. att.).



5.10. att. Cilindriskais granulators.

Pa iekraušanas reni cilindrā dozēti ievada pulverveida materiālu. Virs materiāla slāņa atrodas sprauslas saistvielas izsmidzināšanai. Izvēlas tādu šķidrums patēriņu un spiedienu, lai nenotiktu granulējamā materiāla slāņa izskalošana. Iegūto granulu masu padod uz sietiem klasifikācijai nepieciešamās frakcijas izdalīšanai. Lielāka izmēra granulas smalcina un atkārtoti sijā.

Materiāla pacelšanos noteiktā augstumā, cilindram griežoties, nodrošina tā berze pret cilindra sienu. Lai novērstu materiāla pielipšanu cilindra sienām, izmanto dažādas palīgierīces: skrāpjus, dažādas formas nažus, gliemežus. Cilindrisko granulatoru cilindra izmēri ir diametrā no 0,5 m līdz 4,5 m un garumā no 1,0 m līdz 18 m.

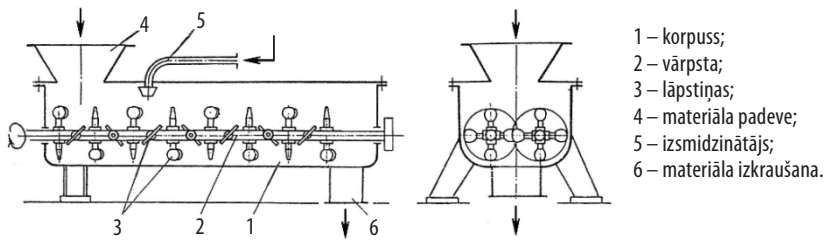
5.

Granulu veidošanās mehānisms un procesu regulējošie tehnoloģiskie faktori ir līdzīgi kā diska granulatora gadījumā.

Ja salīdzina diska un cilindrisko granulatoru darbību, priekšroka dodama diska granulatoriem. Tajos notiek precīzāka granulu klasifikācija, mazāk granulu jānogādā reciklā. Tie ir ērtāki ekspluatācijā, procesu var novērot vizuāli, labāk var regulēt granulēšanas procesa parametrus, tiem ir mazāka masa un gabarīti.

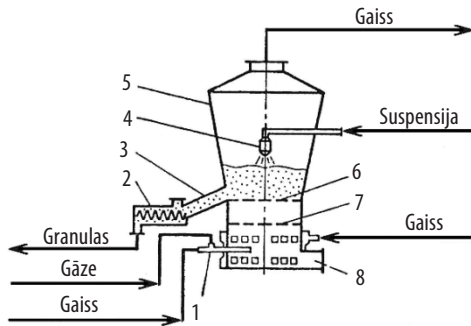
Lāpstiņgranulators. Aglomerāciju, daļiņām augot, var realizēt lāpstiņgranulatoros (5.11. att.). Konstruktīvi granulators sastāv no divām vārpstām, kas iemontētas nekustīgā korpusā, kuram ir siles forma, savukārt vārpstas griežas pretējos virzienos. Tās ir aprīkotas ar lāpstiņām, kuru pagrieziens leņķi var mainīt. Korpusā no augšas ievada sauso materiālu, izsmidzināmo šķidrumu, ja nepieciešams, arī citus komponentus. Granulēšanas procesa pamatā ir intensīva maisīšana, dažāds materiāla un lāpstiņu kustības ātrums. Lāpstiņas kopā ar materiālu gar siles sāniem centrā kustas lejup un ceļas augšup. Gatavās granulas izvada no iekārtas apakšas.

Verdošā slāņa granulators. Lai iegūtu granulas no suspensijām, rūpniecībā izmanto verdošā slāņa iekārtas (5.12. att.). Granulatorā virs verdošā slāņa novietota sprausla suspensijas izsmidzināšanai. Iekārtas apakšā atrodas gāzes kurtuve. Iegūtās dūmgāzes kopā ar gaisa plūsmu nodrošina stabilu pseidosašķidrīnāto materiāla slāni. Gāzes plūsmas sadalošais režģis garantē vienādu gāzes plūsmas ātrumu visā aparāta šķērsgriezumā, kas parasti ir robežās no 1,5 m/s līdz 5 m/s.



- 1 – korpus;
- 2 – vārpsta;
- 3 – lāpstiņas;
- 4 – materiāla padeve;
- 5 – izsmidzinātājs;
- 6 – materiāla izkraušana.

5.11. att. Lāpstiņgranulators.



- 1 – gāzes deglis;
- 2 – gliemežtransportieris;
- 3 – granulu izkraušana;
- 4 – sprausla;
- 5 – separācijas telpa;
- 6 – režģis;
- 7 – ārdstieņu režģis;
- 8 – gāzes kurtuve.

5.12. att. Verdošā slāņa granulators.

5.

5.4. Aglomerācija presējot

Granulētu produktu iegūšanas tehnoloģiskais process, tos presējot, sastāv no šādām pamatstadijām: dispersa pulverveida materiāla iegūšana pēc nepieciešamības, dažādu pulveru sajaukšana, presēšana, iegūtā granulveida materiāla klasifikācija. Šī tehnoloģiskā cikla izšķirošā stadija ir nepārtraukta presēšanas operācija, kuras laikā notiek birstošā materiāla sablīvēšana no bēruma blīvuma līdz galaprodukta blīvumam.

Presēšanas laikā uz materiālu iedarbojas ar spēku, kas rada daļiņu sablīvēšanos, attālums starp daļiņām samazinās, to starpā rodas ļoti daudz kontaktvietu, samazinās tukšuma tilpuma daļa (porainība). Papildus saspiežot daļiņas, tās kontaktvietās var tikt sasmalcinātas vai deformētas, kas būtiski palielina kontaktvirsmas laukumu. Šajos procesos svarīgu lomu spēlē *Van der Waals* un elektrostatiskie spēki (5.2. nodaļa), kas gadījumā, ja attālums starp daļiņām ir neliels, var būt relatīvi lieli. Pieaugošais presēšanas spiediens vienlaicīgi palielina berzi starp daļiņām, kā rezultātā kontaktvietās strauji pieaug temperatūra, mikrokušanas un saķepšanas rezultātā starp tām veidojas papildu saites. Bieži, lietojot presēšanas metodi, papildus izmanto saistvielas, kas aizpilda tukšumu starp daļiņām un saista tās savā starpā.

Eksistē dažādi teorētiskie modeļi, kas apraksta sakarības starp presēšanas parametriem. Piemēram, nepieciešamo presēšanas spiedienu tuvināti var vērtēt pēc daļiņu sablīvēšanās pakāpes:

$$\ln p = -K_1 \frac{V_A}{V_V} + K_2, \quad (5.19)$$

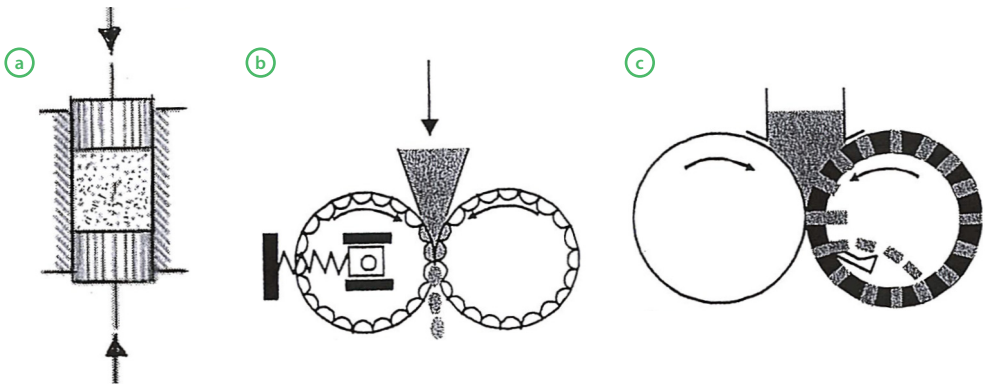
kur p – nepieciešamais spiediens;

V_A – aglomerāta tilpums;

V_V – pilnīgi sapresētas vielas (bez porām) tilpums;

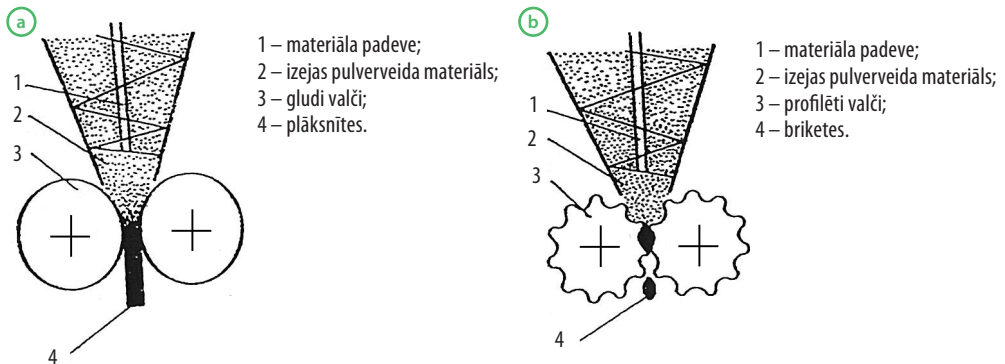
K_1, K_2 – vielai raksturīgās konstantes.

5. Maksimālās spiediena vērtības šajā gadījumā tiek sasniegtas, kad aglomerāta tilpums kļūst vienāds ar tīras vielas aizņemto tilpumu, tas ir, kad abu blīvums kļūst vienāds. Lai šādu stāvokli sasniegtu, presēšanas spiedienam jābūt ekstrēmi augstam, tas var sasniegt 1000 MPa.



5.13. att. Aglomerātu iegūšana presējot:

(a) – presforma, (b) – valču prese, (c) – valču prese ar diskveida matricu.



5.14. att. Valču preses shēma ar gludiem valčiem (a) un profilētiem valčiem (b).

Visas pamatmetodes aglomerātu iegūšanai presējot var iedalīt divās daļās:

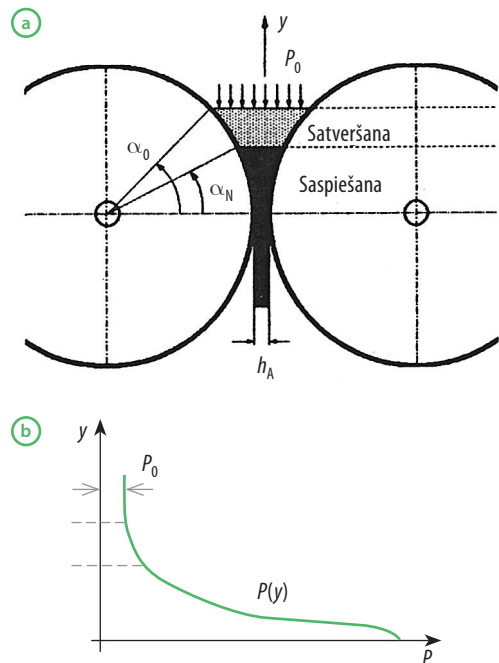
- ◆ kompaktēšanas metodes;
- ◆ ekstrūzijas metodes.

Birstoša materiāla kompaktēšanu jeb sablīvēšanu var realizēt, vai nu presēšanas laikā presformā, izmantojot valču presi ar gludiem, profilētiem valčiem, vai arī lietojot valču presi ar diskveida matricu (5.13. att.). Ekstrūzijas gadījumā materiāls sablīvējas ekstrūdera kanālā berzes spēka un gliemeža vai inžekcijas virzuļa radītā spiediena spēka rezultātā.

Valču prese sausu pulverveida materiālu sablīvēšanai. Aglomerātu iegūšana, izmantojot valču preses, ir viena no izplatītākajām granulveida materiālu iegūšanas metodēm rūpniecībā. Ar šo metodi iegūst ļoti plašu ķīmisko produktu klāstu, tajā skaitā amonija sulfāta, kālija hlorīda, kālija nitrāta u. c. granulas, keramiskās masas, metālu pulveru un kausējumu granulas un briketes.

Birstošais materiāls (pulverveida vai sīkkristālisks materiāls), izmantojot gliemežpadevēju, tiek transportēts uz valču preses satveres zonu. Gliemežpadevējs nodrošina nepārtrauktu materiāla padevi, vienlaikus ar tā daļēju sablīvēšanos un gaisa ieslēgumu izvadīšanu. Materiāla deformācija un sablīvēšanās notiek saspiešanas zonā starp diviem valčiem, kas rotē viens otram pretī. Viens no valčiem ir stingri nostiprināts, otru iespējams pārvietot horizontālā virzienā un iestādīt presēšanai nepieciešamo spiedienu (5.14. att.). Vienkāršots materiālu sablīvēšanas modelis parādīts 5.15. attēlā.

Materiāls ar virsspiedienu (p_0), ko rada gliemežpadevējs (5.15. att.) nokļūst starp valčiem. Virsspiediena skaitliskās vērtības ir atkarīgas no materiāla un var atrasties robežās $(0,15-14) \cdot 10^5$ Pa. Deformācijas zonas sākuma stāvokli un materiāla masas šķērsriezumu nosaka satveres leņķis (α_0). Satveres zonā parasti ir spēkā sakarība: $\alpha_N < \alpha < \alpha_0$, kur α_N ir presēšanas leņķis, kas nosaka presēšanas zonas sākumu. Presēšanas zonā $0 < \alpha < \alpha_N$ vienlaikus mainās spiediena sadalījums starp valčiem. Maksimālais spiediens, kas atbilst ne-



5.15. att. Materiālu sablīvēšanas zonas (a) un spiediena sadalījuma starp valčiem (b).

pieciešamajam presēšanas spiedienam, tiek sasniegts, ja $\alpha \approx 0^\circ$ (5.15. (b) att.). Presēšanas leņķis (α_N) ir atkarīgs no materiāla saspiežamības faktora (K), materiāla berzes koeficienta un berzes koeficienta starp materiāla daļiņām un valču virsmu. Tātad galvenais parametrs, kas nosaka materiāla lentes biežumu un blīvumu aiz valčiem, ir presēšanas spiediens. Eksistē dažādi teorētiskie modeļi analītiskai nepieciešamā spiediena un sapsētā materiāla blīvuma noteikšanai, kas cenšas saistīt valču ģeometriskos parametrus un materiāla fizikāli mehāniskās īpašības. Pašreiz grūti atrast teorētisku vienādojumu, kas ļautu novērtētu visu daudzveidīgo parametru ietekmi. Eksistē, piemēram, vienādojums, pēc kura var orientējoši noteikt lentes blīvumu aiz valču preses (ρ_1):

$$\rho_1 = \frac{\rho_0}{\varepsilon_1} \left(1 + \frac{\alpha_0 R}{h_1} \right), \quad (5.20.)$$

kur ρ_0 – pulvera uzbēruma blīvums;

ε_1 – pagarinājuma koeficients;

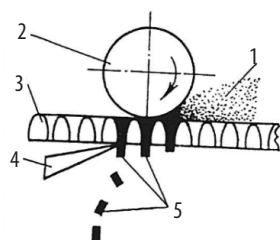
α_0 – satvērums leņķis;

R – valču rādiuss;

h_1 – lentes biežums.

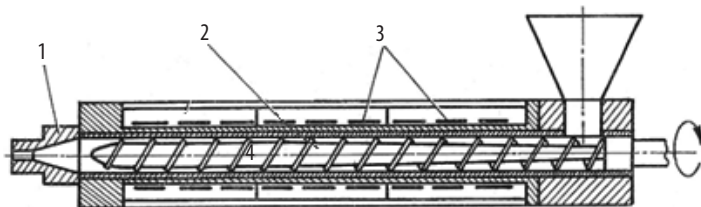
Galvenā problēma, lietojot šo vienādojumu, ir ticama pagarinājuma koeficienta noteikšana pulverveida materiāliem.

