

**MIJEŠANJE**, operacija za smanjivanje ili potpuno uklanjanje nejednolikosti neke mase (npr. razlika sastava, temperature) pokretanjem njenih dijelova jednih prema drugima.

Miješanje uzrokuje narinuta sila, kao što je sila kojom mješalo djeluje na kapljevinu, a odvija se još i pod utjecajem sila koje se opiru toj sili, kao što su sile trenja, inercije, gravitacije, napetosti površine. Izvodljivo je u svim agregatnim stanjima i u različitim njihovim kombinacijama. Otpor je miješanju najslabiji u plinskim sustavima. Najteže je miješanjem homogenizirati sustave vrlo viskozih, žilavih tvari, kao što su plastične mase, gumaste smjese.

Produkti miješanja mogu biti homogeni ili heterogeni. Miješanjem se može postići potpuni homogenitet, tj. mogu se dobiti molekularne disperzije kao produkti, samo u nekim fluidnim sustavima: miješanjem plinova, mješljivih kapljevine, miješanjem pri apsorpciji plinova u kapljevinama. Miješanjem svih ostalih smjesa dobivaju se produkti s osnovnim česticama većih dimenzija i zbog toga heterogeni. Pri miješanju tih sustava, izuzevši miješanje sipkih čvrstih tvari, svugdje je jedna kapljevine kontinualna faza, a čvrsta, plinska ili neka druga kapljevine diskontinualna. Heterogeni produkt miješanja može biti stabilan, kao što su neke emulzije, ili se njegove faze razdvajaju kad se obustavi miješanje.

**Primjena miješanja.** Svrhe miješanja mogu biti različite. Mogu se klasirati, prema agregatnim stanjima sustava koji se miješaju, u četiri skupine: miješanje sustava čvrstih faza, sustava kojima su sve faze kapljevite (miješanje kapljevine), sustava koji sadrže i kapljevite i čvrste faze (suspendiranje miješanjem), sustava od kapljevih i plinskih faza (dispersiranje plinova, u kapljevinama miješanjem).

Miješanje sustava čvrstih faza vrlo se često primjenjuje, npr., u pripremi pigmenta za proizvodnju naliča (miješanje praha različitih pigmenta) a također i smjesa u proizvodnji plastičnih masa.

Miješanje kapljevine najčešće se primjenjuje pri razrjeđivanju smjesa međusobno mješljivih kapljevine, za emulgiranje sustava međusobno nemješljivih kapljevine (v. *Emulgiranje*, TE 5, str. 313), ili za povećavanje njihove mješljive površine pri ekstrakciji (v. *Ekstrakcija*, TE 3, str. 537).

Suspendiranje miješanjem mnogo se upotrebljava za ubrzanje niza procesa, npr. otapanja, kristalizacije, luženja, adsorpcije, kemijskih reakcija između čvrstih i kapljevih faza, katalize (poboljšavanje kontakta čvrstih katalizatora i kapljevih reaktanata).

Dispersiranjem plinova u kapljevinama miješanjem također se ubrzavaju mnogi procesi, npr. apsorpcija plinova (v. *Apsorpcija*, TE 1, str. 324), stvaranje pjena (v. *Pjene i aerosoli*), kemijske reakcije kapljevine s plinovima, npr. hidrogenacija (v. *Hidrogenacija*, TE 6, str. 386), oksidacija zrakom.

Miješanjem se ne samo povećava kontaktna površina faza, nego i njime uzrokovano gibanje kontinualne faze smanjuje debljinu laminarnog sloja na granici faza, pa se i time povećava brzina, odnosno koeficijent prijenosa mase.

Na sličan način miješanje ubrzava i prijenos topline između stijenci odnosno suspendiranih čestica i kontinualne faze kad su njihove temperature različite, jer se smanjivanjem debljine laminarnog sloja povećava i temperaturni gradijent, a time i brzina i koeficijent prijenosa topline.

Miješanjem se mogu i usitnjavati emulgirane i suspendirane čestice, ako su sile smicanja uzrokovane miješanjem, koje djeluju na čestice, veće od sila koje ih drže na okupu.

**Klasifikacija aparature.** Miješanje se izvodi u cijevima i u miješalicama. U cijevima se miješaju uglavnom samo kapljevine s niskim viskozitetom, koje su i lako mješljive. Pri tome je glavno strujanje aksijalno, ali uz njega postoji i radijalna komponenta uzrokovana prirodnim vrtloženjem ili za to namjerno ugrađenim pregradama.

Miješalice se upotrebljavaju za miješanje fluidnih smjesa svih viskoziteta, a i za miješanje čvrstih sipkih materijala. Zbog velike raznolikosti materijala koji se miješaju, velikih razlika njihovih žilavosti i raznolikosti svrha miješanja, za praksu su konstruirani brojni tipovi uređaja za miješanje.

Konstrukcija se uređaja za miješanje ne temelji na posve matematičkoj obradi operacije, nego više na empiriji, principu sličnosti, primjeni dimenzijske analize i fizičkom modeliranju.

Miješalice se mogu svrstati u tri temeljne skupine: miješalice za kapljevine niskog viskoziteta, miješalice za paste i žilave, vrlo viskozne tvari i miješalice za sipke, praškaste i granulirane čvrste tvari.

Miješalice prve skupine predaju kapljevine mehaničku energiju mješalom: propelerom, mješalom sličnim turbini (tzv. turbinom), lopaticama. Zbog toga struji kapljevine u čitavoj posudi miješalice, tako da se dobar dio miješanja obavlja izvan područja direktnog djelovanja mješala. Pri tome i posuda djeluje poput odbojnika strujanja.

Glavni tipovi miješalice iz druge skupine jesu miješalice za paste, šaržne gnjetalice sa dva rotirajuća mješala, kontinualne miješalice ekstruderskog tipa. Zajedničko im je da se u njima obavlja miješanje samo u području direktnog djelovanja mješala. U njima treba voditi masu u području mješala ili mješalo mora obilaziti masu. Miješanje se u njima odvija smicanjem, tlačenjem, savijanjem i trganjem. Sile su otpora u tim miješalicama velike, pa je potrebna velika čvrstoća uređaja i velik utrošak snage za njihov pogon. Obično je potrebno i hlađenje tih uređaja, jer se zbog velikog trenja snažno zagrijava njihov konstrukcijski materijal.

Miješalice treće skupine jesu sporohodne, trakastohelikoidalne i miješalice s rotirajućim posudama različitih oblika, koje prevrću materijal i uz to ga miješaju i u horizontalnom pravcu. One su lakše konstrukcije, a utrošak snage za njihov pogon mnogo je manji od utroška u miješalicama druge skupine.

Tablica 1  
PODRUČJE UPOTREBE MIJEŠALICA

Skupina miješalice	Temeljna vrsta miješalice	Miješanje kapljevine s viskozitetima (Pas)							Miješanje plastičnih masa			Miješanje praha	
		$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	1	10	$10^2$	$10^3$	lakih	srednjih	teških		
1	S propelerskim mješalicama	■	■	■	■								
	S turbinskim mješalicama	■	■	■	■								
	S lopatičastim mješalicama	■	■	■	■								
2	Za paste								■	■	■		
	Gnjetalice	lake								■	■	■	
		srednje									■	■	
		teške										■	■
Kontinualne									■	■	■		
3	S trakastim mješalicama												■
	S rotirajućim posudama												■

Među tim miješalicama nema oštih granica. Također se djelomično poklapaju i područja njihove upotrebe (tabl. 1).

### MIJEŠANJE KAPLJEVINA

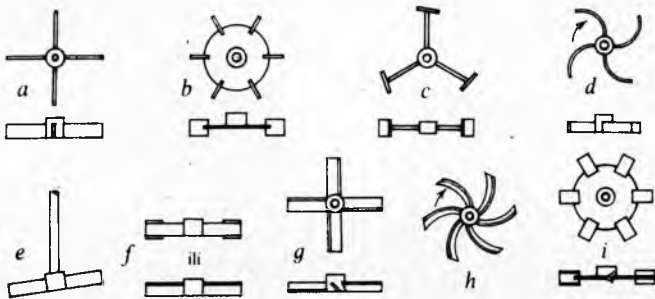
S navedenim trima tipovima mješala prve skupine rješava se ~95% svih problema miješanja u tom području primjene miješalice. Svaki od njih ima mnogo varijacija za različite svrhe. Uz te temeljne tipove, toj skupini pripadaju još i konusna mješala u obliku diska (disk-mješala).

**Propelerska mješala** djelotvorna su pri velikim brzinama vrtnje i pogodna za miješanje kapljevine niskih viskoziteta. Broj okretaja propelerskih mješala manjeg promjera obično je  $1750 \text{ min}^{-1}$ , a većih  $400 \dots 800 \text{ min}^{-1}$ . Uzrokuju uglavnom aksijalno strujanje kapljevine. Pogodni su za miješanje i u velikim

posudama, jer struja kapljevine djeluje i na većim udaljenostima od propelera. Učinak je miješanja središnje postavljene propelera u posudama bez odbojnika mnogo manji, jer se tada formiraju vrtlozi i horizontalna cirkulacija. Od svih mješala propeleri imaju najmanje promjere. Bez obzira na veličinu posude miješalice, promjer im nije veći od 400 mm. Ima ih više tipova, ali danas se upotrebljava uglavnom samo jedan, tzv. modificirani trokrilni brodski propeler, s korakom jednakim promjeru.

Površina krilaca tih propelera pokriva 45...55% površine rotacijskog kruga. Donja (porivna) strana krilaca ravna je ili konkavna, a gornja (usisna) konveksna. Obično su ljevohodni. U visokim se posudama mogu postaviti dva i više propelera na isto vratilo, obično s istim smjerom okretanja. U specijalnim se slučajevima, kad se želi proizvesti zona naročito jake turbulencije, postavljaju i propeleri s obrnutim smjerom okretanja.

**Turbinska mješala** konstrukcijom su slična centrifugalnim pumpama (sl. 1). Pod tim se mješalima obično razumijevaju sva mješala s konstantnim nagibom krilaca prema horizontalnoj ravni od 90° na manje, bilo uzduž čitavog promjera, bilo uzduž pojedinih segmenata mješala. Ta krilca mogu biti ravna ili zavinuta unazad, a može ih biti dva ili više.



Sl. 1. Obični tipovi turbinskih mješala: a s ravnim vertikalnim krilcima, b disk s ravnim krilcima, c radijalno mješalo, d mješalo s vertikalnim krilcima zavinutim unazad, e mješalo s kosim krilcima, f poluzatvoreno turbinsko mješalo, g mješalo s ravnim krilcima nagnutim prema horizontali, h s krilcima nagnutim prema horizontali i zavinutim unazad, i disk sa strelastim krilcima

Zapravo, postoje dva temeljna tipa turbinskih mješala: tip s vertikalnim krilcima i radijalnim pokretanjem kapljevine i tip s nagnutim krilcima i kombiniranim aksijalnoradijalnim pokretanjem kapljevine. Svi su ostali tipovi turbinskih mješala modifikacije tih dvaju tipova.

