

Schwinger, 1949). Ni jedan od tih fenomena nije se mogao shvatiti u kvantnoj mehanici, gdje se ostalo na razini u kojoj nije u teoriju uključena mogućnost stvaranja i nestajanja čestica. U jeziku kvantne elektrodinamike fizikalni foton uključuje u sebi i bezbrojne virtualne parove elektron-pozitron, dok je elektron također okružen virtualnim fotonima i parovima, sve u neprekidnom međudjelovanju. Mnogobrojni pokusi u kojima se proučava međudjelovanje elektrona i fotona nisu još otkrili nikakvo neslaganje s kvantno-elektrodinamičkim teoretskim opisom, iako je već postignuta točnost od jedne desetisućinke od 1%. To je dovelo do nastojanja da se ideje kvantne teorije polja primijene i na druge procese. Njena nerelativistička verzija bila je bitna za razumijevanje već spomenutih mnogočestičnih fenomena. Važan sastojak današnje fizike su tzv. Feynmanovi dijagrami, slikoviti prikaz fizikalnih procesa u obliku simboličkog crteža kojemu se po jednostavnim pravilima mogu pridruživati odgovarajući matematički izrazi. Isto je tako koristan i pojam *S-matrice* (W. Heisenberg, 1943). Ta formulacija teorije želi raditi samo s eksperimentalno mjerljivim veličinama te se u njoj očituje uzročna povezanost fizikalnih događaja. Kvantna teorija polja je jezik koji moderna znanost upotrebljava u opisivanju i proučavanju elementarnih čestica. Već 1935 je H. Yukawa zaključio da kratki doseg nuklearnih sila upozorava na postojanje nove elementarne čestice, piona (C. M. G. Lattes, H. Muirhead, G. P. S. Ochiaiini i C. F. Powell, 1947) kojoj je mogao predvidjeti i masu. No, zamršeni nelinearni sustav operatorskih jednažbi kvantne teorije polja dozvoljava aproksimativna rješenja samo za slučaj dovoljno slabih međudjelovanja (elektrodinamika, slabe interakcije). Nesposobnost da se problem potpuno i dinamički riješi naglašava važnost proučavanja simetrija među elementarnim česticama. Otkriće izotopnog spina (W. Heisenberg, 1932), kvantnog broja stranosti (K. Nishijina 1953, M. Gell-Mann 1953) i tzv. SU(3) simetrije (Y. Neeman 1961; M. Gell-Mann 1961) te izučavanje općih zakona sačuvanja fizikalnih veličina, omogućilo je da se teoretski unaprijed predvidi postojanje mnogih novih čestica. Slično je u prošlom stoljeću Mendeljejevljevi periodni sustav elemenata upozorio na postojanje do tada nepoznatih elemenata. No, svijet elementarnih čestica još uvijek nije uhvaćen u teoretske sheme jer se neprestano otkrivaju nove neslućene čestice i nova neočekivana svojstva. Uz neočuvanje pariteta (tj. slabo međudjelovanje je u prostoru orijentirano; T. D. Lee i C. N. Yang 1956) otkrivena je i zagonetna vremenska neobratičnost nekih slabih procesa (raspad  $K^0$  mezona, 1964). Upotreba sve moćnijih i moćnijih akceleratora (v. *Akceleratori nuklearnih čestica*, TE 1, str. 39) znači promatranje tvari pod sve većim i većim povećanjem (u Hamiltonovom smislu tu postoji potpuna analogija s optičkim mikroskopom), u nadi da će se otkriti nešto novo, kao što se to do sada i događalo. Ima znakova da i subatomske čestice, protoni, pokazuju neku strukturu kada se promatraju pod snopom elektrona vrlo visoke energije (kratka valna duljina, silno povećanje), baš kao što je nekada i atom pokazao strukturu, kada ga je Rutherford «osvijetlio» snopom  $\alpha$ -čestica. No, poteškoće, nepotpunosti i nedorečenosti u razumijevanju prirode dozvoljavaju da se ozbiljno postavi pitanje nije li pragmatična metoda (oslanjanje na početne, općevrijedne zakonitosti) u fizici, kako ju je definitivno uobličio Newton, istrajala svoj vijek? Pokušaji stvaranja jedinstvene osnovne teorije prirode (W. Heisenberg 1954) daleko su još od uspjeha. Gravitacija, koja je od osnovne važnosti u astronomskim i kozmičkim razmjerima, zanemaruje se u atomskoj i subatomskoj fizici kao izvanredno slabo međudjelovanje (v. *Gravitacija*). Postoje ipak zanimljiva dodirna područja. Posljedica Einsteinovog principa ekvivalencije (A. Einstein 1907, 1911), predviđena promjena valne duljine (energije) elektromagnetskog zračenja u jakom gravitacijskom polju, testirana je i u laboratoriju na Zemlji. Mössbauerovo otkriće (R. L. Mössbauer 1957) da foton emitiran jezgrom koji je dio čvrstog tijela ne gubi energiju zbog odboja, omogućava izvanredno precizno mjerenje energije elektromagnetskog zračenja. Mogao se izmjeriti porast u energiji fotona koji pada u zemaljskom gravitacionom polju (R. V. Pound i J. L. Snider 1965). Sinteza neeuclidске geometrije gravitacije u općoj teoriji gravitacije (A. Einstein 1913) prisutna je kod mnogih spekulacija u suvremenoj astrofizici, kao što je na primjer nagađanje da bi neobične pulsirajuće zvijezde («pulsars», Sveučilište