Izmantojot valču preses, iegūst sablīvētu materiālu plākšņu vai lentes veidā, kas pēc tam tiek sasmalcināts līdz nepieciešamajam daļiņu izmēram. Profilētu valču gadījumā uzreiz iegūst nepieciešamās formas un izmēra granulas vai briketes.



- 1 – izejas materiāls;
- 2 – valcis;
- 3 – diskveida matrica;
- 4 – nazis;
- 5 – granulas.

5.16. att. Valču preses ar diskveida matricu shēma.



- 1 – ekstrūdera galva;
- 2 – gliemezis;
- 3 – apsilde vai dzesēšana.

5.17. att. Ekstrūdera shēma.

Formēšanas preses un ekstrūderi. Formēšanas presēs un ekstrūderos apstrādā plastiskus un viegli veidojamus materiālus, kas notiek, izspiežot plastificētu masu caur matricas caurumiem vai ekstrūdera sprauslu. 5.16. attēlā redzama valču prese ar diskveida matricu plastisku masu formēšanai.

Kā redzams attēlos, iekārtas granulēšanas realizācijai var būt ļoti dažādas. Var lietot presi ar horizontāli novietotu nekustīgu caurumotu matricu, masu var spiest arī cauri perforētai cilindriskas formas matricai (5.13. (c) att.).

5.17. attēlā parādīta ekstrūdera shēma materiāla, granulu vai stieņu iegūšanai. Izmantojot ekstrūzijas metodi, plastiskā masa tiek transportēta, saspiesta rotējoša gliemeža kanālā un izspiesta caur sprauslām ekstrūdera galvā. Novietojot aiz ekstrūdera galvas rotējošus nažus, iegūst granulētu materiālu.

5.5. Pulverveida materiāla tabletēšana

Tabletēšana ir kompaktu izstrādājumu iegūšanas process no pulveriem, tos sapsesējot tablešu formā. Tabletēšanu ļoti plaši izmanto ķīmiskajā, farmaceitiskajā, pārtikas rūpniecībā u. c. Turklāt materiāli tablešu formā var būt kā ražošanas cikla galaprodukts vai arī starpprodukts, kas pēc tam tiek pārstrādāts. Atkarībā no tā tablešu kvalitātei tiek uzstādītas dažādas prasības. Virknei ķīmisko produktu, ķīmiski farmaceitisko un vitamīnu preparātiem tabletēšana parasti ir attiecīgā produkta izgatavošanas tehnoloģiskā procesa pēdējā stadija. Tabletes izgatavo miljonus eksemplāru. Tām jābūt noteiktam sastāvam, masai un stiprībai, kas ir pietiekama, lai veiktu iepakojšanu un tās izmantotu patērētāji. Svarīgs ir arī tabletes ārējais izskats. Tabletēm, kuras izmanto, piemēram, miniatūru ķīmisko strāvas elementu izgatavošanai, izvirza citas prasības: tām jābūt ar vienādu blīvumu visā tilpumā, mehāniski izturīgām, ar ļoti precīziem izmēriem, lai varētu automatizēt bateriju ražošanu.

5.5.1. Tabletēšanas tehnoloģija un galvenās likumsakarības

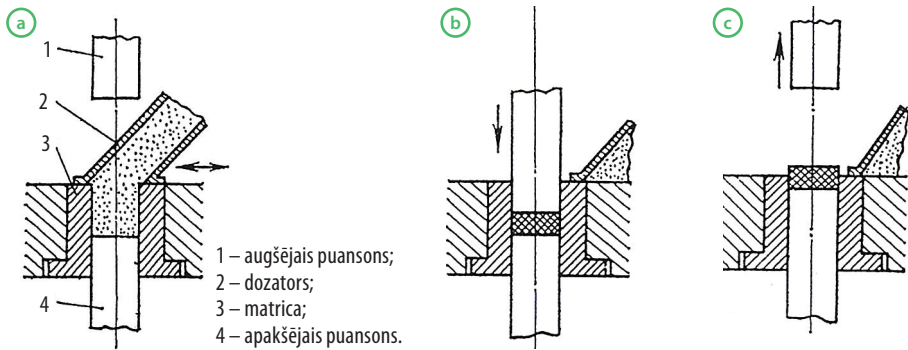
Tabletēšanu parasti realizē speciālās iekārtās – tabletēšanas automātos. Modernie lieljaudas tablešu automāti saražo līdz 500 000 tablešu stundā. Tabletēšanas process tabletēšanas mašīnās parasti ietver šādas pamatstadijas: materiāla padevi un dozēšanu, presēšanu, gatavās tabletes izstumšanu no presformas (5.18. att.).

Padeve un dozēšana tablešu mašīnās notiek, izmantojot tilpuma metodi, – aizpildot iepriekš definētu matricas kanālu ar tabletējamo materiālu. Dozēšana pēc materiāla svara praktiski netiek izmantota. Presēšana notiek slēgtā presformā, lietojot augšējo un apakšējo puansonu, tai seko gatavās tabletes izstumšana no presformas, tās atdalīšana no matricas un pārvietošana.

Gatavo tablešu kvalitāti nosaka pārstrādājamā materiāla īpašības un galveno tabletēšanas operāciju norises likumsakarības.

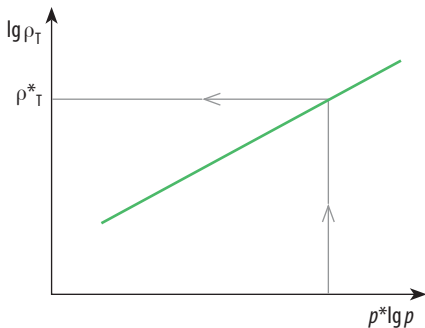
Dispersa pulverveida materiāla „uzvedību” presēšanas laikā raksturo ar tā saspiežamību jeb kompresibilitāti, kas parāda sakarību starp tabletes tilpuma izmaiņām un presēšanas spiedienu. Eksistē vairāki empīriski vai pusempīriski vienādojumi saspiežamības noteikšanai. Pamatojoties uz lielu eksperimentu skaitu, ir bijis mēģinājums attēlot to kā vienkāršu pakāpes funkciju:

5.

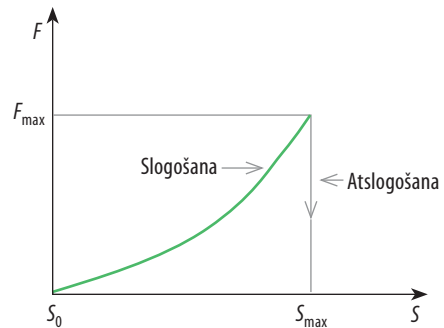


5.18. att. Tabletēšanas procesa stadijas:

(a) – pulvera dozēšana, (b) – presēšana, (c) – tabletes izmantošana.



5.19. att. Aglomerāta (tabletes) blīvuma izmaiņas atkarībā no presēšanas spiediena.



5.20. att. Pieliktā spēka F – puansona gājiens S sakarība, tabletējot materiālu.

$$\frac{\rho_T}{\rho^*} = \left(\frac{P}{P^*} \right)^{\frac{1}{k}}, \quad (5.21.)$$

kur ρ_T – tabletes blīvums;

ρ^* – nosacītais maksimālais blīvums jeb kompakta materiāla blīvums;

P – presēšanas spiediens;

P^* – spiediens, pie kura ir sasniedzams kompakta materiāla blīvums.

Eksperimentālās vērtības $\rho_T(P)$ dubultlogaritmiskās koordinātēs tiek attēlota kā taisne ar slīpumu $1/k$ (5.19. att.).

Tabletēšanai patērēto enerģiju var iegūt no pieliktā spēka (F) un puansona noieta gājiena (S) sakarībām, tabletes presējot (5.20. att.).

Slogojot presējamo materiālu, puansonam pārvietojoties starp S_0 un S_{maks} , patērēto enerģiju (veikto darbu) A_T atrod:

$$A_T = \int_{S_0}^{S_{\text{maks}}} F(s) ds, \text{ (kJ)}. \quad (5.22.)$$

Ja A_T attiecina uz tabletes masu m_T , iegūst tabletēšanas īpatnējo enerģiju E_T :

$$E_T = \frac{A_T}{m_T}, \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right). \quad (5.23.)$$

5.5.2. Tabletēšanas iekārtas

Pulverveida materiālu tabletēšanai izmanto galvenokārt divu darbības veidu iekārtas: ekscentriskos kloķmehānisma un rotācijas tabletēšanas automātus.

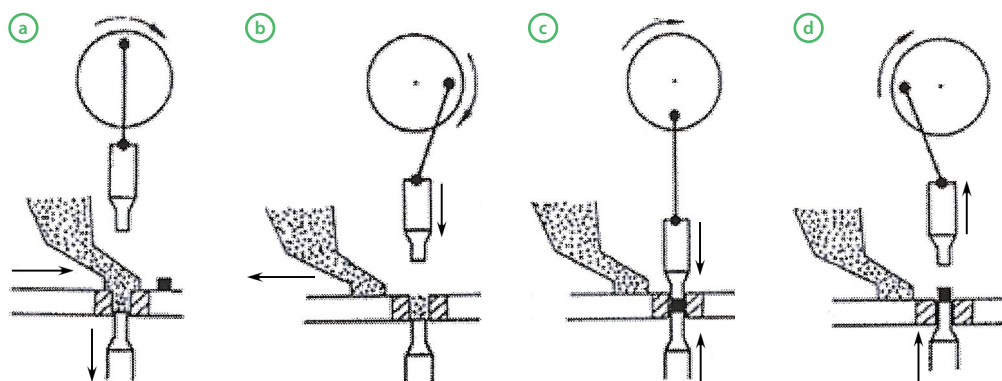
Kloķmehānisma tabletēšanas mašīnas ir apgādātas ar kloķa klaņa mehānismu, ar kuru realizē galveno operāciju – tabletes presēšanu. 5.21. attēlā redzama vertikālās kloķmehānisma tabletēšanas mašīnas darbības principiālā shēma.

Šajā iekārtā presformas matrica ir iestiprināta kustīgā preses galdā. Apakšējais puansons noslēdz presformu, kas piepildās ar presējamo materiālu (1), augšējais puansons virzās leju, materiāls tiek sapresēts (2), (3). Apakšējais puansons izspiež gatavo tableti no matricas (4). Dozēšanas pildīšanas iekārta piepilda nākamo presformas matricu, tabletēšanas cikls sākas no jauna.

Kloķmehānisms ļauj attīstīt ievērojamu spēku, tāpēc šādas iekārtas bieži izmanto metālisku pulveru presēšanai. Iekārtas raksturo neliela ražība, tāpēc tās lieto, lai iegūtu tabletes mazā apjomā, eksperimentālas partijas. Tajā pašā laikā šāda tipa mašīnās var realizēt vairākpakāpju presēšanu, iegūstot tabletes ar precīziem izmēriem un minimālām masas svārstībām.

Rotācijas tabletēšanas automāti ir daudzpozīciju mašīnas, kurās nepārtraukti notiek procesa galvenās un palīgoperācijas, gatavās tabletes pastāvīgi transportējot. 5.22. attēlā redzama rotācijas tabletēšanas mašīnas principiālā shēma un tabletēšanas cikls. Šajās iekārtās lieto desmitiem presformu komplektā ar augšējiem un apakšējiem puansoniem, kas iemontēti rotējošā tērauda diskā. Diskam rotējot, vienlaikus, bet dažādās fāzēs notiek tabletēšana. Tabletēšanas cikla sākumā (5.22. att.) apakšējais puansons pārvietojas leju, ļaujot materiālam ieplūst presformas matricā.

Pēc tam tas pārvietojas uz augšu līdz noteiktam stāvoklim, notiek presējamā materiāla dozēšana, liekais materiāls tiek izspiests no matricas. Nākamajā brīdī



5.21. att. Kloķmehānisma vertikālās tabletēšanas mašīnas darbības principiālā shēma.

5.5.3. Tablešu kvalitātes kontrole

Atkarībā no tablešu lietošanas sfēras tām tiek izvirzītas noteiktas prasības. Farmācijā gatavo tablešu kontroli veic atbilstīgi farmakopejas prasībām. Pārbauda, vai tabletes atbilst šādiem galvenajiem kvalitātes rādītājiem:

- ◆ organoleptiskās īpašības;
- ◆ mehāniskā stiprība;
- ◆ tablešu masas patstāvība;
- ◆ tablešu sadalīšanās laiks;
- ◆ ķīmiskās īpašības.

Tabletes ārējais izskats

5. Aplūko noteiktu skaitu tablešu (parasti 20 tabletes) un vizuāli novērtē iespējamos ārējos defektus (plaisas, skrāpējumi, atslāņojumi, virsmas gludums un vienmērība u. c.). Nosaka tabletes izmērus (diametrs, augstums) un to svārstības.

Tabletes mehāniskā stiprība

Mehānisko stiprību parasti novērtē pēc diviem parametriem: stiprība spiešanas laikā un berzes izturība.

Tabletes stiprību, to saspiežot, nosaka speciālās iekārtās. Vienā no iekārtu veidiem, kas darbojas pēc atsperes dinamometra principa, tableti uz kantes novieto uz pamatnes un slogo no augšas ar kustīgu plunžeru. Tiek fiksēta slodze, kad tablete sagrūst. Tabletes stiprība spiežot tiek noteikta:

$$q_m = \frac{F}{d \cdot h}, \text{ MPa}, \quad (5.24.)$$

kur F – sagraušanas slodze, N;

d – tabletes diametrs, m;

h – tabletes augstums, m.

Stiprības rādītājs parasti ir robežās no 0,45 MPa līdz 1,2 MPa.

Tablešu mehānisko stiprību raksturo arī noturība pret berzi, kas ir ļoti būtiski, tabletes transportējot, fasējot, iepakojot. Ja mehāniskā stiprība nav pietiekama, visos šajos procesos var veidoties vielas putekļi uz tabletes virsmas un iepakojuma. Berzes noturību nosaka iekārtā – fribilatorā, kas pēc būtības ir caurspīdīga materiāla cilindrs, kurā pa perimetru pie iekšējās sienas 20° leņķī piestiprinātas 12 lāpstiņas. Cilindrs ir nostiprināts uz horizontālas vārpstas. Tam griežoties, lāpstiņas iekustina tabletes. Pārbaudi veic, kad cilindrs sasniedzis noteiktu apgriezīgu skaitu – (20–100 apgr./min) un noteiktu laiku (5 min). Tabletes noturību pret berzi nosaka procentos, berzes noturība ne-

drīkst būt mazāka par 97 %:

$$B = 100\% - \frac{m_0 - m_1}{m_0} 100\%, \quad (5.25.)$$

kur m_0 – tablešu masa pirms eksperimenta, g;

m_1 – tablešu masa pēc eksperimenta.

Masas patstāvība

Masas patstāvība ir viena no svarīgajām prasībām, kas tiek izvirzīta gatavām tabletēm. Parasti tiek svērtas 20 tabletes ar precizitāti 0,001 g un noteikta to vidējā masa. Sverot katru tableti atsevišķi, nosaka novirzi no vidējās masas. Pieļaujamās novirzes mainās atkarībā no tabletes masas:

- ◆ tabletes ar masu līdz 0,1 g \pm 10 %;
- ◆ tabletes ar masu virs 0,3 g \pm 5 %.

Ir noskaidrots, ka tablešu masas nevienmērību visvairāk ietekmē dozēšana.

5.