Turbinska su mješala brzohodna, postavljaju se u središte posude, a promjer im je 30...50% promjera posude. Uz radijalno, uzrokuju i tangencijalno strujanje. Tangencijalna komponenta strujanja stvara vrtlog i djelotvorna je pri miješanju, pa se ona uklanja ugradnjom odbojnika u posudi ili statora oko oboda mješala, koji usmjerava gibanje kapljevine u radijalno strujanje.

Turbinska su mješala poznata kao najelastičnija, jer se različitim njihovim izvedbama postiže uspješno miješanje u vrlo širokom području viskoziteta (od kapljevina s niskim pa do kapljevina s viskozitetom većim od  $10^2$  Pas).

**Turbinsko mješalo s ravnim vertikalnim krilcima** (sl. 1a) usisava i s gornje i s donje strane, a istiskuje radijalno. Upotrebljava se za brzine vrtnje od 200...400 min<sup>-1</sup>. Širina je krilaca tih mješala  $\frac{1}{4}$ ... $\frac{1}{2}$  promjera. Za veće brzine vrtnje tih mješala potrebno je ugraditi odbojnike u posude da bi se spriječilo nastajanje tangencijalne komponente strujanja i vrtloga.

**Disk s ravnim krilcima** (sl. 1b) često se upotrebljava u industriji i u poluindustrijskim ispitivanjima. Djeluje jednako kao i turbinsko mješalo s ravnim vertikalnim krilcima, a troši manje snage.

**Radijalno mješalo** (sl. 1c) zapravo je modifikacija diska s ravnim krilcima. Od njega se razlikuje time što su mu krilca zakrenuta prema tangenti tako da s njome zatvaraju kut od 10...25°. Time se sprečava nastajanje tangencijalne komponente strujanja, pa se kapljevina giblje samo u radijalnom smjeru, a time je spriječeno formiranje vrtloga i bez ugradnje odbojnika. U mješalici sa radijalnim mješalom jače su sile smicanja a

utrošak snage manji je nego za mješala na sl. 1a i 1b za jednaki učin miješanja.

**Mješalo s vertikalnim krilcima zavinutim unazad** (sl. 1d) uzrokuje manje trenje (smicanje) na periferiji krilaca nego već opisana mješala, i zbog toga manje usitnjava lako drobljive čestice i manje troši snage nego mješala na sl. 1a do 1c. Taj je tip mješala zapravo modifikacija tipa na sl. 1a.

**Mješalo s kosim krilcima** (sl. 1e) uzrokuje mnogo jaču aksijalnu komponentu strujanja nego mješala s vertikalnim krilcima (u njima je ona općenito slaba).

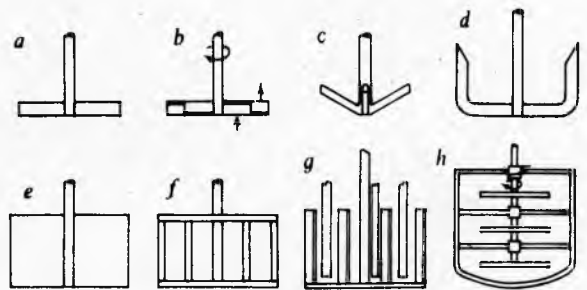
**Poluzatvoreno turbinsko mješalo** (sl. 1f), zatvoreno s gornje strane, pogodno je za dispergiranje i otapanje plina u kapljevini kad se on dovodi u srednji dio, ispod mješala. Tada mjehuri prolaze kroz kanale prema obodu, gdje se dispergiraju. Time se znatno povećava kontaktna, međufazna površina, a s time i brzina prijenosa mase. Kad je zatvoreno s donje strane, stvara se vrtlog koji usisava i dispergira plin koji se nalazi iznad površine kapljevine.

**Mješalo s krilcima nagnutim prema horizontali** (sl. 1g) uzrokuje uglavnom aksijalno strujanje, ali donekle i radijalno. Radijalna se komponenta strujanja znatno pojačava kad se mješalo postavi blizu dna posude. Obično mu je nagib krilaca 45°. Neki autori uvrstavaju mješala tog tipa u propelerska mješala.

**Mješalo s nagnutim i zavinutim krilcima** (sl. 1h) kombinacija je tipova na sl. 1d i 1g. Izvedba mu je dosta komplicirana, pa se rijetko upotrebljava u praksi.

**Disk-mješalo sa strelastim krilcima** (sl. 1i) omogućuje istodobno razvijanje aksijalne i radijalne komponente strujanja. I taj je tip mješala rijetko upotrebljava u praksi.

**Mješala s lopaticama** zapravo imaju samo jedan osnovni oblik. To je mješalo sa dvije ravne lopatice (sl. 2a), koje se postavljaju u sredinu posude. Omjer ukupne duljine lopatica tog mješala i promjera posude miješalice veći je nego u turbinskim miješalicama.



Sl. 2. Mješala s lopaticama: a s osnovnom lopaticom, b s lopaticama s nasuprotnim nagibima, c emaljirano sa tri lopatice, d sidrasto, e s maksimalno povišenim osnovnim lopaticama, f rešetkasto, g s odbojnicima, h protustrujno

Prema njegovu obliku i djelovanju to bi se mješalo moglo uvrstiti i u skupinu turbinskih mješala. Međutim, postoje dva važna razloga da se to i druga mješala, koja su nastala iz njega, promatraju posebno. Naime, ta se mješala upotrebljavaju u laminarnom području strujanja ili u prijelaznom i turbulentnom, ali u miješalicama s posudama bez odbojnika. Turbinska mješala, naime, nisu pogodna za te uvjete rada. Osim toga, jer se pomoću osnovnog oblika lopatica često ne može postići zadovoljavajući efekt miješanja vrlo viskoznih i newtonovskih kapljevina, iz njega se razvio niz novih oblika lopatica, koji su mnogo djelotvorniji u tom području miješanja i sve se više udaljavaju od turbinskih mješala.

**Osnovne lopatice** jesu horizontalne, ravne ploče. Omjer njihove ukupne duljine i promjera posude miješalice obično je 0,5...0,9. Obodna je brzina mješala s tim lopaticama 70...130 m/min. Omjer visine i ukupne duljine tih lopatica jest  $\frac{1}{6}$ ... $\frac{1}{4}$ .

**Lopatice sa dva nasuprotna nagiba prema horizontali** (sl. 2b) uzrokuju bolje aksijalno pokretanje kapljevine nego osnovne lopatice. Obično su im nagibi 45°, i to tako da na vanjskoj četvrtini svoje duljine uzrokuju strujanje prema gore, a na unutarnjoj tričetvrtini prema dolje.

*Emajlirano mješalo sa tri lopatice* (sl. 2c) upotrebljava se u miješalicama s emajliranim posudama. Lopatice su im ili, kao na slici, pod kutom od  $30^\circ$  prema horizontali ili su zavinute unazad. Omjer promjera mješala i posude miješalice jest 0,55...0,65.

To bi se mješalo moglo svrstati i u turbinska mješala kad se upotrebljava za miješanje kapljevine niskih viskozitetata, ali zbog toga što emajlirane posude obično nemaju odbojnice, može se promatrati i kao mješalo s lopaticama.

*Sidrasto mješalo* (sl. 2d) može se promatrati kao mješalo s osnovnim lopaticama produženim uz stijenke posude miješalice. Već prema obliku posude, to mješalo može biti kao na slici, sidrasto ili potkovasto. Zračnost je između lopatica tih mješala i stijenki posuda miješalice vrlo malena (nekoliko milimetara do nekoliko centimetara). Taj je tip mješala pogodan za primjenu pri prijenosu topline sa stijenki posuda na viskozne kapljevine, osobito za sprečavanje nastajanja inkrustacija na stijenkama.

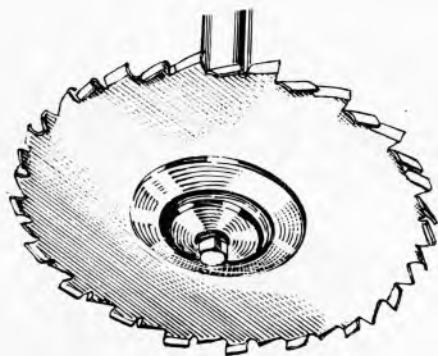
*Mješala s maksimalno proširenim osnovnim lopaticama* (sl. 2e) razlikuju se od mješala s osnovnim lopaticama samo time što su im lopatice proširene i povišene do maksimuma. Mješala s takvim lopaticama prikladna su za miješanje nekih viskoznih newtonovskih kapljevine.

*Rešetkasto mješalo* (sl. 2f) može se promatrati kao mješalo s maksimalno proširenim, ali prošupljenim lopaticama. Vertikalni dijelovi lopatica tih mješala uzrokuju smicanje kapljevine ne samo uz stijenku posude miješalice nego i u svim radijalnim presjecima. Zbog toga su pogodni za miješanje newtonovskih viskoznih kapljevine.

*Mješalo s odbojnicima* (sl. 2g) poznato je kao mješalo za paste. Odbojnici među okomitim dijelovima lopatica tog mješala služe za pojačavanje smicanja kapljevine i poboljšanje učinka miješanja.

*Protustrujna mješala* (sl. 2h) sastoje se od dva mješala koja rotiraju obrnutim smjerovima. Prikazani tip na slici kombinacija je sporohodnog sidrastog mješala i rešetkastog mješala koje rotira brže i k tome protustrujno. To je mješalo naročito pogodno za intenzivno miješanje vrlo viskoznih i newtonovskih kapljevine.

**Ostala mješala.** Uz opisana mješala triju osnovnih skupina još su dosta važna brzohodna mješala s vrlo malom površinom krilaca. Ona rade u visokoturbulentnom području. Među njima je za praksu najzanimljiviji *disk s pilasto nazubljenim obodom* (sl. 3). Zubi su mu naizmjenično odvrnuti prema gore i prema dolje, pod kutom od  $10^\circ$ ... $20^\circ$  prema tangenti, kao i u turbinskom radijalnom mješalu. Time se pojačava radijalna, a smanjuje tangencijalna komponenta strujanja. Taj se tip mješala mnogo upotrebljava u industriji naliča, jer zbog velike obodne brzine i nazubljenog oboda, uz dobro miješanje, dobro usitnjava čestice čvrstih pigmentata.



Sl. 3. Disk-mješalo s pilasto nazubljenim obodom

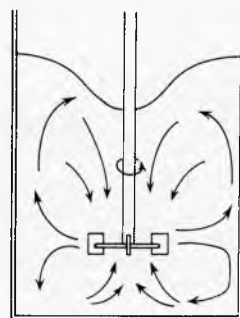
Na obod lopatica često se ugrađuju i strugači koji uklanjaju mirujućii sloj sa stijenki posude miješalice. Time se olakšava prijenos topline u miješalicama s ogrjevnim ili rashladnim duplikatorom.

## DJELOVANJE MJEŠALA

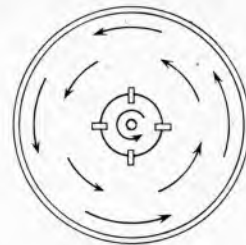
Pri strujanju kapljevine u miješalicama uzrokovanom rotiranjem mješala, dobava mješala mora biti dovoljno velika da sav materijal u posudi prostruji kroz mješalo za dovoljno kratko vrijeme, a brzina strujanja na izlazu iz mješala mora biti dovoljna da kapljevine prodre u sva područja posude.