u Cambridgeu 1967) mogle biti još odavno predviđene neutronske zvijezde (L. D. Landau 1934; T. Gold 1968).

**Tendencije razvoja.** Suvremena fizika je daleko od sigurnosti tzv. klasične fizike iz sedamdesetih godina prošlog stoljeća, kada se za jedan kratki trenutak činilo da su gotovo već dokućene i posljednje tajne svijeta. Obilje eksperimentalno-teoretskih spoznaja, od kojih su u ovom prikazu mogle samo neke biti ilustrativno navedene, pokazuje da iako se dosta dobro razumije svijet atoma, u svijet još manjih dimenzija tek se zakoračilo. Fizika u svom eksperimentalno-materijalističkom pristupu izučavanja svijeta nije definicijsko učenje. U njenoj se znanstvenoj metodi želi razumjeti i ustrojstvo i rad mehanizma svijeta, kako bi se on čovječjom voljom mogao iskoristiti i kako bi se moglo na njega utjecati. U tom smislu ova pustolovina ljudskog duha koja se naziva fizikom začela se još s prvom vatrom pračovjeka.

D. Tadić

LIT.: E. Mach, Die Mechanik in ihrer Entwicklung, Leipzig 1883. — J. Jeans, Fizika kroz vekove (Prevod), Beograd 1952. — П. С. Кудрявцев, История физики, Москва 1948. — M. Laue, History of physics, New York 1950. — R. Taton, Histoire générale des sciences, T. I—IV, Paris 1957. — G. Holton, D. Roller, Foundations of modern physical science, Reading, Mass. 1959. — E. Whittaker, A history of the theories of aether and electricity, Vol. I i II, New York 1960. — M. Fierz, V. F. Weisskopf, Theoretical physics in the twentieth century, New York 1960. — Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, Теория поля, Москва 1960. — B. Cohen, Les origines de la physique moderne, Paris 1960. — J. Supek, Teorijska fizika i struktura materije I i II, Zagreb 1960—1963. — W. Heisenberg, Slika svijeta suvremene fizike (prijevod), Zagreb 1961. — I. Supek, Moderna fizika i struktura materije, Zagreb 1965. — M. Gliozzi, Storia della fisica, Torino 1965. — Max Jammer, The conceptual development of quantum mechanics, New York 1966. — Б. Г. Кузнецов, Развитие физических идей от Галилея до Эйнштейна, Москва 1966. — Е. Н. Уиттман, Quantum physics (Berkeley physics course, Vol. 4), New York 1967. — J. Perlman, The atom and the universe, Belmont, Cal. 1970. — W. H. Cropper, The quantum physicists, New York, London, Toronto 1970. — В. Г. Соловьев, Теория сложных ядер, Москва 1971. — L. C. L. Yan, Elementary particles, New York, London 1971. — D. Webber, Modern physics, Middlesex 1971. — A. Isaacs, Introducing science, Middlesex 1972. — D. Bohm, Uzročnost i slučajnost u savremenoj fizici (prijevod), Beograd 1972. — A. C. Давыдов, Квантовая механика, Москва 1973. — R. Bošković, Teorija prirodne filozofije (pretkisak i prijevod), Zagreb 1974.