Tablešu sadalīšanās laiks

To nosaka iekārtās, kuras sastāv no kustīga groziņa, kas ievietots termostātajam traukā ar šķidrumu (ūdens, mākslīga kuņģa sula), kur šķidruma temperatūra tiek uzturēta 37 ± 2 °C robežās. Elektromotors ar pārvada mehānismu kustina groziņu noteiktā amplitūdā un frekvencē ~ 30 cikli minūtē. Tiek fiksēts laiks, kad tabletes pilnīgi sadalās. Piemēram, tabletēm bez apvalka sadalīšanās laiks nedrīkst būt ilgāks par 15 minūtēm.

Ķīmiskās īpašības

Svarīgi ir aktīvās vielas ķīmiskā sastāva un daudzuma patstāvība, ārstnieciskās vielas aktivitāte un derīguma termiņš. Lai noteiktu aktīvās vielas daudzumu tabletēs, izmantojot ne mazāk par 20 sadrupinātām tabletēm, sagatavo iesvaru. Pieļaujamā aktīvās vielas novirze ir atkarīga no aktīvās vielas devas, ja farmakopejā nav citu norādījumu:

- ◆ aktīvā viela līdz 0,001 g – \pm 15 %;
- ◆ aktīvā viela no 0,001 līdz 0,01 g – \pm 10 %;
- ◆ aktīvā viela no 0,1 līdz 2 g – \pm 5 %.

6. CIETU MATERIĀLU SMALCINĀŠANA

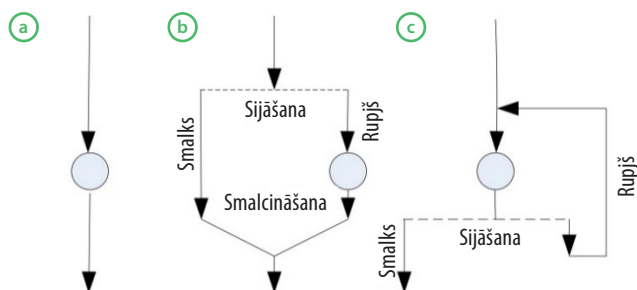
Pirms materiāli tiek pakļauti ķīmiskai vai cita veida iedarbībai (žāvēšana, ekstrakcija u. c.), tie bieži vien ir iepriekš jāsaģatavo. Praktiski visu fizikālo un ķīmisko procesu, kuros piedalās cietās daļiņas, intensitāte pieaug, palielinoties daļiņu īpatnējai virsmai. Tas nozīmē, ka jāoptimizē cieto daļiņu izmērs un forma. Ja jāiegūst neliela izmēra daļiņas, izmanto drupināšanu un malšanu – materiālu smalcina. Smalcināšana ir attiecīgā objekta izmēru samazināšana no sākotnējā līdz nepieciešamajam, izmantojot mehānisku spēku.

Smalcināšanas mērķi ir:

- ◆ izejvielu sagatavošana turpmākai sadalīšanai;
- ◆ izejvielu sagatavošana ķīmiskām pārvērtībām;
- ◆ tāda attiecīgā daļiņu izmēra iegūšana, kas atbilst noteiktiem galaprodukta kvalitātes rādītājiem.

Rupjā smalcināšana (drupināšana) notiek drupinātājos, bet smalkā smalcināšana (malšana) – dzirnavās. Materiāla smalcināšana ir saistīta ar lielu enerģijas patēriņu, tā arī ir nopietna tehniski ekonomiska problēma, jo šādu iekārtu lietderības koeficients ir ļoti mazs un parasti nepārsniedz 1 %. Tāpēc smalcināšanas procesu shēmu pamatā parasti ir princips „Nesmalcini neko lieku”. Pēc katras smalcināšanas stadijas iegūtais sasmalcinātais produkts tiek klasificēts (šķirots). Lielākie gabali tiek atdoti otrreizējai smalcināšanai. Smalcināšana parasti notiek vairākās stadijās, kuras var organizēt vaļējos un slēgtos ciklos (6.1. att.).

Smalcinot vaļējā ciklā, cietais materiāls smalcinātājā nonāk vienreiz. Pēc šīs shēmas organizē smalcināšanu, kad nav vajadzīgs precīzs galaprodukta lielums



6.1. att. Smalcināšanas shēmas:

(a) – vaļējs cikls, (b) – vaļējs cikls ar iepriekšēju sijāšanu, (c) – slēgts cikls ar sijāšanu.

un daļiņu sadalījums (6.1. (a) att.). Lai samazinātu enerģijas patēriņu, dažos gadījumos sākotnējo materiālu klasificē un smalcina tikai lielos gabalos, bet atdalītos smalkumus pievieno galaproduktam (6.1. (b) att.).

Smalcinot produktu slēgtā ciklā, materiāls pēc smalcināšanas tiek nepārtraukti klasificēts un lieli gabali transportēti otrreizējai smalcināšanai (6.1. (c) att.). Šāda shēma ļauj racionāli izmantot enerģiju, palielināt iekārtas ražību un iegūt viendabīgu produktu.

Materiālu smalcināšana var notikt sausā un slapjā veidā. Rupjā smalcināšana jeb drupināšana parasti notiek sausā veidā. Smalko un ļoti smalko malšanu veic slapjā veidā, izslēdzot putekļu veidošanos un atvieglojot gatavā produkta transportēšanu. Ja nav pieļaujama materiāla saskare ar ūdeni, to var malt arī sausā veidā. Šajā gadījumā svarīgs ir smalcināmā materiāla mitruma līmenis, piemēram, ja materiāla mitrums ir lielāks par 4–5 %, tiek veicināta daļiņu salīpšana.

Smalcināmos materiālus bieži raksturo to stiprība spiedē (σ), un tos nosacīti var iedalīt turpmāk minētajās grupās.

Materiāls	σ , MPa
Neizturīgi	< 10
Vidēji izturīgi	10–50
Izturīgi	50–100
Ļoti izturīgi	> 100

Piemēram, kritam $\sigma = 1\text{--}10$ MPa, granītam $\sigma = 150\text{--}250$ MPa.

Smalcināšanas procesu raksturo smalcināšanas pakāpe – tā ir daļiņu izmēru attiecība pirms un pēc smalcināšanas. Izšķir lineāro un tilpuma smalcināšanas pakāpi. Lineārā smalcināšanas pakāpe (i) ir attiecība starp vidējo gabalu diametru pirms (d_s) un pēc (d_b) smalcināšanas:

$$i = \frac{d_s}{d_b}. \quad (6.1.)$$

Tilpuma smalcināšanas pakāpe (a) ir attiecība starp vidējo gabalu tilpumu pirms (V_s) un pēc (V_b) smalcināšanas:

$$a = \frac{V_s}{V_b}. \quad (6.2.)$$

Praksē izmanto galvenokārt lineāro smalcināšanas pakāpi. Bieži ir grūti izšķirties, kādu izmēru izmantot, lai novērtētu smalcināšanas pakāpi. Parasti daļiņu izmērus vērtē ar sietu analīzi.

Pēc daļiņu lieluma smalcināšanas sākumā un beigās procesu iedala drupināšanā un smalcināšanā jeb malšanā, ko savukārt var sadalīt vairākās stadijās. Smalcināšanas procesa sadalījums stadijās dažādos literatūras avotos var atšķirties, 6.1. tabulā dots viens no iespējamajiem variantiem.

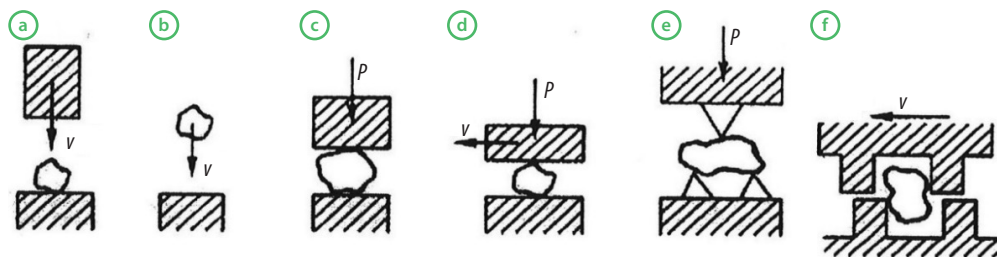
Galvenie smalcināšanas paņēmieni ir sišana, spiešana, beršana, skaldišana un cirpšana (6.2. att.).

Sitiena laikā (6.2. (a), (b) att.), iedarbojoties dinamiskai slodzei, ķermenī rodas spriegumi, kas izraisa tā sadalīšanos. Izšķir brīvo un ierobežoto sitienu. Ierobežoto sitienu nodrošina smalcināšanas iekārtas darba ķermeņi, kas iedarbojas uz materiālu. Brīvais sitiens notiek, materiālam lidojumā saduroties ar iekārtas ierīcēm vai citiem smalcināmā materiāla gabaliem. Sitienu izmanto vesera drupinātājos, dezintegratoros, pneimatiskās strūklas dzirnavās.

Spiediena izdarīšanas laikā (6.2. (c) att.) noteicošie ir spriegumi, kas rodas materiālā statiskas slodzes darbības rezultātā starp iekārtas ierīcēm. Spiešanu izmanto, piemēram, žokļu drupinātājos.

6.1. tabula
Smalcināšanas stadijas

Smalcināšanas klase	Gabalu diametrs, mm		Smalcināšanas pakāpe
	Pirms smalcināšanas	Pēc smalcināšanas	
Drupināšana:			
• rupjā	1000	250	3–6
• vidējā	250	5–50	4–10
• smalkā	20	1–5	5–10
Malšana:			
• rupjā	1–5	0,05–0,5	10–50
• smalkā	0,1–0,04	0,001–0,005	50–100
• koloīdā	<0,1	<0,001	>100



6.2. att. Cietu ķermeņu smalcināšanas paņēmieni: (a) – ierobežots sitiens, (b) – brīvs sitiens, (c) – spiešana, (d) – beršana, (e) – skaldišana, (f) – cirpšana (P – slodze, v – ātrums).

Beršanas laikā (6.2. (d) att.) galvenie spriegumi, kas rada materiāla sadalīšanos, ir bīdes spriegumi. Materiāls atrodas starp diviem ķermeņiem, kas kustas pretējos virzienos. Beršanu kombinācijā ar spiešanu lieto koniskos un veltņu drupinātājos, koniskās un ložu dzirnavās.

Skaldīšanas laikā (6.2. (e) att.) slodze koncentrējas noteiktā vietā, izsaucot lieces spriegumus. Šo paņēmieni lieto zobveltņu drupinātājos.

Cirpšanas laikā (6.2. (f) att.) rodas bīdes spriegumi. To lieto, smalcinot plastiskus materiālus, šķiedras, koksnī, papīru u. c.

Praktiski visās iekārtās realizējas dažādas smalcināšanas paņēmieni kombinācijas. Smalcināšanas iekārtas izvēlas atkarībā no tādām smalcināmā materiāla īpašībām kā stingrība, cietība, trauslums, mitrums, gabalu izmēri u. c. Visbiežāk rupjai un vidējai drupināšanai izmanto iekārtas, kurās dominē spiešanas, sišanas un beršanas process, bet smalkai drupināšanai un malšanai – iekārtas, kurās dominē sišana un beršana.

6.1. Smalcināšanas teorētiskie pamati

Kā jau minēts iepriekš, ja uz ķermeni darbojas ārēja slodze, tajā rodas iekšējie spriegumi. Ja spriegumi pārsniedz materiāla stiprības robežu, tas sadalās mazākos gabalos. Ja no jauna radušos gabalu izmērs ir par lielu, to turpina smalcināt, līdz ir iegūts gabals ar vēlamajiem izmēriem. Lai šo procesu realizētu, ir jāpatērē zināms enerģijas daudzums. Smalcināšanai nepieciešamās enerģijas noteikšana ir svarīgākā problēma smalcināšanas teorijā.

Pirmais šo problēmu centās atrisināt fiziķis P. Ritingers (*P. Rittinger*). 1867. gadā viņš izvirzīja hipotēzi, ka darbs, kas izlietots smalcināšanai, ir proporcionāls no jauna izveidotajām virsmām.

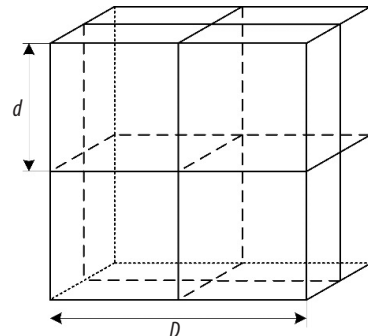
Apskatīsim kuba formas (6.3. att.) ķermeņa smalcināšanu. Šis ķermenis smalcinot tiek sadalīts mazākos kubos.

Iegūto kubu skaits ir proporcionāls smalcināšanas pakāpei kubā:

$$z = i^3 = \frac{D^3}{d^3}, \quad (6.3.)$$

kur D – kuba malas garums pirms smalcināšanas,

d – jaunizveidoto kubu malas garums.



6.3. att. Kuba formas ķermeņa modelis.

Kopējais sākotnējais kuba virsmas laukums:

$$S_s = 6 \cdot D^2. \quad (6.4.)$$

Kubu kopējais virsmas laukums pēc smalcināšanas:

$$S_B = 6 \cdot d^2 \cdot \frac{D^3}{d^3}. \quad (6.5.)$$

No jauna izveidotais laukums:

$$S = S_B - S_s = 6D^2(i-1). \quad (6.6.)$$

Pieņem, ka jaunas virsmas izveidošanai smalcinot tiek izlietots patstāvīgs darbs (A_y) jeb īpatnējais darbs, kas ir raksturīgs katram materiālam un ko var noteikt eksperimentāli. Kopējais smalcināšanas darbs ir:

$$A_R = A_y \cdot S = 6A_y \cdot D^2(i-1) = K_R \cdot D^2, \quad (6.7.)$$

kur K_R – koeficients, ar kuru vērtē materiāla īpašības un smalcināšanas pakāpi.

Ritingera likums ar labiem rezultātiem ir piemērojams smalkās un koloīdās malšanas gadījumā. Daļiņu mazā izmēra dēļ enerģija, kas tiek tērēta to deformācijai līdz sagraušanai, netiek novērtēta.

V. Kirpičevs (1874) un F. Kiks (*F. Kick*) (1885) neatkarīgi viens no otra attīstīja Ritingera teoriju. Viņi izvirzīja šādu hipotēzi: enerģija, kas nepieciešama, lai mainītu ģeometriski līdzīgu un viendabīgu ķermeņu formu, ir proporcionāla šo ķermeņu tilpumam vai masai, tas ir:

$$A = K_K \cdot \Delta V, \quad (6.8.)$$

kur K_K – proporcionalitātes koeficients;

ΔV – tilpuma izmaiņas.

Atbilstoši elastības teorijai (Huka likums) deformācijas darbs ir:

$$A = \frac{\sigma^2 \cdot V}{2E}, \quad (6.9.)$$

kur σ – spriegums, kas rodas, deformējot ķermeni;

V – deformējamā ķermeņa tilpums;

E – materiāla elastības modulis.

Ja pieņem, ka līdz sagraušanai $K_K = \sigma^2 / 2E$, tad ķermeņa deformācijas darbs atbildīs tā sagraušanas darbam.

Materiāla gabalam pieņemot kuba formu ar malas garumu D un ievietojot formulā (6.8.), D^3 tilpuma V vietā iegūsim izteiksmi, kas saista ķermeņa sagraušanai nepieciešamo enerģiju ar tā izmēriem:

$$A_K = K_K \cdot D^3, \quad (6.10.)$$

kur K_K – koeficients, ar kuru vērtē materiāla īpašības.

Šī hipotēze pazīstama kā Kika-Kirpičeva smalcināšanas likums, kas piemērojams rupjai un vidējai drupināšanai, kad enerģija galvenokārt tiek tērēta materiāla deformācijai.