Miješanje nastupa kad masa kapljevine veće brzine dolazi u kontakt s masom kapljevine koja miruje ili se giblje sporije. Na dodirnoj se granici tih masa stvaraju vrtlozi koji prenose količinu gibanja iz područja većih u područje manjih brzina gibanja.

Tip strujanja u miješalici zavisi od oblika mješala, svojstava kapljevine, veličine posude i geometrijskih odnosa između posude, mješala i odbojnika. U svakoj točki kapljevine njena brzina ima tri komponente: radijalnu, aksijalnu i tangencijalnu. Kad je mješalo postavljeno središnje, s pogonom odozgo, radijalna i tangencijalna komponenta djeluju u horizontalnoj ravnini, a aksijalna komponenta djeluje vertikalno (sl. 4). Za miješanje su korisne samo aksijalne i radijalne komponente strujanja.



Sl. 4. Komponente strujanja koje uzrokuje mješalo u pogonu



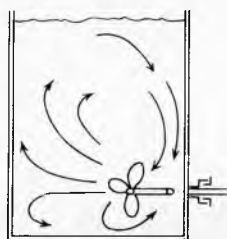
Tangencijalna komponenta strujanja uzrokuje za miješanje štetno kružno slojevito gibanje bez miješanja i nepoželjni vrtlog u posudi. Tako se pri suspendiranju miješanjem pod utjecajem tog gibanja čestice čvrstih faza nakupljaju uz stijenke posude, uz koje se onda talože prema dnu i zatim gomilaju u središtu. Na taj način tangencijalna komponenta strujanja uzrokuje suspendiranju suprotan efekt, zapravo aglomeriranje čestica. Također, budući da pod utjecajem tangencijalne komponente strujanja kapljevine rotira u istom smjeru kao i mješalo, ta komponenta smanjuje relativnu brzinu gibanja kapljevine prema mješalu i time predaju energije miješanja kapljevine. Osim toga, pri povećanju brzine vrtnje mješala pod utjecajem se tangencijalne komponente strujanja produbljuje vrtlog i konačno nastupa usisavanje zraka. Zbog toga nastupa obično nepoželjni, nagli pad utroška snage.

Pri miješanju se propelerima u malim posudama može izbjeći kružno gibanje kapljevine ekscentričnim postavljanjem mješala, okomito ili pod kutom od  $15^\circ$  prema vertikali (sl. 5), a u većim

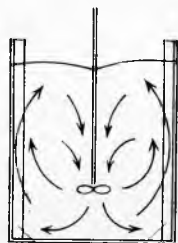
Sl. 5. Sprečavanje pojave tangencijalne komponente strujanja pri miješanju propelerima u malim posudama položajem mješala: a ekscentričnim kosim, b ekscentričnim uspravnim

posudama postavljanjem sa strane, kroz stijenku, pod kutom od 20° prema okomitom presjeku posude (sl. 6).

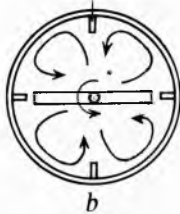
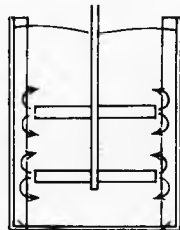
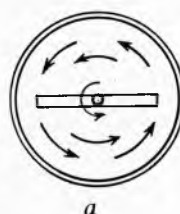
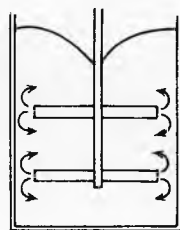
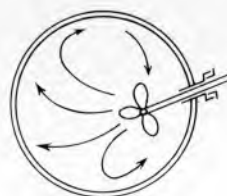
Za poništavanje tangencijalne komponente brzine strujanja pri miješanju turbinskim mješalima najuobičajenije je ugradivanje vertikalnih odbojnika uz stijenke (sl. 7). Obično ih ima četiri, a širina im je desetina promjera posude. Pri miješanju suspenzija to može uzrokovati nagomilavanje čestica čvrstih faza ispred ili iza odbojnika. Tada se odbojnici postavljaju odmaknuto od stijenki za polovicu svoje širine.



Sl. 6. Sprečavanje pojave tangencijalne komponente strujanja položajem mješala pri miješanju propelerima u velikim posudama



Sl. 7. Sprečavanje razvijanja tangencijalne komponente strujanja odbojnicima



Sl. 8. Strujanje uzrokovano mješalima s lopaticama: a bez odbojnika, b s odbojnicima

Pri miješanju mješalima s lopaticama radijalna je komponenta dobro, a aksijalna slabo razvijena (sl. 8). Zbog toga je područje primjene miješalica tog tipa ograničeno.

Turbinska mješala potiskuju kapljevину u radijalni smjer, ali razvijaju i znatnu vertikalnu komponentu strujanja prema gore i prema dolje. Zbog toga su ta mješala vrlo fleksibilna i upotrebljiva u vrlo širokom području.

Propelerska mješala tjeraju kapljevину prema dnu posude, gdje ona zakreće u radijalni smjer prema stijenka posude, pa vertikalno uz stijenke, te se kroz središte vraća usisnoj strani propelera. Zbog toga se propelerska mješala upotrebljavaju kad se želi postići jako vertikalno strujanje, npr. za suspendiranje čvrstih čestica koje se brzo talože.

**Dobava i visina brzine.** Učinak mješala karakteriziran je njegovom dobavom (najprikladnije volumnom, tj. volumenom materijala koji prostruji kroz mješalo u jedinici vremena) i

visinom brzine (energijom jedinice mase materijala na izlasku iz mješala, što je mjera za silu koju kapljevina može razviti pri kočenju ili promjeni smjera gibanja). U praksi su pri miješanju najvažniji odnosi dobave, visine brzine i utroška snage mješala u turbulentnom području strujanja.

Za izvođenje odnosa među tim obilježjima miješanja u geometrijski sličnim miješalicama u tim se uvjetima polazi od proporcionalnosti volumne dobave mješala presjeku i obodnoj brzini mješala, zbog čega je ta dobava definirana izrazom

$$Q = N_q n d_m^3 \tag{1}$$

gdje je  $N_q$  bezdimenzijski volumni koeficijent proporcionalnosti,  $n$  brzina vrtnje, a  $d_m$  promjer mješala. Iz proporcionalnosti visine brzine s kvadratom obodne brzine može se i snaga mješala definirati istim veličinama izrazom

$$P = N_p \rho n^3 d_m^5 \tag{2}$$

gdje je  $N_p$  također bezdimenzijski energijski koeficijent proporcionalnosti, a  $\rho$  gustoća materijala koji se miješa, pri čemu je snaga jednaka umnošku masene dobave i visine brzine  $H$ , tj.

$$P = \rho Q H \tag{3}$$

pa iz (1), (2) i (3) slijedi

$$H = \frac{N_p}{N_q} n^3 d_m^2 \tag{4}$$

Vrijednosti  $Q$  i  $P$  mogu se odrediti eksperimentom, a  $H$  se izračuna pomoću (3).

Prema (2), pri  $P = \text{const.}$   $n$  je proporcionalan sa  $d_m^{-5/3}$  a  $N d_m$  sa  $d_m^{-2/3}$ , pa iz (4) slijedi da je  $H$  proporcionalan sa  $d_m^{-4/3}$ , a iz (1) da je  $Q$  proporcionalan sa  $d_m^{3/3}$ . Drugim riječima, pri  $P = \text{const.}$  raste  $Q$  s povećanjem, a  $H$  sa smanjivanjem promjera mješala. Prema tome, ako se pri jednakom utrošku snage želi postići veća visina brzine, mora se upotrijebiti mješalo manjeg promjera i s većom brzinom vrtnje, a ako se želi postići veća dobava, obrnuto.

Tipične svrhe miješanja za koje su pogodna mješala s velikom visinom brzine jesu: brzo izjednačavanje razlika koncentracija u području djelovanja mješala, razvijanje velikih međufaznih površina dvofaznih kapljevinih sustava (emulgiranje), dispergiranje plinova u kapljevina (apsorpcija plinova), usitnjavanje čestica čvrstih faza u kapljevina, poboljšavanje prijenosa mase između kapljevina i čvrstih faza u njihovim sustavima.

Tipične svrhe miješanja za koje su prikladna mješala s većom dobavom, a manjom visinom brzine jesu: brzo miješanje mješljivih kapljevina u čitavoj posudi, poboljšavanje prijenosa topline između stijenki posude miješalica i sustava koji se miješaju, smanjivanje razlika koncentracija i temperatura u svim dijelovima posude (važno je za reaktore s određenim režimom uvjeta rada i za kontinualne procese), te suspendiranje čestica čvrstih faza s malom brzinom taloženja u čitavoj posudi.

**Utrošak snage** za pogon mješala jedan je od osnovnih elemenata za konstrukciju i izbor tipa miješalice, pa je njegovo predviđanje jedan od glavnih zadataka proračuna. Zbog velike složenosti hidrodinamičkog polja u miješalicama i brojnih njihovih tipova, koji se upotrebljavaju u praksi za najrazličitije svrhe, praktički je nemoguće riješiti taj problem pomoću diferencijalnih jednadžbi, pa se tome pristupa primjenom principa sličnosti i dimenzijske analize.

**Podaci** potrebni za postavljanje jednadžbi kojima se mogu matematički opisivati zakonitosti miješanja u različitim tipovima miješalica dobiveni su ispitivanjem na modelima. Primjenom Buckinghamova  $\pi$ -teorema dobivena je osnovna jednadžba za miješanje u bezdimenzijskom obliku

$$f\left(\frac{d_m^2 n \rho}{\mu}, \frac{d_m n^2}{g}, \frac{P}{\rho n^3 d_m^5}, \frac{d_m}{d_p}, \frac{d_m}{z}, \frac{d_m}{c}, \frac{d_m}{p}, \frac{d_m}{w}, \frac{d_m}{l}, \frac{i_2}{i_1}\right) = 0, \tag{5}$$

gdje su  $\mu$  i  $\rho$  dinamički viskozitet i gustoća kapljevine (na njevoj temperaturi u miješalici),  $g$  je gravitacijska akceleracija,  $d_p$  promjer posude,  $z$  visina kapljevine u miješalici,  $c$  udaljenost

mješala od dna posude,  $p$  korak mješala,  $w$  širina,  $l$  duljina, a  $i_2/i_1$  omjer broja krilaca mješala i nekog proizvoljno odabranog broja krilaca.

Ta jednadžba vrijedi samo za miješalice sa središnje postavljanim, vertikalnim mješalima. Njome nisu obuhvaćene ni izvedbe sa dva i više mješala na istom vratilu, ni broj odbojnika, ni njihova širina, ni modificirani oblici posuda miješalica. Bezdimenzijske grupe te jednadžbe opisuju geometrijsku, dinamičku i kinematičku sličnost. Sustavi različitih veličina slični su kad su im vrijednosti svake pojedine od tih grupa jednake.