Ž. Dadić D. Tadić

**FLOTACIJA**, postupak za odvajanje korisnih od nekorisnih komponenata u čvrstih materija, najčešće mineralnih sirovina, pomoću zračnih mjehura u vodi. Zasniva se na razlikama u kvašljivosti tih komponenata, pri čemu se pod kvašljivošću razumijeva intenzitet hidrofilije, odn. prijemljivosti neke površine za vodu (v. *Detergenti*, TE 3, 248, i *Emulgiranje*, str. 331). Čestice korisnih komponenata obično su nekvašljive ili «masne» (hidrofobne), dok su nekorisne (jalovinske) komponente kvašljive (hidrofilne). Uvedu li se u vodu s fino samljevenim raznovrsnim komponenatama zračni mjehuri, hidrofobne će čestice za njih prionuti i s njima isplivati («isflotirati»), a hidrofilne će ostati u suspenziji (*pulpi*). Na površini pulpe obrazovat će se pjena koja se u obliku *preliva* kao (obično) korisni *koncentrat* skida s površine, a na dnu pulpe skuplja se *otok* koji se ili odbacuje kao nekorisna jalovina ili se, kao međuprodukt, dalje preraduje. Kako svojstva hidrofobnosti, odn. hidrofilnosti mahom nisu dovoljno izražena, ona se u procesu flotacije reguliraju (pojačavaju ili slabe) prema potrebi, i to dodavanjem posebnih kemikalija, *reagenata*; ovamo se ubrajaju i reagenti za stabilizaciju mjehurâ, tzv. *pjenjivači*. Osim ove standardne *pjenaste flotacije* razvijene su za neke specifične slučajeve i posebne flotacijske varijante koje će biti opisane dalje.

**Primjena flotacije.** Flotacija je danas najvažniji oplemenjivački postupak za obradu mineralnih sirovina, osobito za sulfidne minerale obojenih metala koji se gotovo u cijelosti dobivaju flotacijom. To su minerali bakra (halkopirit, halkozin, burnonit, bornit, kovelin, enargit, tetraedrit, tenantit), te olova i cinka (galenit, sfalerit, marmatit). Ali i sulfidi željeza i arsena (pirit, pirotin, arsenopirit, lelingit, realgar, auripigment), zatim minerali nikla i kobalta, žive, antimona i molibdena kao i minerali zlata i srebra (kalaverit, silvanit, nadagit, argentit, pirargirit, prustit) dobivaju se danas pretežno postupkom flotacije. Isto tako, flotacija je veoma važan postupak u dobivanju oksidâ željeza (magnetita, hematita, limonita), bakra (kuprita), olova (vulfenita), mangana, titana, kroma, kositra, kao i ostalih kisikovih spojeva teških metala, tj. karbonata, sulfata, fosfata, silikata, molibdata, volframata, vanadata... Pored toga, flotacijom se dobivaju sve veće količine različitih nemetala, topljivih soli i ugljena.

U pogledu intimosraslih mineralnih sirovina općenito, a to su gotovo sve rude i mnogi nemetali, bez flotacije se danas industrija ne bi mogla opskrbiti neophodno potrebnim sirovinama.

Računa se da količina mineralnih sirovina dobivenih flotacijskim putem danas iznosi znatno više od milijardu tona godišnje. Što se tiče bakra, olova, cinka, molibdena, antimona i nikla, oko 95% svjetske proizvodnje ovih metala osniva se na flotaciji.

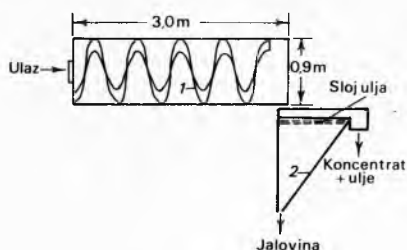
Osim u rudarstvu, flotacija se primjenjuje i u geologiji, hidro-metalurgiji, pirometalurgiji, kemijskoj industriji, industriji građevinskog materijala, medicini, biologiji, prehrambenoj tehnologiji i mnogim drugim industrijskim i naučnim djelatnostima. Od mnogih konkretnih primjera takve primjene mogu se navesti sljedeći: čišćenje kriolita od čestica ugljena i aluminijuma u industriji aluminijuma, razdvajanje amonijum-klorida i natrijum-bikarbonata u proizvodnji sode, dobivanje bitumena iz naftnih bušotina, sortiranje čestica iz ionskih razmjenjivača, čišćenja nuklearnog goriva, čišćenje otpadnog papira od štamparske boje, tinte itd., izdvajanje srebra iz fotografskih otopina, dobivanje kaučuka iz biljnih sirovina (mlječičke, npr.), sortiranje tekstilnih vlakana, pigmentata i umjetne svile, čišćenje šećerne pulpe od čvrstih primjesa, čišćenje graška prije konzerviranja, selektivno sortiranje sjemenja, uklanjanje glavnice iz raži kao i opni u industriji pšeničnog brašna, čišćenje gume za žvakanje od neželjenih primjesa, koncentracija razblaženih otopina hemoglobina, razdvajanje različitih bakterija (npr. želučanih bakterija od Kochovih bacila), žetva algi iz njihovih kultura.