Smalcināšanas iekārtās parasti vienlaicīgi notiek materiāla drupināšana un smalcināšana jeb malšana. Šajos gadījumos nepieciešamā enerģija atsevišķa ķermeņa sagraušanai un sīkdispersa materiāla radīšanai ir proporcionāla vidējai ģeometriskai enerģijai jaunu virsmu un tilpumu izveidei. Šo hipotēzi 1950. gados izvirzīja F. Bonds, un to mēdz dēvēt par trešo smalcināšanas likumu: ķermeņa smalcināšanas darbu var noteikt kā vidējo ģeometrisko no jauna tilpuma radīšanai iztērētā darba un jaunas virsmas izveidošanas darba.

No vienādojumiem (6.8.) un (6.10.) izriet šāda sakarība:

$$A = A_R + A_K = K_B \sqrt{D^2 \cdot D^3} = K_B \cdot D^{2,5}, \quad (6.11.)$$

kur K_B – koeficients, ar kuru vērtē materiāla īpašības.

No vienādojumiem (6.8.), (6.10.) un (6.11.) izriet, ka minimālā enerģija, kas nepieciešama atsevišķa ķermeņa vai grauda sagraušanai, var tikt izteikta ar kopēju izteiksmi:

$$A = K \cdot D^m. \quad (6.12.)$$

Šajā kopējā izteiksmē pakāpes rādītājs (m) var mainīties no 2 līdz 3 un proporcionalitātes koeficienti K_R , K_K , K_B var atšķirties.

Izteiksmes (6.8.), (6.10.) un (6.11.) izsaka sakarību starp enerģiju, kas nepieciešama atsevišķa ķermeņa sagraušanai, un tā izmēriem, bet neatspoguļo enerģijas patēriņu materiāla masas vai tilpuma vienības drupināšanai un smalcināšanai. Pamatojoties uz šīm sakarībām, ir izvesti vienādojumi lietderīgā darba (W) noteikšanai, kas nepieciešams materiāla tilpuma vienības drupināšanai un smalcināšanai.

Drupināšanai, pamatojoties uz vienādojumu (6.10.):

$$W_D = K_K (\ln D_{\text{vid.}} - \ln d_{\text{vid.}}). \quad (6.13.)$$

Malšanai, pamatojoties uz vienādojumu (6.8.):

$$W_M = K_R \left(\frac{1}{d_{\text{vid.}}} - \frac{1}{D_{\text{vid.}}} \right). \quad (6.14.)$$

Vienlaicīgai drupināšanai un malšanai:

$$W_B = K_B \left(\frac{1}{\sqrt{d_{\text{vid.}}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{\text{vid.}}}} \right). \quad (6.15.)$$

Tehnisko smalcināšanas darbu un nepieciešamo smalcinātāja jaudu tuvināti var aprēķināt, izmantojot Bonda un Vanga empīrisko smalcināšanas likumu:

$$A_s = c \cdot G \left(\frac{\sqrt{i}}{d} \right)^{0,5}, \quad (6.16.)$$

6. kur c – konstante, kas ir atkarīga no smalcināmā materiāla un iekārtas;

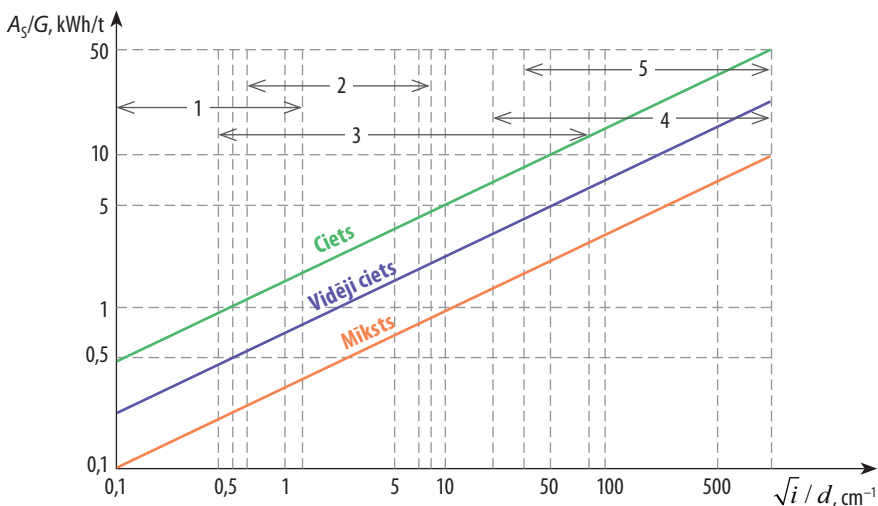
G – smalcināmā materiāla daudzums;

i – smalcināšanas pakāpe;

d – daļiņu vidējais lielums pēc smalcināšanas.

Attiecinot uz smalcināmā materiāla daudzumu, iegūst īpatnējo smalcināšanas darbu:

$$\frac{A_s}{G} = c \left(\frac{\sqrt{i}}{d} \right)^{0,5}. \quad (6.17.)$$



6.4. att. Diagramma materiālu īpatnējā smalcināšanas darba noteikšanai: 1 – žokļu drupinātāji, 2 – koniskie drupinātāji, 3 – veltnu drupinātāji, 4 – dezintegrators, 5 – ložu dzirnavas.

Bonda un Vanga smalcināšanas likums parasti ir attēlots diagrammu veidā (6.4. att.). Šeit īpatnējais smalcināšanas darbs A_S/G ir attēlots kWh/t vienībās un lielums \sqrt{i}/d attiecīgi 1/cm.

Materiālu cietību var novērtēt pēc to mehāniskās stiprības spiedē:

- ◆ mīksts materiāls, $\sigma_{sp} < 10$ MPa (akmeņogles, kūdra);
- ◆ vidēji ciets materiāls, $\sigma_{sp} = 10\text{--}50$ MPa (kaļķakmens, smilšakmens, slānekļis);
- ◆ ciets materiāls $\sigma_{sp} > 50$ MPa (granīts, marmors, bazalts, fosforīti).

Diagrammā (6.4. att.) uzrādītie dati pietiekami precīzi sakrīt ar iekārtu ražotāju datiem, turklāt jāatzīmē, ka smalcināšanai patērētais darbs par 99 % tiek tērēts, lai kompensētu zudumus, kas rodas materiāla berzes dēļ starp atsevišķiem gabaliem, iekārtas ierīcēm un materiāla elastīgās deformācijas dēļ. Zudumi būtiski pieaug, palielinot smalcināšanas pakāpi vienas iekārtas robežās.

Rupjā smalcināšanā, kad smalcināšanas pakāpe $i = 3\text{--}4$, enerģijas patēriņš svārstās ap 1 kWh/t, ja smalcināšanas pakāpe $i > 100$, enerģijas patēriņš sasniedz 50–100 kWh/t.

Tāpēc, sasniedzot nepieciešamo daļiņu izmēru, tās noteikti jāatdala no pārējā smalcināmā materiāla. Svarīgi ņemt vērā, ka nevajag smalcināt neko lieku. Arī pirms materiāla novadīšanas uz smalcinātāju, to vajadzētu klasificēt jeb separēt.

6.

6.2. Smalcinātāju konstrukcijas

Cieto materiālu smalcināšanai ir radītas ļoti daudzas dažādas iekārtas, to klasifikācijas pamatā var būt atšķirīgi principi.

Atkarībā no smalcināšanas pakāpes visas smalcināšanas mašīnas var iedalīt drupinātājos un dzirnavās. Drupinātājus izmanto materiālu rupjai un vidējai drupināšanai, dzirnavas – materiālu rupjai, smalkai un koloīdālai malšanai (6.1. tab.).

Pēc galvenā iedarbes veida uz materiālu smalcināšanas iekārtā drupinātājus var iedalīt tādos, kur notiek: 1) spiešana; 2) beršana – spiešana; 3) sišana; 4) sišana – beršana.

Šis klasifikācijas pamatā ir galvenais smalcināšanas veids. Kā minēts iepriekš, vienlaikus ar galveno iedarbes veidu uz materiālu darbojas arī citi iedarbes veidi.

Galvenās smalcināšanas iekārtas var iedalīt arī pēc konstruktīvām pazī-

mēm:

- 1) žokļu drupinātāji; 2) koniskie drupinātāji; 3) veltņu drupinātāji; 4) vesera drupinātāji – dzirnavas; 5) dezintegratori; 6) skrejdzirnavas; 7) ložu dzirnavas; 8) vibrāciju dzirnavas; 9) gāzes strūklu dzirnavas; 10) koloīdu dzirnavas.

6.2.1. Žokļu drupinātāji

Žokļu drupinātājus izmanto rupjai un vidējai drupināšanai jeb iepriekšējai drupināšanai. Pēc iepriekšējās drupināšanas parasti iegūst produktu, kura gabali ir ne mazāki par 50 mm. Žokļu drupinātājos tiek realizēts materiāla spiešanas un laušanas princips. Materiāla drupināšanu izdara starp divām virsmām (žokļiem): nekustīgo un kustīgo. Materiālu pievada no augšas, žokļiem tuvinoties, tā gabali sadrūp, žokļiem attālinoties, sadrupinātais materiāls izbirst no iekārtas pa apakšējo spraugu starp žokļiem.

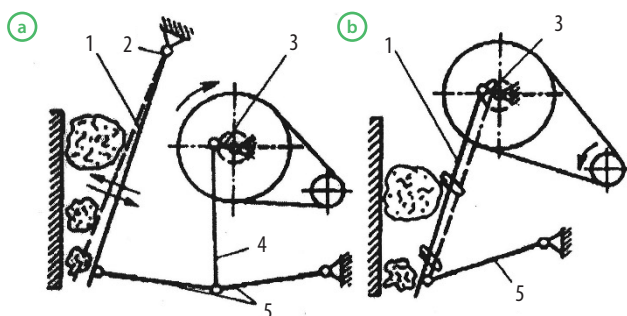
6.

Atkarībā no žokļu drupinātāju kinemātiskajām shēmām izšķir drupinātāju ar vienkāršu un saliktu žokļu kustību (6.5. att.). Atkarībā no kustīgā žokļa ass stāvokļa izšķir drupinātāju ar augšējo un apakšējo atbalstu.

Drupinātājos žoklis ar vienkāršu kustību (6.5. (a) att.) brīvi kustas uz augšējās atbalsta ass (2). Kustīgais žoklis (1) izdara šūpošanās kustības, kas rodas, rotējot ekscentriskai vārpstai (3), un tiek pārnestas caur vertikālu klani (4) un plāksnēm (5).

Drupinātājos ar saliktu žokļu kustību (6.5. (b) att.) kloķvārpsta (3) tieši savienota ar kustīgo žokli (1), tā kustības trajektorija veido slēgtu līniju, parasti elipsi. Šādos drupinātājos materiāls tiek spiests un vienlaicīgi berzts starp plāksnēm.

Drupinātājam ar augšējo atbalstu drupināšanas laikā mainās izlādes sprau-

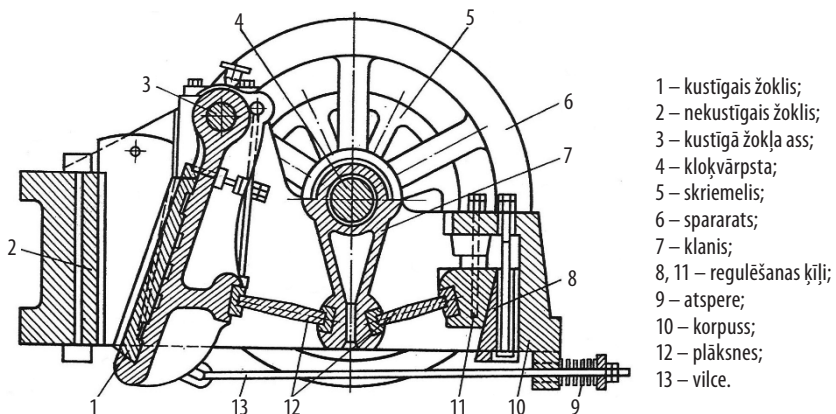


6.5. att. Žokļu drupinātāju ar augšējo atbalstu vienkāršas (a) un saliktas (b) žokļa kustības principiālās shēmas.

gas platums, kas rada dažāda izmēra sadrupinātā materiāla gabalus. Lai šo trūkumu novērstu, ir izveidotas drupinātāju konstrukcijas ar apakšējo atbalstu, kurās izlādes spraugas platums darba laikā nemainās. Ar šādas konstrukcijas drupinātājiem iegūst vienmērīgi sasmalcinātu materiālu. Šo konstrukciju trūkums ir iespējamā apakšējās darba telpas aizsērēšana ar sadrupināto materiālu.

6.6. attēlā redzams žokļu drupinātājs ar vienkāršu žokļu kustību. Čuguna vai tērauda korpusā atrodas kustīgā (1) un nekustīgā (2) plāksne jeb žoklis.

Kustīgais žoklis brīvi kustas uz augšējās atbalsta ass (3), to kustina kloķvārpsta (4). Uz vārpstas ekscentra piestiprināts vertikāls klanis (7), kas ar plāksnēm (12) ir savienots ar kustīgo žokli. Griežot kloķvārpstu, klanis pārvietojas augšup un lejup, kustīgais žoklis tuvojas nekustīgajam un attālinās no tā. Nospriegojumu kustīgajā sistēmā (žoklis, plāksnes, klanis) un kustīgā žokļa atpakaļkustību pa labi nodrošina ar vilci (13) un atsperi (9). Kustīgajam žoklim tuvojoties nekustīgajam žoklim, starp tiem esošo materiālu saspiež, un tas sadrup. Kustīgajam žoklim attālinoties, sadrupinātais materiāls tiek izvadīts caur apakšējo spraugu. Mainot ķīļu (8, 11) stāvokli ar skrūvēm, iespējams regulēt izlādes spraugas platumu un līdz ar to arī materiāla smalcināšanas pakāpi. Drupināšanas laikā dzinējam rodas nevienmērīga slodze. Slodzes izlīdzināšanai uz vārpstas ir piestiprināti divi spararati (6), kas akumulē enerģiju tukšajā gājiēnā un atdod to, drupinot materiālu.



6.6. att. Žokļu drupinātājs ar vienkāršu žokļa kustību.

Žokļu drupinātājs ar saliktu žokļu kustību parādīts 6.7. attēlā. Šajā gadījumā kustīgais žoklis (3) vienlaicīgi darbojas kā klanis, kas ir nostiprināts gultņos uz ekscentriskas vārpstas (4).

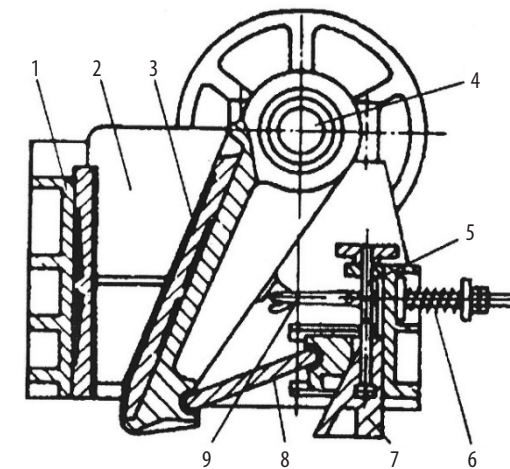
Apakšējā daļā kustīgais žoklis balstās uz plāksnes (8). Kinemātisko sasaisti starp kustīgajām daļām nodrošina atspere (6), kas nospiegto sistēmu caur vilci (9). Spararata griešanās virzienu izvēlas pretēji pulksteņa rādītāju kustības virzienam, lai drupināšanas laikā žoklis kustētos pa kreisi un leju, tā veicinot sadrupinātā produkta izkrašanu un palielinot iekārtas ražību. Tajā pašā laikā kustīgā žokļa kustības kinemātika izsauc drupināmā materiāla papildu beršanu, vienlaicīgi notiek arī drupinošo plākšņu intensīvāka dilšana.