Sedam posljednjih skupina jednadžbe (5) opisuju uvjete geometrijske sličnosti, pa za ispitivanja ograničena na geometrijski potpuno slične sustave u njoj preostaju samo prve tri skupine, tj. ona se reducira u oblik

$$f\left(\frac{d_m^2 n \rho}{\mu}, \frac{d_m n^2}{g}, \frac{P}{\rho n^3 d_m^5}\right) = 0. \quad (6)$$

Jednakošću vrijednosti svake od triju skupina te jednadžbe određena je dinamička i kinematička sličnost.

Prva je od tih skupina Reynoldsova skupina  $\left(Re = \frac{\rho v L}{\mu}\right)$ , modificirana zamjenom  $L$  sa  $d_m$ , a  $v$  sa  $nd_m$ . Ona prikazuje odnos između sile inercije i sile trenja i definira vrstu strujanja (pokazuje da li se radi o laminarnom ili o turbulentnom strujanju).

Druga je od tih skupina Froudeova skupina  $\left(Fr = \frac{v^2}{Lg}\right)$ ,

modificirana na jednaki način. Ona prikazuje odnos između sile inercije i sile gravitacije. Utječe samo u miješalicama bez odbojnika u turbulentnom području, kad nastaju vrtlozi.

Treća je od tih skupina, zapravo Eulerova skupina, koja u protočnim sustavima ima oblik  $\frac{\Delta p}{\rho v^2}$ , također modificirana zamjenom  $v$  sa  $nd_m$ , a  $\Delta p$  (pad tlaka), koji je u protočnim sustavima mjera narinute sile, snagom kojom mješalo djeluje na kapljevину, što je mjerljiva veličina jer je produkt zakretnog momenta i brzine vrtnje mješala. Ta se zamjena izvodi iz relacija

$$P = \Delta p d_m^2 v = \Delta p d_m^3 n; \quad \Delta p = \frac{P}{d_m^3 n}. \quad (7)$$

Modificirana se Eulerova skupina naziva Newtonovom skupinom i simbolizira sa  $Ne$ .

Na osnovi dimenzijske analize jednadžba (5) može se napisati u obliku

$$Ne = K Re^a Fr^b \left(\frac{d_p}{d_m}\right)^c \left(\frac{z}{d_m}\right)^d \left(\frac{c}{d_m}\right)^e \left(\frac{p}{d_m}\right)^f \left(\frac{w}{d_m}\right)^g \left(\frac{l}{d_m}\right)^h \left(\frac{i_1}{i_2}\right)^i, \quad (8)$$

gdje je  $K$  konstanta koja se pri ograničenju na geometrijski slične miješalice reducira u oblik

$$Ne = K Re^a Fr^b. \quad (9)$$

Taj izraz omogućuje da se grafički prikažu vrijednosti bezdimenzijskih skupina  $Ne$ ,  $Re$  i  $Fr$ , dobivene iz eksperimentalnih podataka. Obično se za to upotrebljava log-log koordinatni sustav, u kojemu su vrijednosti  $Re$  na apscisi, a na ordinati vrijednosti omjera  $\frac{Ne}{Fr^b} = \Phi$ , zvanog grupom snage (sl. 9). U miješalicama je s odbojnicima, kad nema vrtloga,  $b = 0$ .

Takvi se dijagrami izrađuju za sve osnovne tipove miješalica. Mogu se svrstati u tri područja. Prvo je (do  $Re \approx 10$ ) laminarno. U njemu su krivulje, zapravo, pravci s nagibom  $-1$ . Slijedeće je (od  $Re \approx 10$  do  $Re \approx 10^4$ ) prijelazno, a ostalo (iznad  $Re \approx 10^4$ ) turbulentno.

U čitavom je laminarnom području  $\Phi = Ne$ , jer ni u tim uvjetima miješanja nema vrtloga ni utjecaja gravitacije, pa se utjecaj  $Fr$  može zanemariti. Tada je

$$Ne = K_1 Re^{-1}, \quad (10)$$

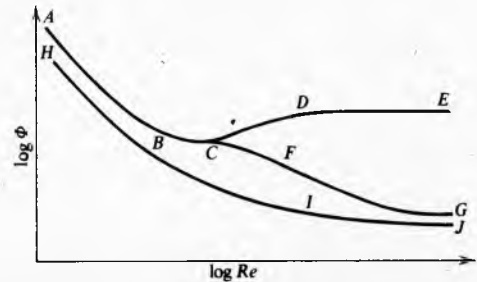
$$P = K_1 n^2 d_m^3, \quad (11)$$

gdje je  $K_1$  konstanta u laminarnom području. Krivulje koje prikazuju međuzavisnost  $Ne$ ,  $Re$  i  $Fr$  u turbulentnom području miješanja miješalicama s odbojnicima zapravo su horizontalni pravci. Budući da se i u tom području smije zanemariti utjecaj  $Fr$ , tada se smije uzeti da je

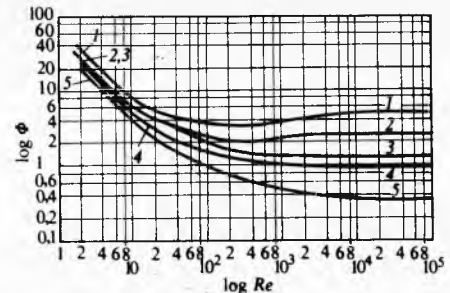
$$Ne = K_1, \quad (12)$$

$$P = K_1 \rho n^3 d_m^5, \quad (13)$$

gdje je  $K_1$  konstanta u turbulentnom području.



Sl. 9. Grafički prikaz međuzavisnosti bezdimenzijskih skupina koje definiraju dinamičko-kinematičku sličnost strujanja pri miješanju.  $AB$  i  $HB$  područja laminarnog strujanja;  $BD$ ,  $BF$  i  $BI$  područja prijelaznog strujanja;  $DE$ ,  $FG$  i  $IJ$  područja turbulentnog strujanja;  $CFG$  strujanje u miješalicama bez odbojnika;  $CDE$  i  $IJ$  aksijalno strujanje u miješalicama s odbojnicima



Sl. 10. Krivulje za izračunavanje utroška snage nekih propelerskih i turbinskih mješala: 1 turbinsko mješalo sa šest krilaca, s odbojnicima, 2 otvoreno turbinsko mješalo sa šest okomitih krilaca, s odbojnicima, 3 turbinsko mješalo sa šest kosih krilaca, s odbojnicima, 4 propelersko mješalo s korakom  $2D$  (gdje je  $D$  promjer propelera), s odbojnicima i isto mješalo u ekscentričnom položaju bez odbojnika, 5 propelersko mješalo s korakom  $D$ , s odbojnicima i isto mješalo u kosom ekscentričnom položaju bez odbojnika

U prijelaznom se području i u turbulentnom području rada miješalica bez odbojnika te krivulje ne mogu aproksimirati pravcima. Njihov je oblik odraz mješovitog, laminarnoturbulentnog strujanja i specifičan je za svaki tip miješalice. Mnogi su istraživači ispitivali djelovanje različitih tipova miješalica na modelima u čitavom području strujanja i prikazali rezultate dijagramima, pa je moguće predvidjeti utrošak snage za pogon miješalica različitih tipova i različitih veličina, pri različitim uvjetima rada i za miješanje kapljevina različitih svojstava, posebno turbinskih i propelerskih miješalica (sl. 10).

Ipak, podaci su za miješalice s lopaticama vrlo oskudni. Uglavnom su to podaci za mješala s ravnim osnovnim lopaticama. Budući da takve miješalice obično rade u laminarnom području, za njih se može postaviti

$$\frac{P}{\rho n^3 d_m^5} = K \left(\frac{d_m^2 n \rho}{\mu}\right)^{-1} \left(\frac{w}{d_m}\right)^g; \quad \frac{P}{\mu n^2 d_m^3} = K \left(\frac{w}{d_m}\right)^g. \quad (14)$$

Za dvokrilnu su lopaticu eksperimentalno utvrđene vrijednosti  $K = 113$ ,  $g = 0,5$ , pa je tada utrošak snage mješala prema (14)

$$P = 113 \mu n^2 d_m^{2,5} w^{0,5}. \quad (15)$$

Disk-mješalo s nazubljenim i odvrnutim obodom rotira velikim brzinama i radi u turbulentnom području, pa mu je tada grupa snage također konstantna: vrijednost joj je 0,5.

**Prijenos topline u miješalicama.** S obzirom na prijenos topline u njima, miješalice se mogu svrstati u dvije osnovne skupine: miješalice s velikim udaljenostima mješala od stijenki posude ili grijala i miješalice s vrlo malim udaljenostima mješala od stijenki. Prvu od tih skupina čine miješalice s propelerskim, turbinskim i mješalima s osnovnim lopaticama, prikladne za miješanje kapljevina malog viskoziteta do maksimalno 1 Pas. Drugu skupinu čine miješalice s mješalima s lopaticama, kao što su sidraste, potkovičaste, koje se upotrebljavaju za miješanje nenenovtonovskih i vrlo viskoznih kapljevina, te za miješanje čvrstih, granuliranih materijala, a u njima se prijenos topline odvija još i efektom otiranja graničnog sloja na površini stijenke posude miješalice.

Kapljevine se u posudama miješalica griju ili hlade kroz stijenke (u posudama s duplikatorima) ili pomoću ugrađenih grijala (spiralnih ili vertikalnih cijevnih grijala).

Kao i određivanje utroška snage, i određivanje je prijenosa topline pri miješanju komplicirano zbog različitosti geometrijskih oblika miješalica i zamršenosti njihovih dinamičko-termičkih polja, pa se to rješava primjenom dimenzijske analize. Osnovna je bezdimenzijska jednadžba za tu svrhu

$$\frac{\alpha d_p}{\lambda} = f\left(\frac{d_m^2 n \varrho}{\mu}, \frac{c_p \mu}{\lambda}, \frac{\mu_w}{\mu}, \frac{d_p}{d_m}, \frac{w}{d_m}, \frac{z}{d_m}, \frac{c}{d_m}, \frac{B}{d_m}, \frac{i_b}{x}, \frac{i_i}{y}\right), \quad (16)$$

gdje je  $\alpha$  koeficijent prijelaza topline na unutrašnjoj stijenci posude,  $\lambda$  toplinska vodljivost kapljevine,  $c_p$  njena specifična toplina,  $\mu_w$  njen dinamički viskozitet na temperaturi stijenke,  $B$  širina odbojnika,  $i_b$  njihov broj u miješalici,  $x$  njihov referentni broj,  $i_i$  broj krilaca mješala, a  $y$  njihov referentni broj. (Drugi je član izraza na desnoj strani te jednadžbe zapravo Prandtlov broj, koji se simbolizira sa  $Pr$ ).