Flotacija je veoma važan postupak i u čišćenju otpadnih voda, npr. u industriji nafte, prehrambenoj industriji (izdvajanje mliječnih proteina), zatim za izdvajanje naftalina iz otpadnih voda koksara, te mazivog ulja iz otpadnih voda čeličana.

Može se sa sigurnošću očekivati da će se područje primjene flotacije širiti i dalje, već i zato što se, za razliku od pristupa u većine ostalih oplemenjivačkih postupaka, u flotaciji ne koriste imanentna svojstva sirovine već se na sirovinu djeluje samo površinski, i to tako što se pomoću specifičnih reagenata na površini čestica *umjetno* izazivaju tek *privremena* svojstva koja ne mijenjaju unutrašnju strukturu sirovine.

Flotacija je zapravo najmlađi oplemenjivački postupak. Njena industrijska primjena u svjetskim razmjerima datira od dvadesetih godina ovog stoljeća, iako prvi ostvareni patenti potječu s kraja prošlog stoljeća, a već stari Grci spominju neke postupke koji se mogu uzeti kao daleke preteče flotacije. Tako Herodot, oko 430 pr. n. e., spominje kako su stanovnici Libije namašćenim perima vadili zlatna zrnca iz mulja ili pijeska, a Aristotel, oko 350 pr. n. e., čak opisuje postupak po kome se iz olovnastog mulja (kod njega, »molybdaene») mogu izvući na površinu olovne materije u vidu pjene ako se smjesi doda ulja i u nju se uduva zrak.

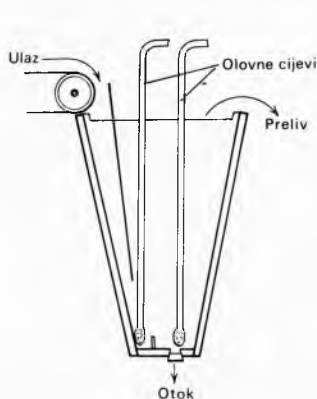
Dalje etape razvoja flotacije označavaju ovi datumi. 1860 Englez Haynes patentira postupak po kome se isitnjena ruda i ulje (katran od ugljena) miješaju u omjeru 1 : 6, čime se dobiva tijesto iz kog se vodom odstranjuju prateći minerali. 1877 braća Bessel iz Drezdena patentiraju postupak za dobivanje grafit: isitnjena se ruda miješa s uljem pa se doda voda i mješavina se prokuha. Kuhanjem nastali zračni mjehuri nose grafitne čestice na površinu dok jalovina ostaje na dnu. Ovdje se već nazire princip moderne flotacije, ali pronalazači nisu shvatili domet svog izuma, pa je ovaj postupak opet pao u zaborav. 1885 dr. Everson iz Chicaga prijavljuje patent na ime svoje ženske Carrie po kome se iz tijesta od rude i ulja, uz dodatak sumpornom kiselinom zakiseljene vode, prateća stijenja odstranjuju vodom; u stvari, to je poboljšan Haynesov patent, ali važan zbog ideje da se djelotvornost može poboljšati radom u kiseloj sredini. Prvi kontinuirani i stvarno primijenjeni postupak razradio je Englez Elmore 1898. Uredaj, prikazan na sl. 1, davao je i do 50 t/d i bio je godinama u upotrebi na rudnicima