No tehnoloģiskā viedokļa žokļu drupinātājus raksturo ar satveres leņķi, vārpstas apgrieziena skaitu, nepieciešamo jaudu un ražību.

Satveres leņķis. Par satveres leņķi (α) sauc leņķi starp kustīgo un nekustīgo žokli, tiem atrodoties tuvākajā iespējamā stāvoklī (6.8. att.).

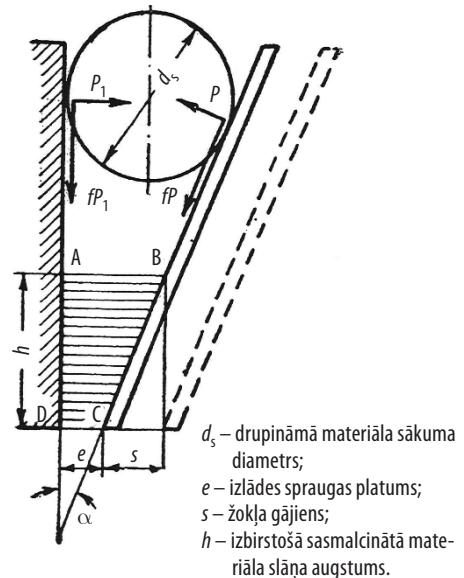
Uz drupināmo materiālu iekārtā darbojas žokļu spiedienu (P_1 un P) un berzes spēki (fP_1 un fP), kur f – slīdes berzes koeficients starp drupināmo gabalu un žokli. Ja koordinātu sākuma punkts ir smalcināmā gabala centrā, tad spēku projekcijas uz horizontālās un vertikālās ass ir:

$$P_1 - P \cos \alpha - fP \sin \alpha = 0. \quad (6.18.)$$



- | | |
|-------------------------|--------------|
| 1 – nekustīgais žoklis; | 6 – atspere; |
| 2 – sānu plāksne; | 7 – ķīļi; |
| 3 – kustīgais žoklis; | 8 – plāksne; |
| 4 – kloķvārpsta; | 9 – vilce. |
| 5 – regulēšanas skrūve; | |

6.7. att. Žokļu drupinātājs ar saliktu žokļu kustību.



- d_5 – drupināmā materiāla sākuma diametrs;
 e – izlādes spraugas platums;
 s – žokļa gājiens;
 h – izbirstošā sasmalcinātā materiāla slāņa augstums.

6.8. att. Shēma žokļu drupinātāja tehnoloģisko parametru noteikšanai.

$$P \sin \alpha - fP \cos \alpha - fP_1 = 0. \quad (6.19.)$$

No (6.18.) vienādojuma izsakot P_1 un ievietojot (6.19.) vienādojumā, kā arī veicot attiecīgos pārveidojumus, iegūst:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2f}{1-f^2}.$$

No mehānikas zināms, ka slīdes berzes koeficients ir vienāds ar berzes leņķa φ ($f = \operatorname{tg} \varphi$), līdz ar to:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2 \operatorname{tg} \varphi}{1 - \operatorname{tg}^2 \varphi} = \operatorname{tg} 2\varphi, \quad (6.20.)$$

jeb $\alpha = 2\varphi$.

Praksē parasti pieņem, ka $\alpha < 2\varphi$, jo pretējā gadījumā ir iespējama smalcināmā materiāla izspiešana no drupinātāja žokļiem, tiem satuvinoties. Parasti žokļu drupinātajos $\alpha \leq 15-25^\circ$.

Kloķvārpstas apgriezienu skaits. Kustīgajam žoklim attālinoties no nekustīgā (6.8. att.), smaguma spēka ietekmē no drupinātāja izbirst sasmalcinātais materiāls prizmas ABCD veidā, kuras augstums ir $h = S/(\operatorname{tg} \alpha)$.

Kloķvārpstai vienreiz apgriežoties, kustīgais žoklis vienreiz tuvojas nekustīgajam žoklim un vienreiz attālinās no tā. Laiks, kad kustīgais žoklis atgriežas savā vietā, ir vienāds ar vārpstas pusapgrieziena laiku:

$$\tau = \frac{1}{2} \cdot \frac{60}{n} = \frac{30}{n}, \text{ sek.}, \quad (6.21.)$$

kur n – apgriezienu skaits minūtē.

Ievērojot ķermeņu brīvās krišanas likumu, laikā (τ) sasmalcinātais materiāls prizmas veidā veiks ceļu:

$$h = \frac{g \cdot \tau^2}{2} = \frac{g}{2} \cdot \left(\frac{30}{n} \right)^2 = \frac{450g}{n^2}.$$

Materiāls brīvi izbirs no drupinātāja pie nosacījuma, ka:

$$\frac{S}{\operatorname{tg} \alpha} \leq \frac{450g}{n^2},$$

līdz ar to kloķvārpstas apgriezienu skaits, kas atbilst vislielākajai ražībai, ir:

$$n \leq \sqrt{\frac{450g \operatorname{tg} \alpha}{S}}$$

vai

$$n \leq 66,5 \sqrt{\frac{\operatorname{tg} \alpha}{S}}, \text{ apgr./min.} \quad (6.22.)$$

Drupinātāja ražība. Pieņemot, ka vidēji $\alpha = 22^\circ$ ($\operatorname{tg} \alpha \approx 0,4$), žokļu drupinātāja teorētisko ražību var aprēķināt:

$$G = 0,15 \mu d_{\text{vid.}} \cdot S \cdot b \cdot n \cdot \rho, \text{ t/h,} \quad (6.23.)$$

kur μ – drupināmā materiāla irdenuma koeficients ($\mu = 0,2 \div 0,65$, vidēji 0,4);

$d_{\text{vid.}}$ – sadrupinātā materiāla vidējais gabalu diametrs, m;

S – žokļa gājiens, m;

b – žokļa apakšējā daļas garums, m;

n – vārpstas apgriezienu skaits minūtē;

ρ – materiāla blīvums, kg/m^3 .

6.

Drupinātāja dzinēja jauda. Kā tika apskatīts iepriekš (6.1. nodaļa), drupinātāju enerģijas patēriņš ir atkarīgs no daudziem faktoriem, tāpēc neeksistē viena matemātiska formula jaudas noteikšanai un bieži aptuvenai jaudas noteikšanai izmanto empīriskas formulas. Piemēram, žokļu drupinātājiem ar vienkāršu žokļu kustību var piemērot šādu vienādojumu:

$$N = c \cdot A \cdot B, \text{ kW,} \quad (6.24.)$$

kur A, B – iekraušanas atveres platums un garums, cm;

c – koeficients, kas atkarīgs no iekraušanas atveres izmēriem ($AB < 25 \times 40$, $c = 1/60$; no 25×40 līdz 90×120 , $c = 1/100$; $AB > 90 \times 120$, $c = 1/120$).

Uzstādītai dzinēja jaudai jābūt par 50 % lielākai nekā aprēķinātā.

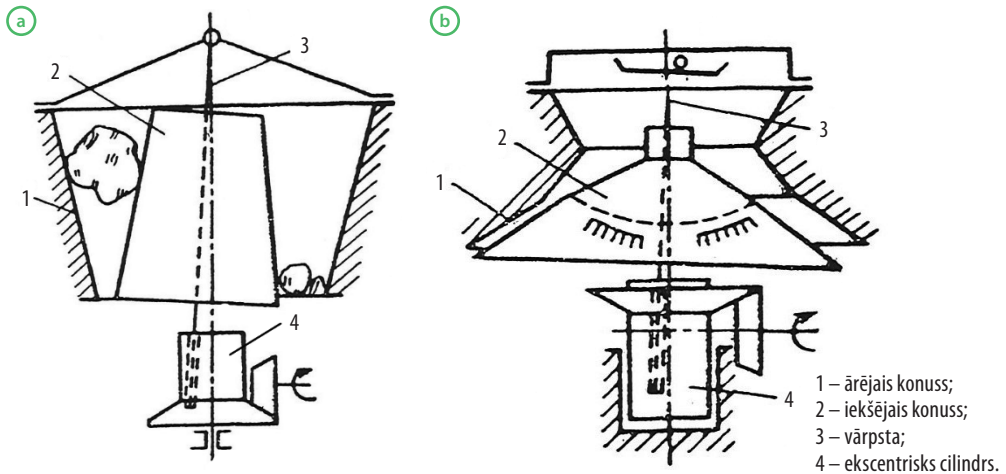
Žokļu drupinātājus parasti raksturo ar augšējiem žokļa izmēriem (iekraušanas atveres izmēriem), kuri rūpnieciski ražotām iekārtām ir no 150×250 mm līdz 1500×200 mm. Attiecīgi no 1 t/h līdz 1100 t/h mainās arī ražība un dzinēja jauda – no 5 kW līdz 280 kW.

Žokļu drupinātāju priekšrocības ir: 1) vienkārša un droša konstrukcija; 2) plašas lietošanas iespējas; 3) vienkārša iekārtas apkope. Galvenie trūkumi: 1) periodiska iedarbe uz materiālu; 2) kustīgās masas nav līdzsvarotas, radot papildu troksni, triecienus, vibrāciju.

6.2.2. Koniskie drupinātāji

Koniskos drupinātājus lieto rupjai, vidējai un smalkai drupināšanai. 6.9. attēlā redzami dažādu konisko drupinātāju tipu shēmu – rupjās (a) un smalkās (b) drupināšanas – piemēri. Drupinātāju galvenie darba elementi ir divi konusi, kas atrodas viens otrā. Drupināšana notiek, materiālu saspiežot starp konusu virsmām. Ārējais konuss (1) nekustīgi nostiprināts iekārtas korpusā, iekšējais (2) konuss (smalcinošais konuss) stingri piestiprināts uz vārpstas (3), kuras apakšējais gals ievietots ekscentriskā cilindrā (4). Vārpstas ass pret drupinātāja statņa centrālo asi ir slīpa. Kustīgajam konusam ir divas brīvības pakāpes, un darbības laikā tas veic pietiekami sarežģītu kustību. Ekscentriskajam cilindram rotējot, konuss izdara riņķojošu un rotējošu kustību. Šādi griežoties, iekšējais konuss vienā apļa daļā tuvojās nekustīgā konusa virsmai, smalcinot materiālu, kas atrodas starp konusiem. Apļa pretējā pusē tas attālinās no nekustīgā konusa, sasmalcinātais materiāls izbirst par radušos izkraušanas spraugu.

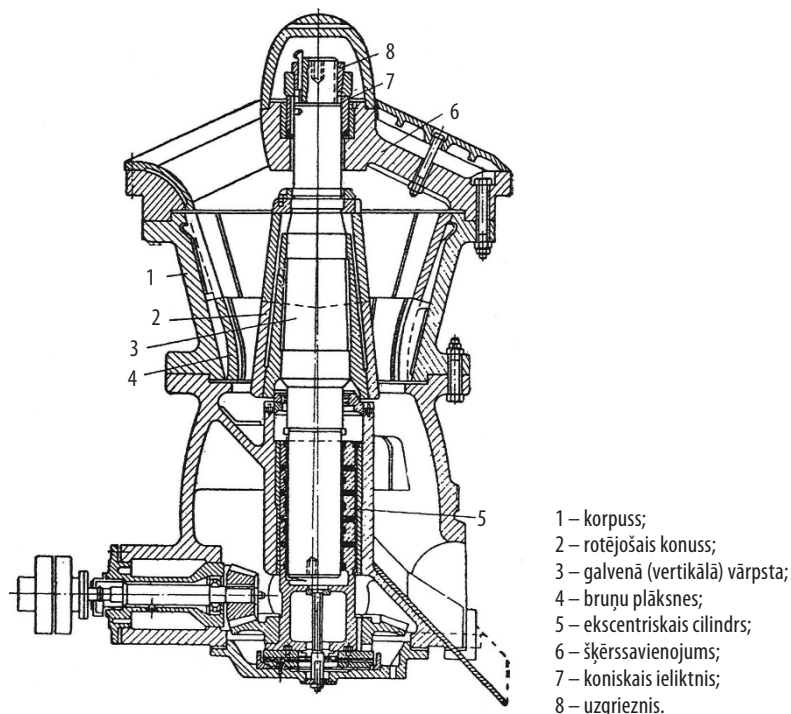
Koniskos drupinātājos, salīdzinot ar žokļu drupinātājiem, smalcināšanas process notiek nepārtraukti. Koniskie drupinātāji ir ražīgāki par žokļu drupinātājiem, tie patērē mazāk enerģijas un tiem nav vajadzīgi masīvi spararati.



6.9. att. Konisko drupinātāju shēmas: (a) – rupjai drupināšanai, (b) – smalkai drupināšanai.

6.10. attēlā parādīts koniskais drupinātājs rupjai drupināšanai. Lieta tērauda korpusā (1) atrodas rotējošs konuss (2), kas stingri nostiprināts uz galvenās vārpstas (3). Augšējais vārpstas gals, izmantojot detaļas (7, 8), pakarināts pie krusteniska šķērssavienojuma (6), kas savukārt balstās uz korpusa (1). Paceļot vai nolaižot centrālo vārpstu ar uzgriezni (8), var regulēt izkraušanas spraugas platumu. Vārpstas apakšējais gals ievietots ekscentriskā cilindrā (5), ko ar zobrata pārvada palīdzību piedzen elektromotors. Tukšgaitā galvenā vārpsta ar smalcinošo konusu negriežas ap savu asi, bet veic apļveida kustības ap ekscentriskā cilindra asi, aptverot konisku virsmu ar 8–12 grādu leņķi virsotnē. Berzes dēļ drupināšanas procesā iekšējais konuss ar mazāku ātrumu griežas virzienā, kas ir pretējs ekscentra griešanās virzienam. Smalcinošais konuss nepārtraukti iedarbojas uz drupināmo materiālu, kas aizpilda tilpumu starp vidējo konusu (2) un ārējā konusa (1) bruņu plāksnēm (4). Šāda tipa drupinātājos var sasniegt smalcināšanas pakāpi $i = 5-6$.

Koniskie drupinātāji smalkai drupināšanai atšķiras ar korpusa un iekšējā konusa formu (6.9. att.). Iekārtai ir konusveida korpusi (1), kas paplašinās tajā pašā virzienā kā vidējais smalcinošais konuss (2), turklāt to sienīņas noteiktā



- 1 – korpus;
- 2 – rotējošais konuss;
- 3 – galvenā (vertikālā) vārpsta;
- 4 – bruņu plāksnes;
- 5 – ekscentriskais cilindrs;
- 6 – šķērssavienojums;
- 7 – koniskais ieliktnis;
- 8 – uzgrieznis.

6.10. att. Koniskais drupinātājs rupjai drupināšanai.

garumā ir paralēlas. Šāda tipa drupinātājos var sasniegt lielāku ražību un smalcināšanas pakāpi ($i = 10-30$), iekraušanas spraugas platums ir no 35 mm līdz 130 mm.

Aprēķināmie tehnoloģiskie parametri koniskiem drupinātājiem ir tādi paši.

Satveres leņķis. Sakarības starp spēkiem, kas darbojas uz materiālu koniskā drupinātājā, ir tādas pašas kā žokļu drupinātājos. Arī koniskos drupinātājos satveres leņķim jābūt mazākam par diviem berzes leņķiem (6.11. att.):

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \leq 2\varphi, \quad (6.25.)$$

kur φ – materiāla berzes leņķis.

Parasti pieņem, ka $\alpha = 21-23^\circ$.