I ta se jednadžba pojednostavnjuje kad se promatranje ograniči na geometrijski slične miješalice. Tada se dobiva

$$\frac{\alpha d_p}{\lambda} = K \left(\frac{d_m^2 n \varrho}{\mu}\right)^a \left(\frac{c_p \mu}{\lambda}\right)^b \left(\frac{\mu_w}{\mu}\right)^c, \quad (17)$$

gdje su  $K$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  konstante. Tako se npr. za miješalice za kapljevine niskog viskoziteta s posudama s duplikatorima s vrijednostima u tabl. 2 prema (17) izvodi jednadžba

$$\frac{\alpha d_p}{\lambda} = K Re^{2/3} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_w}{\mu}\right)^{1/4}, \quad (18)$$

koja se često upotrebljava kao aproksimacija za predviđanja prijenosa topline u svim tim miješalicama.

Tablica 2

NFKE VRIJEDNOSTI KONSTANTI ZA PRORAČUN PRIJENOSA TOPLINE U MIJEŠALICAMA S DUPLIKATOROM PRI MIJEŠANJU KAPLJEVINA NISKOG VISKOZITETA

Vrsta mješala	Konstante				Područje $Re$
	$K$	$a$	$b$	$c$	
S osnovnim lopaticama	0,36	2,3	1,3	-0,21	300...3 · 10 <sup>5</sup>
Turbina s nagibom 45°	0,53	2,3	1,3	-0,24	80...200
Disk-turbine	0,54	2,3	1,3	-0,14	40...3 · 10 <sup>5</sup>
Propeler	0,54	2,3	1,3	-0,14	2 · 10 <sup>3</sup>

Za različite tipove takvih miješalica, koje namjesto duplikatora imaju ugrađena cijevna grijala, upotrebljavaju se različite jednadžbe sličnog oblika. Međutim, one se ne daju aproksimirati nekom zajedničkom jednadžbom, pa se tada pribjegava specijalnoj literaturi ili eksperimentiranju na modelima.

Za miješanje miješalicama sa sidrastim mješalima upotreb- ljiva je jednadžba

$$\frac{\alpha d_p}{\lambda} = K \left(\frac{d_m^2 n \varrho}{\mu}\right)^a \left(\frac{c_p \mu}{\lambda}\right)^{1/3} \left(\frac{\mu_w}{\mu}\right)^{-0,18}, \quad (19)$$

gdje su  $K = 1$  i  $a = \frac{1}{2}$  u području  $Re = 10 \dots 300$ , a  $K = 0,36$  i  $a = \frac{2}{3}$  u području  $Re = 300 \dots 4 \cdot 10^4$ . Ta jednadžba vrijedi i za miješanje miješalicama s helikoidalnim mješalom. Tada su  $K = 0,633$  i  $a = \frac{1}{2}$  u području  $Re = 8 \dots 10^5$ .

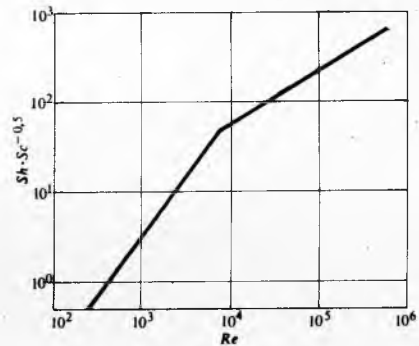
**Prijenos mase u miješalicama.** Objavljene studije o prijenosu mase pomoću miješanja uglavnom se ograničavaju na ispitivanje brzine otapanja čvrstih čestica teško topljivih tvari određenog geometrijskog oblika. Otapanje se čestica oblika kugle, valjka, šupljeg valjka i različitih prizmatičnih oblika u kapljevina- ma također općenito opisuju pomoću bezdimenzijskih skupina, npr. jednadžbom

$$\frac{K_c d}{D} = K_0 \left(\frac{v d \varrho}{\mu}\right)^a \left(\frac{\mu}{\varrho D}\right)^b, \quad (20)$$

gdje je  $K_c$  koeficijent prijenosa mase,  $d$  karakteristična dimen- zija čestice,  $D$  koeficijent difuzije,  $K_0$  faktor oblika zavisn od geometrijskih karakteristika čvrstih čestica,  $v$  brzina strujanja kapljevine,  $b = 0,5$ , a eksponent  $a$  ima različite vrijednosti, već prema području strujanja. Pri tome je  $K_c d/D = Sh$  (tzv. Sherwoodov broj),  $v d \varrho/\mu = Re$ , a  $\mu/\varrho D = Sc$  (tzv. Schmidtov broj), pa se ta jednadžba može pisati i u obliku

$$Sh \cdot Sc^{-0,5} = K_0 \cdot Re^a, \quad (21)$$

prikladnom za interpretaciju podataka iz eksperimenata u vezi s prijenosom mase između čvrstih čestica i kapljevinih faza po- moću miješanja, jer se izraz na lijevoj strani tog izraza (tzv. karakteristika izmjene tvari) može prikazati kao funkcija  $Re$  (sl. 11).



Sl. 11. Karakteristika izmjene tvari jednog sustava čvrsto—kapljevito pri miješanju mješalom sa če- tiri lopatice

U tim je prikazima jasno uočljiv lom eksperimentalne kri- vulje pri  $Re_{krit}$  što znači i pri tome pripadnoj kritičnoj brzini vrtnje mješala  $n_{krit}$ . Matematički je ta pojava izražena velikim smanjenjem vrijednosti  $a$ . Očito tu promjenu treba pripisati tome što u području povećavanja  $n$  do  $n_{krit}$  karakteristika izmjene tvari ne raste samo pod utjecajem povećavanja brzine strujanja kapljevine nego i radi povećavanja aktivne dodirne površine kapljevine i čvrste faze, tj. zbog povećavanja količine čvrste tvari suspendirane u kapljevini. Zbog toga se u tom području mogu odrediti samo prividne vrijednosti  $K_c$ . Samo u području strujanja, kad je sva čvrsta tvar sustava suspendirana, vrijed- nosti su  $K_c$  jedino zavisne od  $n$ . Obično je tada  $a = 0,25 \dots 0,3$ , a to znači da dalje povećavanje utroška snage mješala malo utječe na povećavanje brzine otapanja čestica čvrste tvari. Razlog je tome što relativna brzina gibanja kapljevine prema česticama čvrste tvari, koje se nalaze u gibanju, raste sporije od obodne brzine mješala, pa je uslijed toga usporen rast koeficijenta prije- nosa mase  $K_c$  i niža vrijednost eksponenta  $a$   $Re$ -broja. Zbog toga je obično povećavanje utroška snage za miješanje radi otapanja neekonomično nakon što brzina vrtnje mješala preko- rači kritični broj okretaja.

Pri emulgiranju nemješljivih kapljevina i dispergiranju pli- nova u kapljevina utjecaj je brzine strujanja mnogo veći zbog popratnog efekta usitnjavanja kapljica, odnosno mjehurića, tj. opet zbog povećavanja kontaktne površine na kojoj se obavlja prijenos mase.

Prijenos se mase u miješalicama, dakle, ne da opisati prikladnim matematičkim izrazima. Namjesto toga ispituje se na modelima svaki pojedini slučaj.

**Suspendiranje čvrstih čestica.** Osim za homogeniziranje sustava čvrstih i kapljevitih faza, u praksi se suspendira miješanjem još i za usitnjavanje čestica (npr. pri razmuljivanju filterarskih kolača, usitnjavanju novinskog papira, mokrom mljevenju pigmenta), za ubrzavanje otapanja, izluživanja i kemijskih reakcija (hidrodinamičkim djelovanjem na čestice čvrstih reaktanata ili katalizatora), za reguliranje veličine kristala koji se izlučuju iz otopine ili zrnaca polimera pri polimerizaciji u proizvodnji plastičnih masa.

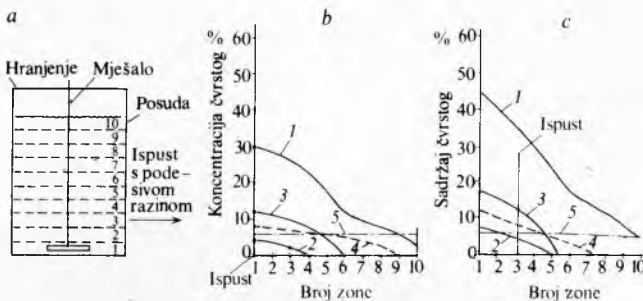
Postizavanje suspendiranog stanja ovisi o brojnim faktorima, kao što su geometrijski oblik posude, konstrukcija i brzina vrtnje mješala, gustoća čestica i kapljevine, koncentracija čvrstog u mulju, veličina i oblik čestica, viskozitet kapljevine i granice veličina čestica u granulometrijskim frakcijama. Zbog raznolikosti svrha i režima suspendiranja dosad nije uspjelo pronaći matematički izraz prikladan za cjelovit, niti bar djelomičan opis veza među faktorima koji utječu na odvijanje procesa s tog područja, pa se pojedini njegovi problemi rješavaju ispitivanjem na modelima.

Za cilj pri različitim operacijama suspendiranja miješanjem obično se postavljaju granice u okviru kojih se moraju nalaziti koncentracija ili neko drugo svojstvo produkata miješanja. U diskontinualnim se procesima za mjeru efekta miješanja obično uzima i vrijeme potrebno da se koncentracija, odnosno neko drugo svojstvo, dovedu u predviđene granice. Vrijeme se miješanja obično uzima pri miješanju kapljevine radi dobivanja jednofaznih kapljevitih smjesa. Međutim, taj način promatranja procesa nije pogodan pri suspendiranju čvrstih čestica s većom brzinom taloženja.

Stupanj do kojega je čvrsta tvar sustava suspendirana (stupanj suspendiranja, stanje suspenzije) nije jednoznačno određen u literaturi, nego ga treba točno definirati i naznačiti metodu uzimanja uzorka. Obično se izražava postocima, kao tzv. *postotna suspenzija* (stotruki kvocijent mase čvrste tvari u jedinici volumena u točki uzimanja uzorka i srednje mase čvrste tvari u jedinici volumena mase u posudi miješalice). U različitim dijelovima sustava u posudi vrijednosti postotne suspenzije mogu biti 100%, ili veće od toga. Može se prikazati i pojedinačno po frakcijama čestica različitih veličina. Najčešće se učinak suspendiranja u praksi prikazuje kao kompletna jednolikost, kompletno odizanje čestica s dna posude, ili visina suspenzije i profil koncentracija.

*Kompletna jednolikost* je postignuta kad je postotak suspenzije 100% u čitavoj posudi. To je stanje vrlo teško postići u suspenzijama čestica s većim brzinama taloženja, naročito u najvišim slojevima.

Kompletno odizanje čestica s dna posude zahtijeva postizanje stanja u kojem se sve čestice ili gublju po dnu ili su odignute od njega. U suspenzijama čestica s većom brzinom taloženja mnogo je lakše postići to stanje nego kompletnu jednolikost. Zbog toga se dosta često primjenjuje u praksi, naročito u operacijama prijenosa mase. Taj način izražavanja stupnja suspendiranja ne omogućuje uvid u sastav suspenzije.