Optimālais vārpstas apgriezienu skaits. Apgriezienu skaitu (min^{-1}), kas atbilst vislielākajai drupinātāja ražībai, nosaka ar formulu:

$$n = 47 \sqrt{\frac{\text{tg}\alpha_1 + \text{tg}\alpha_2}{r}}, \text{ apgr./min}, \quad (6.26.)$$

kur r – galvenās vārpstas ekscentritāte kustīgā konusa apakšējā līmenī, m.

$$r = \frac{S}{2} \quad (S - \text{konusa gājiens, m}).$$

Ražība. Pamatojoties uz norādīto satveres leņķa vērtību, ar pietiekamu precizitāti var pieņemt, ka $\text{tg}\alpha_1 + \text{tg}\alpha_2 = 0,45$. Šādā gadījumā drupinātāja ražība t/h ir:

$$G = 0,755\mu\rho \cdot nDrd_{\text{vid}}, \text{ t/h}, \quad (6.27.)$$

kur μ – materiāla irdenuma koeficients;

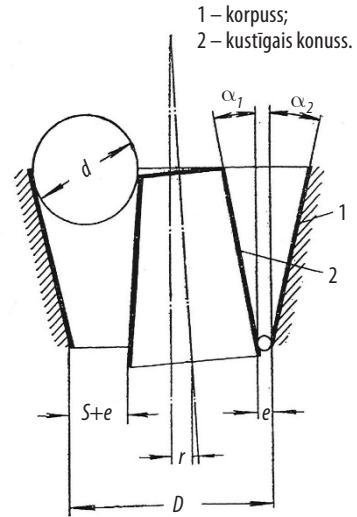
ρ – materiāla blīvums, kg/m^3 ;

n – vārpstas apgriezienu skaits minūtē;

D – koniskā korpusa apakšējais diametrs, cm;

r – galvenā vārsta ekscentritāte (parasti pieņem $r = 0,005-0,020$ m);

d_{vid} – sadrupinātā materiāla vidējais gabalu diametrs, cm, $d_{\text{vid}} = \frac{2l + S}{2}$.



6.11. att. Shēma konisko drupinātāju aprēķinam.

Patērētā jauda. Patērēto jaudu koniskos drupinātājos, kā atzīmēts iepriekš, iegūst, izmantojot empīrisku pieeju. Aptuveniem aprēķiniem var lietot formulu:

$$N = 85 \cdot D^2, \text{ kW}, \quad (6.28.)$$

kur D – ārējā konusa apakšējais diametrs, m.

6.2.3. Veltņu drupinātāji

Veltņu drupinātājus izmanto vidējai un smalkai drupināšanai, kā arī malšanai. Materiāls tiek smalcināts starp diviem paralēli novietotiem veltņiem, kas ar vienādu ātrumu griežas pretējos virzienos, to saspiežot.

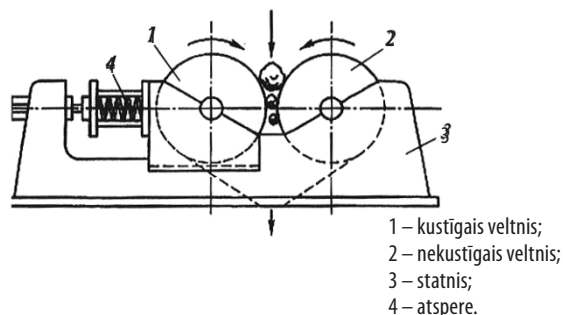
Veltņu drupinātāji (6.12. att.) sastāv no statnes (3) un diviem veltņiem (1 un 2). Veltņa (2) gultņi nekustīgi iestiprināti drupinātāja statnī, bet veltnis (1) nostiprināts kustīgos gultņos un var pārvietoties. Veltni (1) noteiktā stāvoklī notur atsperē (4).

Gadījumā, kad starp veltņiem iekļūst ciets, nesasmalcināms priekšmets, atsperes tiek saspīestas, veltnis pārvietojas pa kreisi, sprauga starp veltņiem palielinās un nesasmalcinātais materiāls izkrīt starp veltņiem.

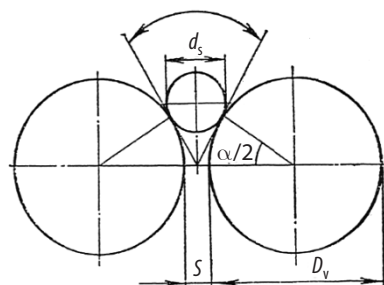
Veltņus gatavo ar gludu, riervainu vai zobainu virsmu. Gludus veltņus lieto vidējai un smalkai smalcināšanai, vidējais smalcināmā materiāla gabalu izmērs ir mazāks par $0,05D$. Lai smalcinātu vidēji stiprus, trauslus materiālus, izmanto veltņus ar zobainu virsmu. Šajā gadījumā materiāls tiek skaldīts, laužts un spiests. Vidējais starp valčiem satveramo gabalu izmērs var sasniegt $0,25D$.

Vienreizēja materiāla saspiešana starp veltņiem ļauj iegūt ne pārāk sasmalcinātu produktu.

Lai nodrošinātu materiāla ievilkšanu starp veltņiem, tāpat kā iepriekšējos gadījumos, satveres leņķim jābūt mazākam par diviem berzes leņķiem (6.13. att.):



6.12. att. Veltņu drupinātāju shēma.



6.13. att. Veltņu drupinātāju tehnoloģiskie parametri.

$$\alpha \leq 2\varphi.$$

Starp veltņa diametru (D_v), maksimālo materiāla gabala izmēru (d_s), satveres leņķi un izejas spraugas platumu (S) ir šāda sakarība:

$$D_v = \frac{d_s \cdot \cos \frac{\alpha}{2} - S}{1 - \cos \frac{\alpha}{2}}, \text{ m} \quad (6.29.)$$

Daudziem materiāliem slīdes berzes koeficients pret veltņi ir $f \approx 0,3$, līdz ar to berzes leņķis $\varphi \approx 17^\circ$. Pieņemot, ka vidējā smalcināšanas pakāpe veltņu drupinātājos ir $i = 4$, varam secināt, ka $S = d_s/4$. Tā kā $\alpha \leq 2\varphi$, var pieņemt, ka $\alpha \approx 30^\circ$, tas ir:

$$\cos \alpha/2 = \cos 15^\circ = 0,966$$

un nepieciešamais veltņa diametrs ir:

$$D_v = \frac{0,966d_s - 0,25d_s}{1 - 0,966} \approx 21d_s.$$

Tātad veltņu diametram jābūt vismaz 20 reizes lielākam par smalcināmo gabalu vidējo izmēru.

Lai nepieļautu materiāla izslīdēšanu pa veltņu virsmu, bet nodrošinātu tā iekraušanu starp tiem, pēdējiem jārotē ar noteiktu apgriezīenu skaitu, ko var aprēķināt šādi:

$$n = 616 \sqrt{\frac{f}{\rho \cdot d_s D_v}}, \text{ apgr./min}, \quad (6.30.)$$

kur f – slīdes berzes koeficients ($f \approx 0,3$);

ρ – materiāla blīvums, kg/m^3 .

Veltņu aploces ātrums parasti ir robežās no 3 m/s līdz 6 m/s. Veltņu drupinātāju teorētisko ražību var noteikt šādi:

$$G = 0,2\mu \cdot \rho \cdot L D_v \cdot S \cdot n, \text{ t/h}, \quad (6.31.)$$

kur μ – smalcināmā materiāla irdenuma koeficients (vidēji stipriem materiāliem $\mu = 0,2-0,3$);

L – veltņu garums, m.

Veltņu drupinātāju raksturojošie izmēri ir veltņa diametrs (D_v) un garums (L). Ķīmiskajā rūpniecībā izmanto smalcinātājus ar veltņu izmēriem no $200 \times 125 \text{ mm}$ līdz $1500 \times 600 \text{ mm}$.

6.2.4. Skrejdzirnavas

Šī tipa iekārtās materiāla smalcināšana notiek spiediena darbības un berzes rezultātā. Skrejdzirnavas (6.14. att.) sastāv no pamatnes (5) un diviem dzirnakmeņiem (1), kuri riņķo ap vertikālo vārpstu (4) un rotē ap horizontālām pusasīm (2), it kā skrien pa pamatni (5). Tāpēc radies nosaukums „skrejdzirnavas”.

Materiālu, kas tiek pievadīts uz pamatnes, saspiež ar dzirnakmeņiem (1) un vienlaicīgi berž. Smalcināšanas gaitā materiāls centrālās spēka ietekmē virzās uz perifēriju. Lai tas nonāktu atpakaļ zem dzirnakmeņiem, izmanto speciālus skrāpjus (8).

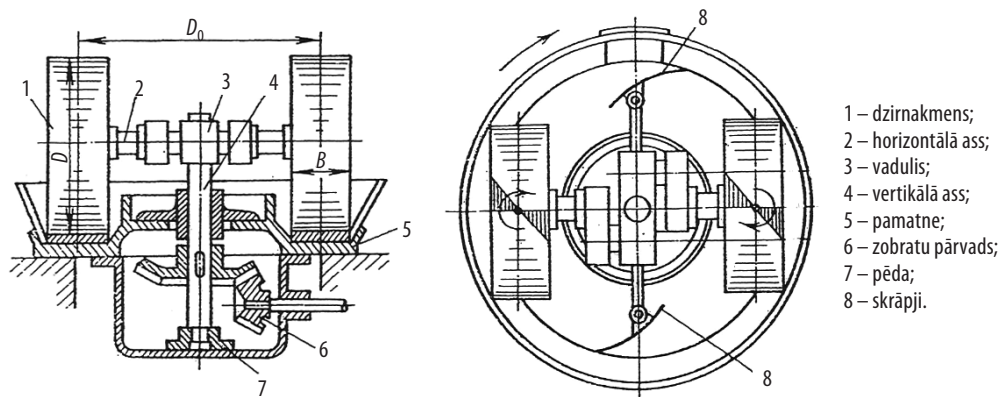
Lai smalcināmais materiāls tiktu ievilkts starp dzirnakmeni un pamatni, satveres leņķim (α) jābūt mazākam par diviem berzes leņķiem φ : $\alpha \leq 2\varphi$. Skrejdzirnavām satveres leņķis parasti ir $\alpha = 25\text{--}30^\circ$. Skrejdzirnavu griešanās ātrums parasti nepārsniedz 10–20 apgr./min.

Dzirnakmeņu diametram jābūt 15–20 reizes lielākam par smalcināmā materiāla vidējo diametru. Skrejdzirnavu teorētisko ražību var noteikt, pieņemot, ka dzirnakmeņi kustoties aiz sevis atstāj irdenu sasmalcinātā materiāla lenti, kuras platums ir B (6.14. att.), bet biezums vienāds ar sasmalcinātā materiāla beigu izmēru d :

$$G = 2 \cdot 60 \cdot \pi \cdot D_0 \cdot n \cdot B \cdot d \cdot \mu \cdot \rho \cdot 10^{-3} = 0,4 D_0 n B d \mu \rho, \text{ t/h}, \quad (6.32.)$$

kur D_0 – attālums starp dzirnakmeņu asīm, m.

Skrejdzirnavas raksturo dzirnakmeņu diametrs (D) un platums (B). Ķīmiskajā tehnoloģijā izmanto skrejdzirnavas ar izmēriem no 600×200 mm līdz 1200×450 mm, to ražība ir 0,5–10 t/h.



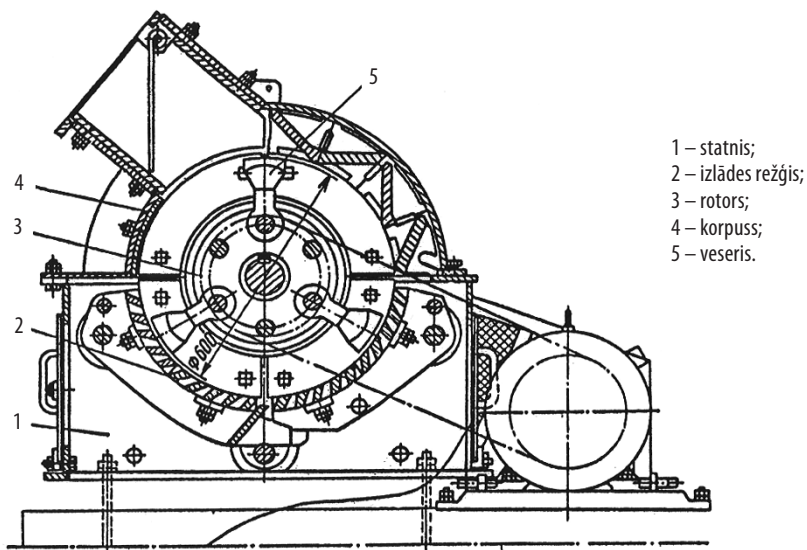
6.14. att. Skrejdzirnavu shēma.

6.2.5. Veseru dzirnavas

Veseru dzirnavas pieder smalcinātājiem, kuru darbības pamatā ir triecieni. Šajās iekārtās smalcinātāji ir veseri, kuri, griežoties slēgtā apvalkā, triecas pret smalcināmo materiālu. Šāda veida mašīnas parasti izmanto sausu un trauslu materiālu smalcināšanai. Viena no veseru dzirnavu konstrukcijām redzama 6.15. attēlā.

Nekustīgā korpusā (4) ievietots rotors (3), kas sastāv no horizontālas vārpstas, uz kuras nostiprināti vairāki diski; attālumu starp tiem fiksē ar diskveida starplikām. Starp diskiem pa perimetru uz apaļām savilcēm brīvi kustas veseri (5). Drupinātāja apakšējā daļā ir novietots izlādes režģis (2), augšējā daļā iekraušanas piltuve, kuru noslēdz kustīgs vārsts.

Smalcināmais materiāls tiek padots caur iekraušanas piltuvi, triecas pret veseriem un vienlaicīgi pret rievotu korpusa sienu, kas aizsargāta ar cietmetāla plāksnēm. Šo triecienu rezultātā materiāls drūp, tiek sasmalcinās un nonāk uz apakšējā režģa. Sasmalcinātā materiāla daļiņu izmēru nosaka režģa caurumu (vai spraugu) izmērs. Jo ātrāk griežas rotors, jo smalkāku produktu iegūst. Smalcināšanas pakāpe parasti ir 10–15, bet sasmalcinātā produkta izmēri nav mazāki par 3 mm. Rotora diametrs veseru drupinātājos ir robežās no 600 mm līdz 1500 mm, garums mainās no 450 mm līdz 1400 mm.



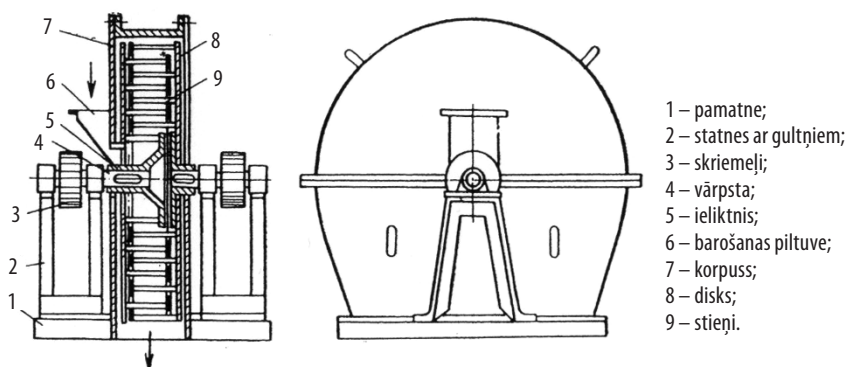
6.15. att. Veseru dzirnavu shēma.

6.2.6. Dezintegratori

Dezintegratori pieder pie smalcināšanas iekārtām, kurās tiek realizēts brīva sitiena jeb trieciena princips. Dezintegrators (6.16. att.) sastāv no diviem dažādos virzienos rotējošiem diskiem (8). Katrs disks ir nostiprināts uz savas vārpstas (4). Uz diskiem pa koncentriskiem apļiem piestiprināti cietmetāla stieņi (9). Viena diska stieņu rindas atrodas starp otra diska stieņu rindām. Attālums starp stieņiem katrā rindā, attālinoties no centra, samazinās.

Smalcināmo materiālu pievada pa piltuvi (6), tas nokļūst disku centrālajā daļā starp stieņiem, kas ar lielu ātrumu griežas viens otram pretī. Pārvietojoties no centra uz perifēriju, materiāls daudzkārt triecas pret stieņiem, kā rezultātā notiek intensīva materiāla smalcināšana. Jo lielāks ir griešanās ātrums, jo augstāka ir smalcināšanas pakāpe, parasti tā ir robežās no 10 līdz 40.

Atkarībā no dezintegratora lieluma uz viena diska novieto 2–4 stieņu rindas, tātad uz diviem diskiem ir 4–8 stieņu rindas. Rūpnieciskiem dezintegratoriem diska diametrs parasti ir robežās no 600 mm līdz 1250 mm, griešanās ātrums – no 500 apgr./min līdz 2000 apgr./min. Dezintegratoru konstrukcijas vājākā vieta ir stieņi, kas salīdzinoši ātri nodilst, un to nomaiņa ir darbietilpīgs process. Tāpēc dezintegratorus parasti lieto samērā mīkstu un trauslu materiālu, piemēram, kaolīna, krīta u. c., smalcināšanai.



6.16. att. Dezintegrators.

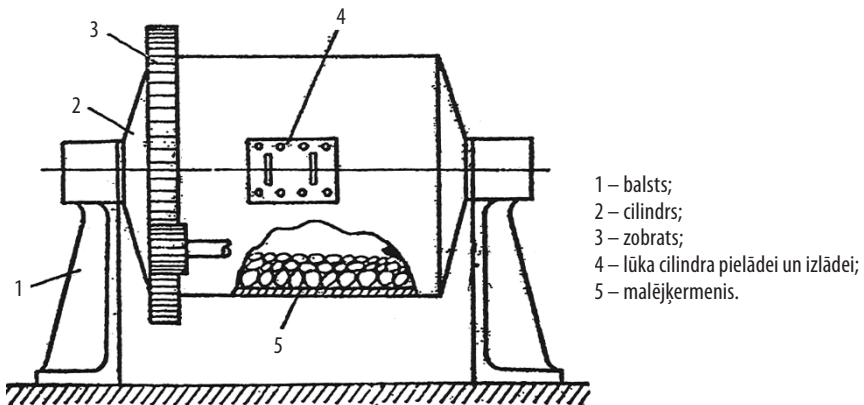
6.2.7. Ložu dzirnavas

Smalkai smalcināšanai no visām iekārtām visplašāk lieto tieši ložu dzirnavas. Tajās katru gadu tiek samalti desmitiem miljonu tonnu ķīmiskai rūpniecībai nepieciešamo izejvielu un citu materiālu. Materiāls tiek smalcināts trieciena un berzes rezultātā. Šo dzirnavu galvenie darba elementi ir ar bruņu plāksnēm izklāts cilindrs, kas daļēji piepildīts ar malējķermeņiem – lodēm no tērauda, porcelāna, krama vai tērauda stienīšiem.

6.17. attēlā redzamas periodiskas darbības ložu dzirnavas. Cilindrā (2) iepildīti malējķermeņi (5), smalcināmo materiālu cilindrā ievada pa lūku (4).

Malējķermeņus ievada 30–35 % no cilindra tilpuma. Cilindrs novietots balstos (1) uz vārpstām. Dzirnavas darbina elektromotors ar zobrata (3) pārvadu.

Cilindram rotējot, attīstās centrālās spēks, kas spiež lodes pie cilindra sienas un ceļ augšup. Sasniedzot noteiktu augstumu, lodes krīt lejup un triecas pret maļamo materiālu. Cilindra apakšējā daļā, lodēm rotējot, papildus notiek materiāla spiešana un beršana. Smalcināšanas pakāpe ložu dzirnavās sasniedz $i = 50-100$. Sasmalcināto materiālu no dzirnavām tāpat periodiski izvada caur lūku (4). Iekārtās ar nelielu ražību bieži apvieno materiālu smalcināšanu ar citiem fizikāliem vai ķīmiskiem procesiem. Smalcināšana var notikt sausā un mitrā veidā.



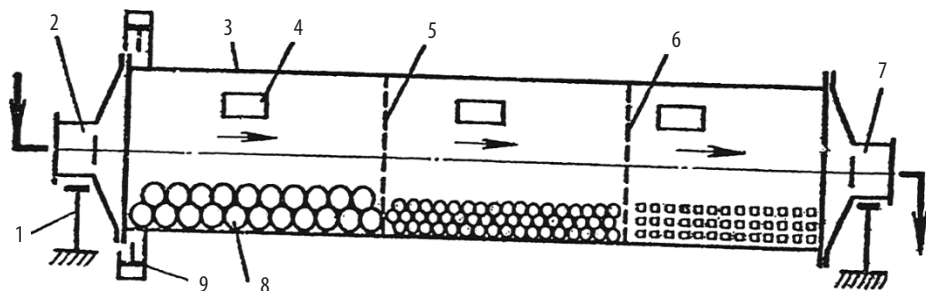
6.17. att. Periodiskas darbības ložu dzirnavas.

Lai realizētu smalko malšanu un iegūtu materiālu ar nepieciešamo izmēru bez papildu separēšanas ierīcēm, izmanto daudzkameru (cauruļu) ložu dzirnavas, kas darbojas nepārtraukti (6.18. att.).

Cauruļu dzirnavās diametra un garuma attiecība ir no 1/2 līdz 1/5 un vairāk. Cilindriskais korpuss (3) ar caurumotām šķērssienām tiek sadalīts vairākās (3–5) kamerās, kurās pa lūkām (4) iepilda dažāda izmēra malējķermeņus. Malējķermeņi nevar nokļūt no kameras kamerā. No vienas kameras uz otru pārvietojas tikai noteikta izmēra materiāls. Dzirnavu cilindrs abos galos balstās uz dobtām vārpstām (2, 7). Dzirnavas un zobrata pārvadu darbina elektromotors. Smalcināmo materiālu ievada pa kreiso dzirnavu galu, bet sasmalcināto produktu izvada pa pretējo galu. Maluma smalkumu nosaka materiāla uzturēšanās laiks dzirnavās. Papildu dzirnavās var ievadīt gaisu. Gaisa plūsmas ātrums ir tāds, ka aizrauj līdzīgu smalko frakciju arī no iepriekšējām kamerām. Tātad nenotiek nevajadzīga materiāla papildu smalcināšana.

Vienkameras ložu dzirnavu diametrs var sasniegt 3800 mm, garums attiecīgi – 5500 mm. Cilindriskām ložu dzirnavām cilindra garuma attiecība pret diametru parasti ir $L:D = 0,8-2,0$. Iekārtām, kas paredzētas smalkai malšanai, šī attiecība parasti ir 1,5–1,6.

Lai nodrošinātu malējķermeņu atbilstīgu darbību, dzirnavās jāpasniedz noteikts cilindra apgriezīgu skaits. Liela apgriezīgu skaita gadījumā lodes centrālās spēka ietekmē tiek piespiestas cilindra korpusam, tās nekrīt un neveic lietderīgo smalcināšanas darbu. Savukārt, ja cilindra apgriezīgu skaits nav pietiekams, lodes nepaceļas pietiekamā augstumā, efektīva smalcināšana nenotiek. Lai noteiktu nepieciešamo cilindra apgriezīgu skaitu, aplūkosim spēkus, kas darbojas uz malējķermeņi (6.19. att.).



- | | |
|--------------------------------------|--|
| 1 – balsts; | 5, 6 – caurumota šķērssiena; |
| 2 – dobtā vārpsta materiāla ievadei; | 7 – dobtā vārpsta materiāla izvadišanai; |
| 3 – cilindrs; | 8 – malējķermeņi; |
| 4 – lūka; | 9 – zobrata pārvads. |

6.18. att. Cauruļu dzirnavu shēma.

Uz lodi dzirnavās, kas berzes dēļ paceļas gar sienu, darbojas centrālās spēks (P) un lodes svars (G). Ja lodes masa ir m , rotācijas rādiuss R , leņķiskais ātrums ω , apgriezību skaits minūtē n , centrālās spēks, kas darbojas uz lodi, ir:

$$P = m\omega^2 R = m(2\pi n)^2 R = m\left(\frac{\pi n}{30}\right)^2 R. \quad (6.33.)$$

Pieņem, ka lodes un cilindra kustības ātrums ir vienāds un R vienāds ar cilindra iekšējo rādiusu.

Lodes smaguma spēks (svars) ir:

$$G = m \cdot g.$$

6.19. attēlā parādīta lode tās augstākajā punktā, pēc kura tai ir jāatrujas no cilindra sienas un brīvi jākrīt, veidojot leņķi (α) ar horizontu (skat. lidojuma trajektoriju 6.19. att.). Leņķi (α), kādā lode ir pacelta šajā momentā, var noteikt, aprēķinot spēku projekcijas uz vertikālo asi:

$$P \cos \alpha = m \cdot g.$$

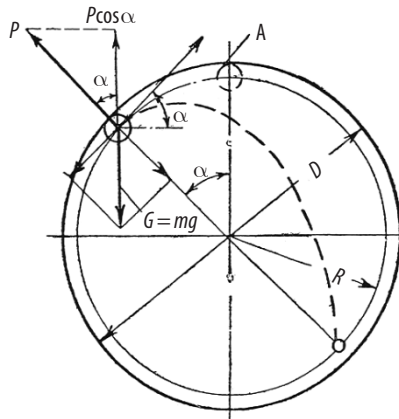
no kurienes:

$$\cos \alpha = \frac{mg}{P} = \frac{mg}{m\left(\frac{\pi n}{30}\right)^2 R} \approx \frac{900}{n^2 R}.$$

vai

$$\cos \alpha \approx \frac{1800}{n^2 D},$$

kur D – cilindra iekšējais diametrs, m.



6.19. att. Spēku shēma, kas darbojas uz lodi cilindriskās ložu dzirnavās.

Lode nevarēs atrauties no cilindra sienas, ja tā sasniegs punktu A (6.19. att.), šajā gadījumā $\alpha = 0$ un $\cos\alpha = 1$. Šāda situācija veidojas, ja tiek sasniegts „kritiskais” griešanās ātrums. Šajā gadījumā

$$1 = \frac{1800}{n_{kr}^2 \cdot D},$$

no kurienes:

$$n_{kr} = \sqrt{\frac{1800}{D}} = \frac{42,4}{\sqrt{D}}, \text{ apgr./min.} \quad (6.34.)$$

Ja apgriezību skaits ir lielāks par n_{kr} , centrālās spēks ir lielāks par smaguma spēku un lode neatraujas no cilindra sienas, tas ir, nenotiek normāla ložu dzirnavu darbība, par optimālo dzirnavu griešanās ātrumu parasti pieņem 75 % no n_{kr} :

$$n = \frac{32}{\sqrt{D}}, \text{ apgr./min.} \quad (6.35.)$$

Ložu dzirnavu ražību teorētiski nevar aprēķināt, orientējoši to nosaka atkarībā no galaprodukta izmēriem:

$$Q = k \cdot L \cdot D^{2,6}, \text{ t/n,} \quad (6.36.)$$

kur k – koeficients, kas atkarīgs no maļamā materiāla sākuma un beigu izmēra.

Ložu dzirnavu jaudu orientējoši var noteikt šādi:

$$N = 6,1m_z \cdot \sqrt{D}, \text{ kW,} \quad (6.37.)$$

kur m_z – ložu masa, t;

D – cilindra iekšējais diametrs, m.

6.2.8. Planetārās dzirnavas

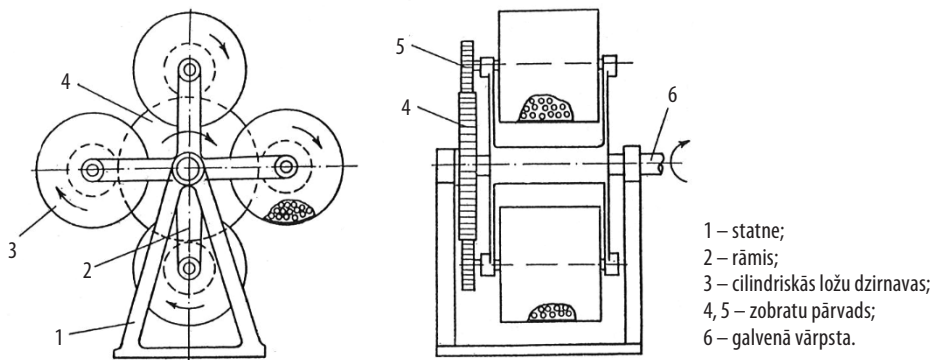
Planetārās dzirnavas arī pieder pie triecienu-berzes darbības smalcinātājiem. Tās sastāv no vairākām nelielām cilindriskām ložu dzirnavām (6.20. att.).

Cilindriskās dzirnavas (3) iemontētas rāmī (2). Uz katras dzirnavas ass nostiprināti zobrati (5), kas ir sazobē ar nekustīgi nostiprinātu zobratu (4). Rāmim (2) stiprināts uz vārpstas (6). Rāmim griežoties, cilindriskās dzirnavas rotē ap tā asi un vienlaicīgi ap savām asīm. Cilindros esošie malējķermeņi, veicot ļoti sarežģītu kustību un saduroties cits ar citu un cilindra sienām, smalcina materiālu.

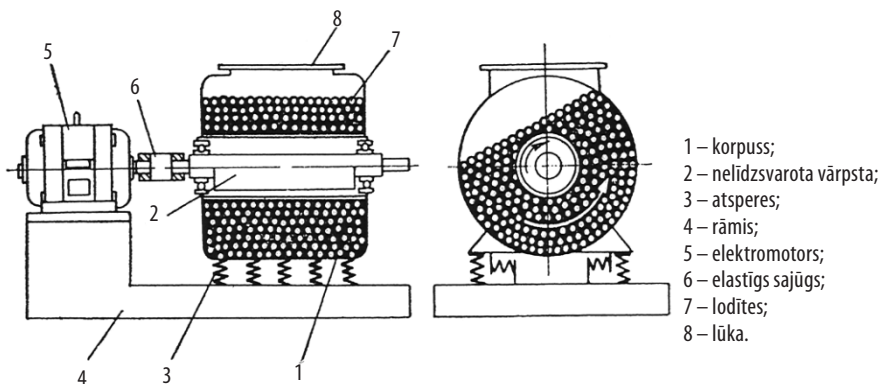
6.2.9. Vibrāciju dzirnavas

Vibrāciju dzirnavās tiek izmantots trieciena-berzes materiālu smalcināšanas veids. Augstas frekvences vibrācijas veicina smalcināmā materiālā esošo mikroplaisu paplašināšanos, kas sekmē smalcināšanas procesu. Vibrāciju dzirnavas lieto smalkai malšanai, parasti daļiņu lielums ir no 1–2 mm līdz 1–5 mm. Šādas dzirnavas redzamas 6.21. attēlā.

Vibrāciju dzirnavas sastāv no cilindriska korpusa (1), kur 80–90 % tilpuma aizpilda malējķermeņi (metāliskas lodītes) un smalcināmais materiāls. Korpusa centrā uz gultņiem rotē nelīdzsvarota vārpsta (2), radot korpusa vibrācijas, kas tiek pārnestas uz lodītēm. Vibrējošās lodītes intensīvi triecas cita pret citu un sajaucas, intensīvi smalcinot materiālu. Svārstību frekvence līdzinās elektromotora apgriezību skaitam 1500–3000 apgr./min, bet amplitūda ir 2–4 mm. Dzirnavu korpusa tilpums parasti nav lielāks par 0,5 m³, turklāt elektromotora jauda sasniedz 40 kW.