Sl. 12. Određivanje koncentracijskih profila pri suspendiranju miješanjem: a) podjela sustava u zone, b) i c) koncentracijski profili pri ispuštanju s dna i iznad dna posude miješalice: 1 koncentracijski profil ukupne čvrste tvari sustava, 2 njene granulometrijske frakcije A, 3 frakcije B, 4 frakcije C, 5 frakcije D

Visina suspenzije i profil koncentracija prikazivanje je učinka suspendiranja podjelom posude miješalice u više sekcija, iz kojih se onda uzimaju uzorci suspenzije (sl. 12a). Time se dobiva uvid u postotnost suspenzije po tim sekcijama. Pomoću granulometrijske analize može se dobiti i detaljniji uvid u sastav suspenzije po granulometrijskim frakcijama i u visini suspendiranja pojedinih granulometrijskih frakcija.

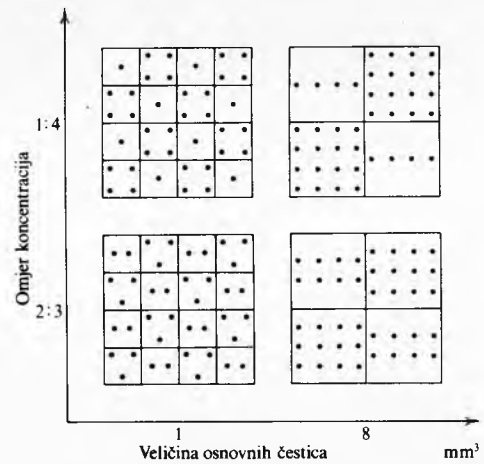
Ako se, pri kontinualnom miješanju, želi postići stacionarno stanje, sastavi ulazne i izlazne suspenzije moraju biti identični. Promjenom položaja mjesta odvođenja suspenzije iz miješalice mijenja se raspodjela koncentracije i time postiže novo stacionarno stanje (sl. 12b i 12c).

Pri suspendiranju smjese čestica treba podesiti brzinu vrtnje mješala prema česticama s najvećom brzinom taloženja. U gustim suspenzijama vlada učinak smetanog taloženja, koji olakšava suspendiranje smanjenjem brzine taloženja.

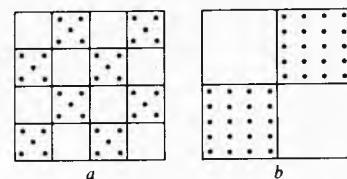
### MIJEŠANJE VRLO VISKOZNIH TVARI

U vrlo viskozne tvari ubrajaju se kapljevine s viskozitetom većim od 1Pas i žilave mase sve do vrlo žilavih, kao što su asfalti, gline, kitovi, plastične mase, guma.

Pod mješavinom se u tom području razumijeva smjesa dviju ili više različitih komponenata, koje su u masi raspodijeljene u većim ili manjim nakupinama, pri čemu svaka za sebe potpuno zadržava svoja svojstva. Od tih se mješavina nikad ne zahtijeva potpuna homogenost do molekulske raspodjele, kao pri miješanju niskoviskoznih kapljevine. Kvaliteta se tih mješavina ocjenjuje veličinom osnovnih čestica i odstupanja koncentracija u osnovnim česticama od srednje koncentracije ukupne smjese.



Sl. 13. Shema međuzavisnosti omjera koncentracija u osnovnim česticama vrlo viskozne dvokomponentne smjese i veličine osnovnih čestica



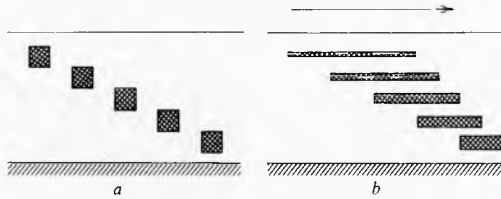
Sl. 14. Shema sastava vrlo viskozne dvokomponentne smjese po osnovnim česticama: a) smjesa s malim, b) s velikim česticama

Međuzavisnost se tih dvaju efekata u dvokomponentnoj smjesi može prikazati, npr., kao na sl. 13 gdje točkice prikazuju čestice jedne komponente, veliki kvadrati masu smjese, a manji unutar njih osnovne čestice. Srednja je koncentracija te komponente u tom prikazu 2,5 točkica u  $\text{mm}^3$ . Iz tog prikaza slijedi da je poželjno dobiti što sitnije osnovne čestice, jer su u njima odstupanja koncentracije od srednje vrijednosti manja.

Usitnjavanje se čestica postizava gibanjem dijelova mase jednih prema drugima, uzrokovanim gibanjem mješala. Promjena

se koncentracije unutar osnovnih čestica postiže jedino difuzijom. Međutim, u vrlo viskozim masama praktički nema difuzije, pa su osnovne čestice uglavnom sastavljene od čistih komponenata (sl. 14).

Budući da su u vrlo viskozim tvarima mehanizmi molekularne i vrtložne difuzije zanemarljivog utjecaja, miješanje se njihovih sustava odvija uglavnom laminarnim, slojevitim smicanjem. Pri tome slojevi pojedinih komponenata smjese postaju sve tanji (sl. 15). Kad oni postanu toliko tanki da se više ne zapažaju, dobiva se vizuelni efekt homogene smjese, što već može zadovoljavati zahtjeve kvalitete nekih proizvoda.



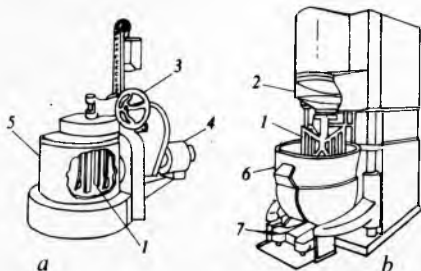
Sl. 15. Raslojavanje jedne u drugoj komponenti vrlo viskozne dvokomponentne smjese smicanjem slojeva: a prije, b poslije smicanja gornje plohe sloja udesno

Konstrukcija se strojeva za miješanje viskoznih pasta, plastičnih masa i gume više zasniva na rezultatima industrijskog iskustva nego na teoretskim razmatranjima. Svojstva se različitih materijala koji se miješaju mogu međusobno mnogo razlikovati. Čak i ista smjesa, koja je u početku miješanja praškasta, može tokom procesa dodatkom kapljevine postati pastozna i daljim miješanjem vrlo žilava. Za miješanje takvih materijala konstrukcija bi se miješalice trebala mijenjati tokom procesa, da bi najbolje odgovarala pojedinim fazama miješanja. Budući da to nije moguće, obično se izabire tip miješalice koji najbolje djeluje u najtežim uvjetima, a nije najprikladniji u ostalim fazama procesa. Optimum se obično nalazi kompromisnim rješenjima.

Miješalice za vrlo viskozne materijale miješaju direktnim djelovanjem mješala na materijal. Efekt se miješanja u njima ne prenosi na dijelove materijala u posudi udaljenije od mješala jer je pri tome djelovanje radijalne i aksijalne komponente gibanja neznatno, a miješanje se uglavnom ostvaruje djelovanjem tangencijalne komponente gibanja. Zbog toga se u tim miješalicama mješalo obično ili giblje (putuje) kroz masu, ili se masa privodi mješalu.

Najvažniji tipovi miješalica za vrlo viskozne tvari jesu miješalice za paste (s izmjenljivom posudom), diskontinualne gnjetalice, strojevi s valjcima i neke kontinualne miješalice.

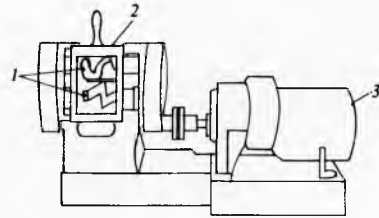
**Miješalice za paste** upotrebljavaju se za miješanje viskoznih kapljevine i rjeđih pasta u industriji naliča i prehrambenoj industriji. U jednom tipu takvih miješalica (sl. 16a) mješalo je od nekoliko vertikalnih, izvinutih traka i postavljeno je ekscentrično uz stijenku posude. Posuda leži na pokretljivoj postolju, koje rotira u smjeru obrnutom od smjera rotiranja mješala. Kad je miješanje završeno, mješalo se podigne, a posuda zamijeni drugom napunjenom novom masom.



Sl. 16. Neki tipovi miješalica za paste s izmjenljivom posudom: a mikser Pony, b miješalica za tijesto: 1 mješalo, 2 planetni prijenosnik, 3 podizač mješala, 4 motor, 5 rotirajuća izmjenjiva posuda, 6 obična izmjenjiva posuda, 7 kolica

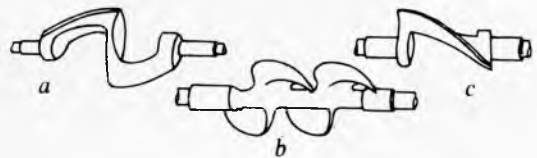
Neke od miješalica iz ove skupine imaju posude koje ne rotiraju, a mješalo im je također postavljeno ekscentrično, ali se uz rotiranje giblje još i precesijski uokolo oboda posude, te na taj način dolazi u kontakt s čitavim sadržajem posude (sl. 16b).

**Diskontinualne gnjetalice.** Pod gnjetenjem se razumijeva miješanje tjestastih i plastičnih masa. Pri tome se masa deformira tlačenjem, svijanjem i kidanjem. Za tu je operaciju potrebna mnogo veća snaga nego za miješanje kapljevine. Najobičnije su diskontinualne gnjetalice sa dva gnjetala, koja su postavljena horizontalno u korito pravokutnog presjeka sa dvocilindričnim dnom (sl. 17).



Sl. 17. Gnjetalica sa dva gnjetala. 1 sigma-gnjetala, 2 korito u iskrenutom položaju, 3 motor

Njihova gnjetala rotiraju u suprotnim smjerovima tako da guraju masu prema dnu korita, pri čemu je gnječe, trgaju i zatim vraćaju prema gore uz stijenke korita, pa je ponovno zahvaćaju. Brzine okretanja gnjetala obično su različite. Omjer je tih brzina od 1:1,5 do 1:2. Udaljenost gnjetala od cilindričnih stijenki korita vrlo je malena (~1 mm), tako da ona konstantno brišu tu površinu. Kroz nju se tokom rada obično dovodi ili odvodi toplina. Taj je tip miješalica prikladan za miješanje materijala unutar širokih granica viskoziteta. Po čvrstoći izvedbe i obliku, gnjetala se svrstavaju u tri grupe: gnjetalice za manje žilave, srednje žilave i vrlo žilave materijale. Najviše se razlikuju konstrukcijom gnjetala (sl. 18).



Sl. 18. Tipovi gnjetala: a sigma-gnjetalo, b dvokrako gnjetalo, c gnjetalo za drobljenje i gnjetenje najžilavijih masa

Najuobičajenije je *sigma-gnjetalo*, koje se upotrebljava za gnjetenje masa manje žilavosti. Rubovi mu mogu biti i nazubljeni, da se pojača učinak trganja materijala. *Dvokrako* je gnjetalo prikladno za uklanjanje praškastih i kapljevih komponenata u vrlo žilave materijale, kao što su plastične mase. Treći je tip gnjetala najčvršće konstrukcije i upotrebljava se za drobljenje i omekšavanje gume, te za miješanje najžilavijih plastičnih masa.

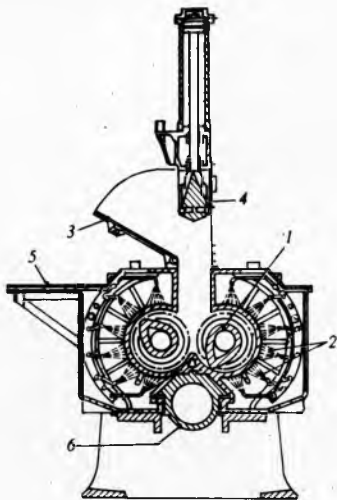
Sve gnjetalice iz ove grupe rade diskontinualno. Vrijeme gnjetanja jedne njihove šarže je 5...20 min. Ponekad imaju i uređaje za grijanje materijala koji se gnjete, ali najčešće imaju uređaje za hlađenje potrebno za odvođenje topline razvijene gnjetenjem.

Obično se prazne iskretanjem korita za 90°, pri čemu gnjetala ostaju u pogonu. U takvoj izvedbi samo je jedno gnjetalo priključeno spojkom na zagonski sklop, a drugo se zagoni posredstvom zupčanog prijenosnika ugrađenog s vanjske strane korita. U najmasivnijim izvedbama gnjetalica iz ove skupine, za vrlo žilave materijale, zagoni se posebno svako gnjetalo, a korito se prazni kroz otvor na dnu.

Jedna od najpoznatijih gnjetalica tog tipa, za miješanje najžilavijih materijala, kao što su guma i žilave plastične mase, jest *mikser Bambury* (sl. 19). On ima dva robusna, spiralno zavijena gnjetala u zatvorenom kućištu. Puni se odozgo, a za vrijeme miješanja u njemu se materijal drži pod tlakom pomoću hidrauličkog stapa. Prazni se odozdo. Za vrijeme rada hlade se



i kućišta i gnjetala, koja su zbog toga šuplja. Vrijeme je gnjetanja u mikseru Bambury mnogo kraće nego u običnim, otvorenim gnjetalicama.



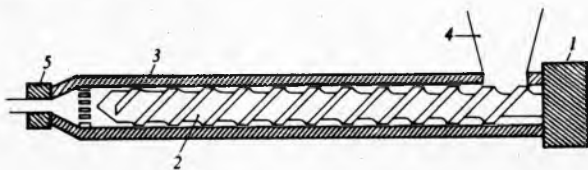
Sl. 19. Gnjetalica Bambury. 1 gnjetalo, 2 raspršivači vode za hlađenje, 3 usipni lijevak, 4 plutajući teg, 5 radna platforma, 6 klizni zatvarač ispusta

**Strojevi s valjcima.** Za homogeniziranje se naliča i sličnih proizvoda u industriji upotrebljavaju strojevi sa tri, četiri, ili pet valjaka (trovaljci, četverovaljci i peterovaljci), koji rotiraju različitim brzinama (sve većim od ulaza prema izlazu iz stroja), tako da se masa među valjcima miješa, a njene se čestice usitnjavaju.

Za miješanje se i homogeniziranje plastičnih masa i gume s različitim dodacima upotrebljavaju i horizontalni dvovaljci. Njihovi valjci rotiraju u suprotnim smjerovima, također različitim brzinama. Pri tome radnik ručno reže i prevrće masu te joj dodaje pojedine sastojke proizvoda. Rad je tih strojeva diskontinualan, a kvaliteta njihovih proizvoda zavisna od pažnje radnika, pa se upotrebljavaju sve manje.

**Kontinualne miješalice za žilave mase.** Miješalice koje rade diskontinualno nisu najprikladnije za kontinualne procese u kojima se nastoji održati najpovoljnije stacionarno stanje proizvodne linije. Za te su svrhe konstruirane kontinualne miješalice, koje ili miješaju samostalno, ili se ugrađuju u proizvodne linije između diskontinualnih miješalica i strojeva za dalju preradu mješavine. Najpoznatije diskontinualne miješalice za žilave mase, koje se često upotrebljavaju u preradi plastičnih masa, jesu ekstruderi i ko-kneaderi.

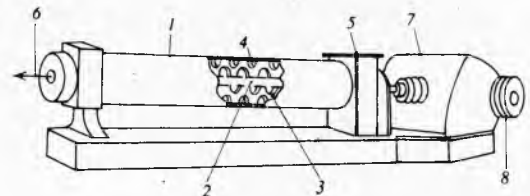
**Ekstruderi** (sl. 20) su strojevi koji imaju vratilo s kontinualnom spiralnom pužnicom u glatkom cilindričnom kućištu. Promjer je vratila sve veći, a korak njegove pužnice sve manji prema izlazu iz stroja.



Sl. 20. Princip konstrukcije ekstrudera. 1 zagonski sklop, 2 vratilo s pužnicom, 3 kućište, 4 usipni lijevak, 5 ispusna glava

Zbog toga se na njenom putu prema izlazu, rotacijom vratila povećava tlak u masi koja se miješa. Ako se mješavina direktno upućuje u finalnu obradu, izbrizgava se iz glave ekstrudera kao traka, a ako se skladišti kao poluproizvod za dalju preradu, istiskuje se kao snop kružnih profila, koji se zatim režu u granulatu s valjkastim česticama. Za uspješnije miješanje konstruirani su i ekstruderi sa dvije pužnice. Kućište se ekstrudera može grijati ili hladiti po segmentima.

**Ko-kneader** (engl. kneader *gnjetalica*, sl. 21) ima rotirajuće vratilo sa spiralno postavljenim, zakošenim zupcima. Njihov je sustav zapravo isprekidana pužnica, pa gura materijal prema ispustu. Vratilo je smješteno u cilindričnom kućištu, koje je iznutra također nazubljeno. Zupci se vratila giblje između zubaca kućišta. Uz rotiranje, vratilo se giblje i aksijalno, naprijed-natrag,



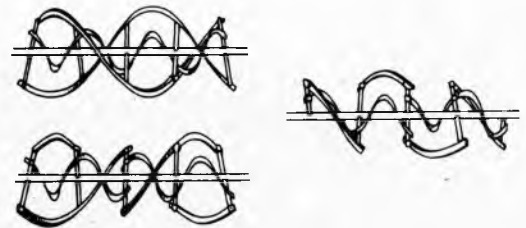
Sl. 21. Ko-kneader. 1 kućište, 2 vratilo, 3 zupci vratila, 4 stacionarni zupci, 5 usipni koš, 6 ispust, 7 prijenosnik, 8 zagonska remenica

što intenzivira miješanje. Ko-kneaderi mogu izmiješati i nekoliko tona vrlo žilavoga plastičnog ili gumenog materijala na sat.

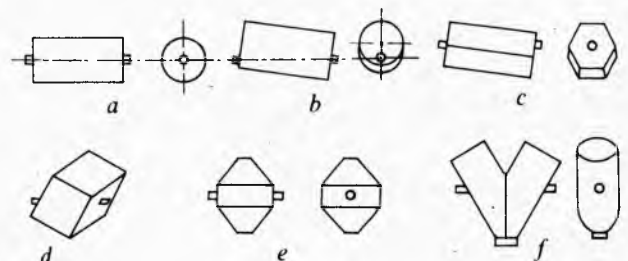
### MIJEŠANJE ČVRSTIH SIPKIH MATERIJALA

Mnogi od već opisanih strojeva za miješanje žilavih materijala mogu miješati i čvrste, sipke materijale. Međutim, oni nisu najprikladniji i obično su predimenzionirani za te svrhe, kako s obzirom na čvrstoću konstrukcije tako i s obzirom na utrošak snage. Specijalizirane miješalice za te svrhe jesu strojevi s helikoidalnim vrpčastim mješalima i rotirajuće posude za prevrtanje materijala.

**Miješalice s helikoidalnim, vrpčastim mješalima** imaju horizontalna korita u kojima rotiraju vratila s helikoidalno postavljenim vrpčama (sl. 22). Te vrpce prevrću materijal i pokreću ga u horizontalnom pravcu tamo-amo. Ti strojevi mogu raditi diskontinualno (šaržno) ili kontinualno, pri čemu je ulaz materijala na jednoj, a izlaz na drugoj strani korita. Utrošak je snage tih miješalica mnogo manji nego miješalica za vrlo viskozne materijale.



Sl. 22. Helikoidalna vrpčasta mješala



Sl. 23. Obrisi rotirajućih posuda za miješanje čvrstih sipkih materijala: a cilindrična horizontalna, b cilindrična koso položena, c heksagonalna, d kockasta, e dvostožasta, f dvo cilindrična posuda

**Rotirajuće posude** (sl. 23) prevrću materijal i miješaju ga također u horizontalnom pravcu. Mogu biti različitog oblika i postavljene horizontalno ili pod nekim kutom. Brzina vrtnje tih miješalica mora biti podešena tako da ne pređe granicu iznad koje se materijal priljubi uz stijenke zbog djelovanja centrifugalne sile. To ovisi o veličini i gustoći čestica. Ti stro-

jevi troše nešto manje snage nego miješalice sa vrpčastim mješalima i rade samo diskontinualno.

LIT.: W. J. Mead, Chemical process equipment. Reinhold Publishing Co., New York 1964. — W. M. Uhl, G. B. Gray, Mixing. Academic Press, London 1966. — J. Pauloussi, Die Ähnlichkeit in der physikalisch-technischen Forschung. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1971. — J. Perry, Chemical engineering handbook. McGraw-Hill Book Co., New York-San Francisco-Toronto-London-Sydney 1973.

M. Zglav

**MIKROSKOP**, optički instrument koji stvara povećanu sliku predmeta. Slika se može promatrati izravno, na ekranu za projiciranje, ili se može snimati fotografskim aparatom, filmskom ili televizijskom kamerom. Pri tom se primjenjuje svjetlost ili blisko ultraljubičasto i infracrveno zračenje. Uzorci mogu biti prozirni i neprozirni. Moć razlučivanja optičkog mikroskopa, a time i korisno povećanje, ograničeno je valnom duljinom upotrijebljene svjetlosti.

Naziv mikroskop potječe od grčkih riječi *μικρός* mikros malen i *σκοπέω* skopeo gledam.