6.20. att. Planetārās dzirnavas.



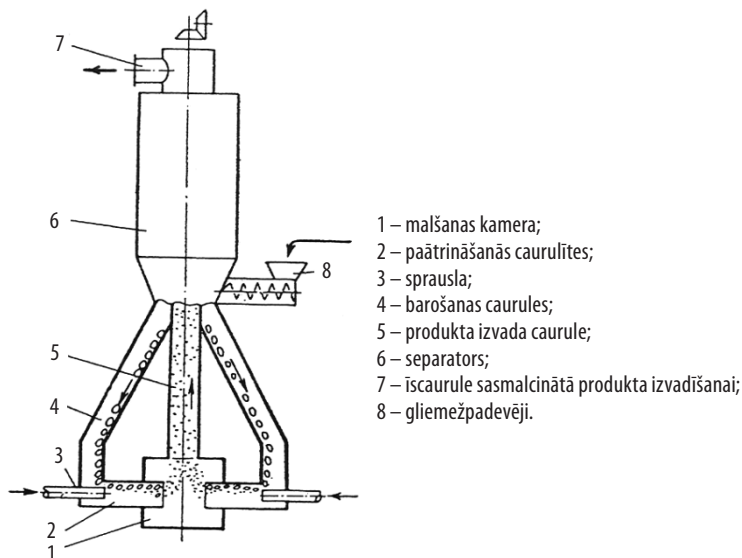
6.21. att. Vibrāciju dzirnavu shēma.

6.2.10. Gāzes strūklas dzirnavas

Realizējot sauso smalcināšanu, bieži par nesēju izmanto gaisu. Materiālus transportējot un separējot, notiek arī smalcināšana. Tā radās doma gāzes strūklas enerģiju izmantot smalcināšanai un radīt gāzes strūklas smalcinātājus. Strūklas dzirnavas atšķiras no iepriekš apskatītajām konstrukcijām ar to, ka tām nav ne malējķermeņu, ne rotējošu daļu. Malšanu realizē, triecot smalcināmā materiāla daļiņas citu pret citu. Eksistē virkne dzirnavu modifikāciju, apskatīsim vienu no tām. 6.22. attēlā redzamas pretplūsmas divstrūklu dzirnavas ar augšējo produkta izvadu un vienu separācijas pakāpi.

Dzirnavas sastāv no malšanas kameras (1), kurā viena pret otru novietotas paātrināšanās caurulītes (2). Caurulītēm pievienotas barošanas caurules (4), pa kurām padod smalcināmo materiālu. Pa sprauslām (3) pievada energonesēju, šajā gadījumā – gaisu, kas smalcināma materiāla daļiņas rauj sev līdzī un malšanas kamerā triec citu pret citu. Sasmalcinātais materiāls ar gaisa plūsmu tiek izvadīts pa izvada cauruli (5) separatorā (6), kurā notiek tā sadalīšana divās frakcijās. Rupjā frakcija nosēžas kameras apakšā un pa barošanas caurulēm vēlreiz nokļūst kamerā (1) papildu smalcināšanai. Smalka frakcija ar gaisa plūsmu tiek izvadīta pa īscauruli (7).

Pretplūsmas smalcinātāju parasti izmanto cietu materiālu smalcināšanai ar sākuma daļiņu izmēru līdz 10 mm, bet galaprodukta izmēri ir no 50 μm līdz 80 μm. Šāda tipa iekārtās vienlaicīgi ar smalcināšanu var arī sajaukt dažādus pulverus.



6.22. att. Pretplūsmas divstrūklu dzirnavu shēma.

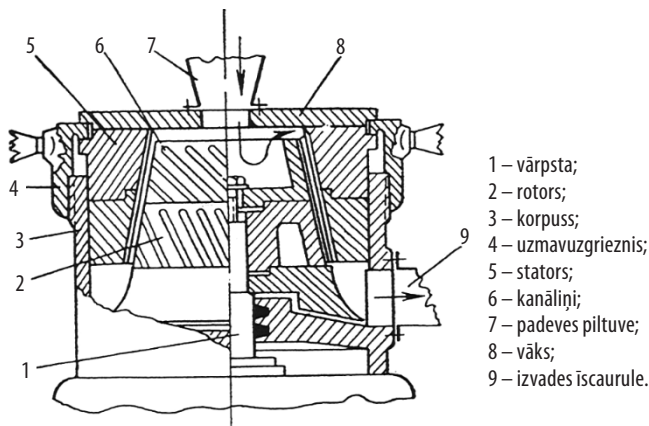
6.2.11. Koloīdās dzirnavas

Par koloīdo sauc tādu smalcināšanu, kuras rezultātā iegūst produktu, kura daļiņu izmērs ir mazāks par $1\ \mu\text{m}$. Koloīdā malšana parasti notiek slapjā veidā. Cietās un šķidrās fāzes attiecība atkarībā no materiāla mainās no 1:2 līdz 1:6. Dispersijas vide nepieciešama, lai daļiņas nesalīptu, kas var notikt, ja iegūto daļiņu izmērs ir tuvs koloīdam. Koloīdās sistēmās cietās fāzes daļiņu izmērs var būt $0,1\text{--}0,001\ \mu\text{m}$, bet atšķirībā no istiem šķīdumiem koloīdās sistēmas ir heterogēnas. Savstarpējās mijiedarbības rezultātā, piemēram, *Van der Waals* spēku ietekmē, daļiņas var salīpt, veidot agregātus un sākt izkrist nogulsnēs. Lai stabilizētu šādas koloīdās sistēmas, tām pievieno elektrolītus, kas uz robežvirsmas cietā fāzē šķidrums veido jonu slāņus un hidratētus apvalkus.

Lai realizētu koloīdo smalcināšanu, ir izveidotas dažādas iekārtas. Koloīdā smalcināšana ir ļoti sarežģīts process un teorētiski nav līdz galam izpētīts. Liekā daļa no koloīdās smalcināšanas iekārtām ir laboratorijas mēroga un paredzētas neliela smalcināmā materiāla daudzuma apstrādei. Tikai nedaudzas no koloīdās smalcināšanas iekārtām tiek lietotas rūpnieciskos mērogos.

6.23. attēlā redzamas koniskās koloīdās dzirnavas. Šāda tipa dzirnavas lieto materiālu smalcināšanai laku un krāsu rūpniecībā, ķīmiskajā un pārtikas rūpniecībā.

Galvenie šīs iekārtas elementi ir konisks rotors (2) un stators (5), kas ievietots korpusā (3). Rotors un stators pēc augstuma ir sadalīti vairākās zonās. Uz to virsmas dažādos leņķos ir izveidoti kanāliņi. Atstarpe starp rotoru un statoru ir mazāka par $0,05\ \text{mm}$.



6.23. att. Koniskās koloīdās dzirnavas.

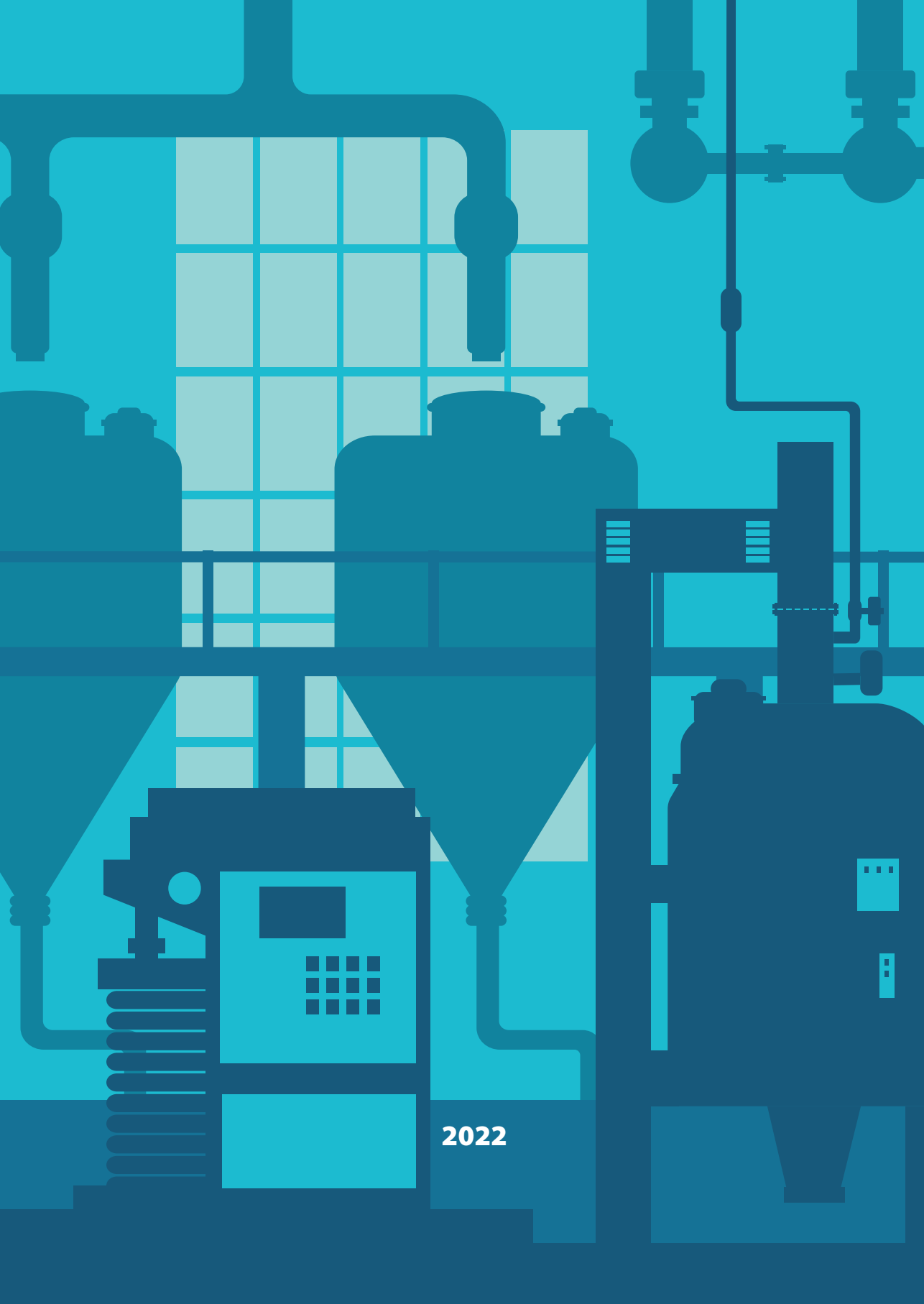
Dzirnavas strādā ar ļoti lielu rotora aploces ātrumu - līdz 125 m/s. Smalcināmais materiāls suspensijas veidā tiek padots pa piltuvi (7) spraugā starp rotoru un statoru. Pārvietojoties šajā spraugā lejup, tas tiek smalcināts starp dažādos virzienos novietotajiem kanāliņiem (6) rotorā un statorā un izvadīts no dzirnavām pa izvades īscauruli (9). Spraugas platumu starp rotoru un statoru var mainīt, pagriežot uznavas uzgriezni (4), tātad zināmās robežās var mainīt smalcināšanas pakāpi un maluma smalkumu. Atkarībā no iekārtas lieluma patērētā jauda mainās robežās no 1,5 kW līdz 30 kW.

Koloīdajās dzirnavās vienā posmā parasti nav iespējams iegūt vajadzīgā smalkuma produktu. Suspensija tiek padota dzirnavās vairākas reizes, cirkulējot slēgtā ciklā, kas sastāv no dzirnavām, tvertnes ar maisītāju, sūkņa un cauruļvadiem. Materiāla suspensija no tvertnes ar sūkņa palīdzību tiek padota uz koloīdām dzirnavām. No dzirnavām ar sūkni suspensiju iesūknē tvertnē, un cikls atkārtojas. Lai iegūtu koloīdu sistēmu, nepieciešamo ciklu skaitu nosaka eksperimentāli, parasti tas svārstās robežās no 5 līdz 8.

PAPILDU LITERATŪRA

1. Osipovs, L. Ķīmijas tehnoloģijas pamatprocesi un aparāti. Rīga:1991. – 680 lpp.
2. Osipovs, L. Ķīmijas tehnoloģijas pamatprocesi un aparāti. 2 daļas, I daļa, Rīga: 1962. – 556. lpp., II daļa, Rīga: 1968. – 413 lpp.
3. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологий. Москва: Химия, 1973. – 752 с.
4. Дытнерский, Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии. Учебник для вузов. Изд. 3-е. В 2-х кн.: Часть 1. Москва: Химия, 2002. – 400 с., Часть 2. Москва: Химия, 2002. – 368 с.
5. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. В 2-х книгах. Под ред. В. Г. Айнштейна, Кн. 1 Москва: Университетская книга; Логос, 2006. – 912 с., Кн. 2 Москва: Университетская книга; Логос, 2006. – 872 с.
6. Воробьева, Г. Я. Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств.- Москва: Химия, 1974. – 816 с.
7. Иванов, Е. А., Шепелев, А. В., Лялин, Е. В. Трубопроводы в химической промышленности. Москва: МАШГИЗ, 1963 – 428 с.
8. Миркин, А. З., Усиньш, В. В. Трубопроводные системы. Справ. Москва: Химия, 1991. – 256 с.
9. Тетеревков, А. И., Печковский, В. В. Оборудование заводов неорганических веществ и основы проектирования. Минск: Вышэйшая школа, 1981. – 335 с.
10. Генкин, А. Э. Оборудование химических заводов. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Высшая школа, 1986. – 280 с.
11. Поникаров, И. И., Перельгин, О. А., Доронин, В. Н., Гайнуллин, М. Г. Машины и аппараты химических производств: Учебник для вузов. Москва: Машиностроение, 1989. – 368 с.
12. Иоффе, И. Л. Проектирование процессов и аппаратов химической технологии. Ленинград: Химия, 1991. – 352 с.
13. Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию. Под ред. Ю. И. Дытнерского. Изд. 2-е. Москва: Химия, 1991. – 496 с.
14. Рогинский, Г. А. Дозирование сыпучих материалов. Москва: Химия, 1978. – 176 с.
15. Борщевский, А. А., Ильин, А. С. Механическое оборудование для производства строительных материалов и изделий. Москва: Высшая школа, 1987. – 364 с.
16. Сиденко, П. М. Измельчение в химической промышленности. Изд. 2-е, перераб. Москва: Химия, 1977. – 368 с.
17. Перов, В. А., Андреев, Е. Е., Биленко, Л. Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Недра, 1990. – 301 с.

18. Zoog, M. Einführung in die Mechnische Verfahrenstechnik, 3. überarbeitete Auflage. B. G. Teubner Stuttgart, 1993. – 269 S.
19. Ignatowitz, E. Chemietechnik, 8. Auflage, Verlag Europa-Lehrmittel, 2007. – 607 s.
20. Perry's chemical engineer's handbook. Edited by Don W. Green, Robert H. Perry. 8th ed. New York: Mc Graw-Hill, 1 vol., 2008, – 2400 pp.
21. Soares, C. Process Engineering Equipment Handbook. McGraw-Hill: New York, 2002. – 1492 pp.
22. Coulson, J. M., Richardson J. F. Chemical engineering. 6th ed. Oxford, Boston Butterworth-Heinemann, vol.1, 2011. – 895 pp.
23. McCabe, W., Smith, C. J., Harriott, P. Unit Operations of Chemical Engineering, 7th ed., Mc Graw Hill, Boston, 2005. – 1140 pp.
24. Stuess, M. Mechanische Verfahrenstechnik 2. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1997. – 407 s.
25. Schwister, K., Leven, V. Verfahrenstechnik für Ingenieure, 2. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig, 2014. – 389. s.



2022