Već je u starom vijeku bilo poznato povećavanje slike predmeta pomoću optičkih leća i staklenih kugla napunjenih vodom. Prvi zapis o tome iz 1000. g. opisuje pokuse Arapina Ibn Al-Haithama (polatinjenc Alhazen) s malim segmentima staklenih kugla. Engleski filozof i prirodoslovac R. Bacon otkrio je (1267) da mali segmenti staklenih kugla, kao stakla za povećavanje, pomažu osobama slabijeg vida. Tako su nastale naočale. Približno tri stoljeća poslije toga nema većih doprinosa u razvoju leća. Poslije tog razdoblja radilo se na sustavima za povećanje s dvije leće (leća bliža predmetu nazvana je *objektiv*, a druga, bliža promatraču, *okular*). To je osnova za složene današnje mikroskope. Ne zna se sa sigurnošću tko je pronalazač mikroskopa. Prema nekim izvorima smatra se da su to otac i sin, Hans i Zacharias Jansen iz Middelburga (Nizozemska, 1590) pronalazači teleskopa. Objektiv i okular nisu tada činili cjelovit sustav, ali je bilo poznato da se promjenom njihove međusobne udaljenosti teleskop može upotrijebiti i kao mikroskop. Prema drugim izvorima, za otkriće mikroskopa je zaslužan Cornelius Jacobszoon Drebbel (1572—1634) iz Alkmaara. U prvoj polovici XVII st., s razvojem leća s većom moći povećavanja, sve se više upotrebljavalo jednostavni mikroskop, nazvan *lupa*. U početku lupa se upotrebljavala više nego složeni mikroskop, jer je njegova upotreba bila ograničena zbog velikih kromatskih aberacija. A. van Leeuwenhoek (1632—1723), nizozemski brusač stakla, veoma je zaslužan za razvoj jednostavnih mikroskopa. On je lećom promjera 1 mm postigao povećanje do 270 puta i pomoću nje otkrio infuzorije, eritrocite, bakterije i dr. Dalja otkrića u anatomiji postigao je M. Malpighi (1628—1694), talijanski liječnik i prirodoslovac, koji se smatra i osnivačem mikroskopske anatomije. R. Hook (1635) konstruirao je složeni mikroskop veoma dobrih kvaliteta. On je prvi upotrijebio umjetno svjetlo, uljnu svjetiljku, kojom je preko staklene kugle ispunjene vodom i sabirne leće osvijetljavao uzorak. Tada nije bila poznata mogućnost otklanjanja kromatske aberacije. Zbog toga su se poboljšanja odnosila uglavnom na mehanički dio i način osvijetljavanja. Tako je Divine iz Rima konstruirao cjelovit mikroskopski sustav od više čvrsto povezanih leća. S. J. i J. J. Muschenbroek upotrijebili su sustav izmjenjivih leća različitih fokusa i poboljšali mehanički dio mikroskopa. C. A. Tortona primijenio je metodu prosvjetljavanja uzorka, a F. Bonnani, iz Italije, optičku klopku i uređaj za osvijetljavanje. N. Hartsoker, iz Nizozemske, konstruirao je mikroskop od dva spojena tubusa. U jednome su izmjenjive leće i zasun objektivna, a u drugome ostale leće i sustav za osvijetljavanje. Izoštava se pomoću navoja na tubusu. J. Marshall (oko 1700. god.) konstruirao je mikroskopski sustav koji se može zakretati i naginjati ovisno o promatranju uzorka. Sredinom XVIII st. prestaje dominacija jednostavnih mikroskopa nakon što su postavili teorijski temelji akromatizacije. L. Euler (1771) postavio je teorijsku osnovu akromata, a nakon toga je N. Fueb proračunao akromatski objektiv, a F. G. Beeldsnyder ga je prvi konstruirao. Novo razdoblje u razvoju tehničke optike otvorio je J. Fraunhofer (1787—1826). On je ispitivao svojstva stakala i proučavao utjecaj njihove kombinacije na disperziju svjetlosti. Definirao je standardne valne duljine (tzv. Fraunhoferove linije) kojima se opisuje disperzijsko svojstvo različitih vrsta stakla. Time je olakšano proračunavanje akromatskih sustava. Sellique (1824) zajedno s J. i C. Chevalierom (ocem i sinom) konstruirali su mikroskop od više parova akromatskih leća spojenih u nizu po prvi put kanadskim balzomom, čime su postigli znatna poboljšanja. G. B. Amici (1786—1863), osim slaganja akromatskih parova leća različitih žarišnih daljina u kompaktni sustav, načinio je i objektiv s korekcijom pogreške pokrovnog stakla. Njegovi suhi objektivni s polukuglastom prednjom lećom nadmašili su sve prijašnje objektivne. Također je prvi počeo upotrebljavati imerzijsku tekućinu. A. Ross (1837) uvodi korekcijske prstene za različite debljine pokrovnog stakla. Zahvaljujući svim tim poboljšanjima, jednostavni je mikroskop izgubio prednost i upotrebljavao se samo za slaba povećanja. Razvoj kemije pridonosi daljem razvoju mikroskopske tehnike, zahvaljujući bojilima kojima su se preparirali uzorci. Uvođenjem homogene uljne imerzijske tekućine i Abbeova aparata za osvijetljavanje postiže se znatno poboljšanje u mikroskopskoj tehnici.

Za dalja otkrića u citologiji, histologiji i bakteriologiji bili su potrebni mnogo kvalitetniji mikroskopski sustavi. Novo razdoblje u razvoju mikroskopske tehnike počinje pojavom njemačkog matematičara i fizičara E. Abbea (1840—1905), koji je razradio teoriju stvaranja slike mikroskopom. Potpuno je proračunao optički sustav i definirao moć razlučivanja mikroskopa kao funkciju valne duljine svjetlosti i numeričke aperture. Abbe upotrebljava i leće od specijalnih

kristala kao novu vrstu optičkog medija. Proračunao je i prvi apokromatski objektiv. Za razliku od akromatskog objektivna, koji je korigiran samo za dvije boje, apokromatski je korigiran za tri boje. Zahvaljujući Abbeu kao teoretičaru i C. Zeissu kao izvođaču mnogo su poboljšana optička svojstva mikroskopa i razradeni postupci za serijsku izradbu visokokvalitetnih mikroskopskih objektivna. Daljem poboljšanju mikroskopske slike pridonijela je upotreba zračenja kraćih valnih duljina, i to najprije ultraljubičastog, kasnije rendgenskog, a zatim slijedi i upotreba elektronskog snopa. Budući da obično staklo ne propušta ultraljubičasto zračenje, M. Rohr (1902) upotrijebio je specijalni objektiv od taljenog kremenca, korigiran samo za uski snop valnih duljina. Zbog toga se može upotrebljavati samo monokromatsko zračenje. Upotrebom zračenja valne duljine ~ 260 nm moć se razlučivanja udvostručuje. Počinje se upotrebljavati i tehnika s tamnim poljem. Tada u objektiv dolazi samo svjetlost s uzorka, a ne dopire izravno pobudno zračenje.

Poseban je postupak mikroskopije tamnog polja ultramikroskopija prema H. Siedentopfu i R. Zsigmondyju, koja je omogućila proučavanje koloida.

H. F. Talbot (1834) konstruirao je prvi polarizacijski mikroskop. Osnivačem polarizacijske mikroskopije neprozirnih uzoraka smatra se američki metalurg W. Campbell, koji je već 1906. sistematski istraživao rudače. Prvi takav mikroskop je razvio M. Berek (1914). Paralelno s polarizacijskom mikroskopijom razvijala se i mikroskopija metala. Već 1863. H. C. Sorby i F. H. Wenham razvijaju vertikalni iluminator. H. Le Chatelier razvija metalurški mikroskop inverznog tipa. Početkom XX st. smatralo se da je razvoj mikroskopije, a osobito mikroskopske optike, zaključen upotrebom apokromata i uljne imerzijske tekućine. Da to nije tako, pokazalo je otkriće faznog kontrasta, za koje je zaslužan nizozemski fizičar F. Zernike (Nobelova nagrada 1953). Zahvaljujući faznom kontrastu mogle su se prozirne žive stanice promatrati bez oštećenja.

Pri fotografiranju akromatima i apokromatima mogao se izoštriti samo središnji dio slike, dok je ostatak slike, zbog zakrivljenosti polja slike, ostao neoštar. H. Boegehold (1938) uspio je izravnati zakrivljenost polja slike. U tu svrhu su razvijeni planobjektivni kao što su planakromati i planapokromati. Od mikroskopskih postupaka koji su u posljednjim godinama imali osobito značenje treba još spomenuti fluorescentnu i interferentnu mikroskopiju te mikrofotometriju. Već na temelju prvih opažanja vlastite fluorescencije u ultraljubičastom mikroskopu izgradili su C. Reichert i O. Heimstädt (1911), te C. Zeiss i H. Lehmann (1913) prvi praktični fluorescentni mikroskop s električnim lukom kao svjetlosnim izvorom. Ta mikroskopska metoda omogućuje dokazivanje i veoma malih količina neke tvari koje bi fluorescirale osvijetljene zrakama kratkih valnih duljina (plavi i ultraljubičasti dio spektra). Budući da je vlastita fluorescencija neznatna, nisu dobivene svijetle fluorescentne slike. Ako, međutim, u uzorku ne postoje fluorescentne tvari, može se često preparat obogatiti fluorokromima, kako bi se povećala svjetlina slike, odnosno dokazala neka tvar u uzorku. S tim u vezi je uvođenje vitalne fluoresцентne mikroskopije (P. Ellinger i H. Hirt, 1929), fluorokromiranje (H. Haitinger, 1938), akridinoranž kao vitalni fluorokrom (S. Struger, 1944) i otkriće imuno-fluorescencije (A. H. Coons i M. H. Kaplan, 1950).

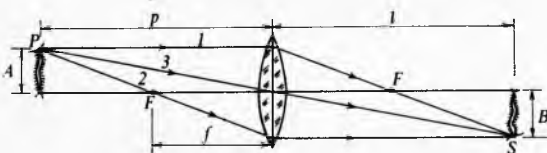
Interferentni mikroskop relativno je star; već je Sirks (1878) opisao prvi interferentni mikroskop za prolazno (transmitirano) svjetlo. Kasnije, otprilike tridesetih godina našeg stoljeća primjenjivana je interferentna mikroskopija za kontrolu obrađenih površina (interferentna mikroskopija neprozirnih uzoraka). Tek je pomoću novih postupaka za izradbu leća u posljednjih tridesetak godina omogućena konstrukcija interferentnih mikroskopa za prozirne i neprozirne uzorke.

## OPTIČKI SUSTAV MIKROSKOPA

Optičko povećavanje slika postiže se lećama i zrcalima. Obično se mikroskop tumači pomoću leća, a ne pomoću zrcala. To je vjerojatno zbog toga što su prvi jednostavni mikroskopi bili dioptrijski, tj. s lećama, a i zbog toga što je većina današnjih mikroskopa dioptrijskog tipa.

**Princip optičkog povećavanja.** Leće kao i zrcala mogu biti konvergentne i divergentne (v. *Optika*). Pomoću konvergentne leće može se preslikati promatrani predmet. Slika, što ovisi o udaljenosti leće od predmeta, može prema dimenzijama biti jednaka predmetu, manja ili veća od predmeta, a prema svojoj prirodi može biti realna (može se uhvatiti na zastoru) i virtualna (može se promatrati okom gledajući kroz leću).

Kad se želi dobiti realna povećana slika predmeta, on mora biti udaljen od leće jednu do dvije žarišne daljine. Slika je tada obrnuta (sl. 1). Omjer duljine  $B$  predmeta na slici i duljine predmeta  $A$  jednak je omjeru udaljenosti slike  $l$  i



Sl. 1. Optička shema stvaranja realne slike konvergentnom lećom. Leća je prikazana pojednostavnjeno kao tanka leća. Pomoću stvarnih leća slika se konstruira prema glavnoj ravni leće, ali je princip konstrukcije isti (v. *Optika*);  $P$  predmet,  $S$  slika,  $F$  žarište,  $f$  žarišna daljina,  $p$  udaljenost predmeta od leće,  $l$  udaljenost slike od leće,  $A$  visina predmeta,  $B$  visina slike