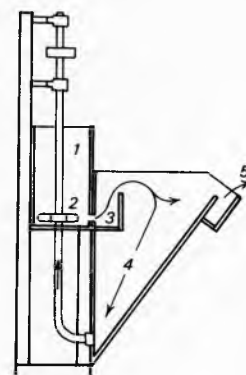
Sl. 1. Aparat za stariji (ekstrakcijski) Elmoreov postupak flotacije

srebronosnog i zlatonosnog bakra u Walesu. Na -0,5 mm samljevana ruda propuštala se skupa s gustim loživim uljem kroz bubanj sa spiralom 1 u tzv. šiljasti sanduk 2 u kome se nalazila voda. Iz sanduka se ulje s mineralnim sulfidima prelivalo kao koncentrat, dok se jalovina ispuštala pri dnu. 1902 javlja se prvi proces bez upotrebe ulja. Te godine Australci Potter i Delprat sjedinjuju svoje napore radi spasavanja rudnika olova i cinka Broken Hill, gdje se, u gravitacijskoj separaciji, gubio sav cink i 30-40% olova i srebra, pa je prerada golemih starih jalovišta postalo životno pitanje rudnika. Princip novog postupka sastojao se u tome da se prilikom ubacivanja rude u zakiseljenu vruću vodu (~ 90 °C) iz karbonatske stijene izdvajaju mjehuri ugljične kiseline koji sa sobom nose čestice korisne komponente. Aparat je shematski prikazan na sl. 2. To je sanduk od lijevanog željeza ili od drveta obloženo olovnim limom. Pulpa se grijala parom, a sadržavala je ~2% sumporne kiseline što se uvodila olovnim cijevima odozgo. Postupak je spasio Broken Hill, te se po njemu godinama preradivala količina ~ 1000 t/d. 1905 firma Minerals Separation, Ltd., London, dobiva tzv.

bazisni patent što su ga razradili njeni suosnivači Sulman, Picard i Ballot. Patent je godinama osiguravao imaicima monopolski položaj, a sastojao se u tome da se pulpi dodaje najviše 0,1% ulja, ne više, a mehaničkom se agitacijom ubacuje zrak koji, razbijen u bezbroj sitnih mjehura, obrazuje pjenu matovarenu sulfidima. Pogodan aparat za taj postupak izraden je tek 1909. To je znamenita MS-čelija što ju je konstruirao T. J. Hoover; prikazana je na sl. 3. Usitnjena ruda, s približno četverostrukom količinom vode, dodaje se u agitacijsku ko-



Sl. 2. Aparat Potter-Delprat



Sl. 3. Aparat Minerals Separation Standard

moru 1, pa se tu vijkom 2 izmiješa sa zrakom i uljem. Nastala pjena prolazi kroz otvor 3 u šiljasti sanduk 4, iz koga se, kao koncentrat, preliva u odvodni zlijeb 5. U šiljastom sanduku 4 potonula zrna vijak 2 opet uvlači u komoru 1, pa se tako dobiva zatvorena putanja pulpe. Aparat je, s velikim uspjehom, primijenjen prvi put opet u australskom Broken Hillu, a upotrebljava se još i danas širom svijeta u oplemenjivačkim laboratorijima.

Nastojanja su sada išla za tim da se nade reagenti koji će dati najčistiji koncentrat i najbolje iskorišćenje. Velik je uspjeh (1921) postigao Amerikanac Perkins koji je našao da se dotada upotrebljavana netopljiva ulja mogu zamijeniti djelotvornijim topljivim organskim spojevima što sadrže dvovalentni sumpor, te da se flotacija mahom bolje odvija u alkalnoj nego u kiseloj sredini. Ovaj pronalazak kao i 1945 Kellera i Lewisa dodijeljeni patent za primjenu, konkretno, ksantogenata (ksantata), mogu se uzeti kao prava prekretnica u razvoju flotacije, jer se time čisto empirijski uljni postupak počeo pretvarati u ponovljivi fizičko-kemijski proces. Kako su već godine 1922 Amerikanci Sheridan i Griswold udarili temelje *selektivnoj flotaciji*, našavši da cijanidi »otrovno« djeluju na sfalerit ali ne i na također u pulpi prisutni galenit, može se uzeti da počeci moderne flotacije padaju u prvu polovinu dvadesetih godina. U to se doba javlja i flotacija ugljena, dok se nemetalne sirovine u većem obimu i s dobrim uspjehom počinju flotirati tek za vrijeme drugog svjetskog rata i poslije njega.

**Teorija flotacije.** Teorijske osnove flotacije još nisu potpuno objašnjene. To je prvenstveno posljedica okolnosti što se flotacija odvija u veoma kompleksnoj sredini; uz učešće triju faza (čvrste, tekuće i plinovite) i cijelog niza anizotropnih komponenata što uzajamno djeluju reakcijama koje se ne mogu ispitati dovoljnom sigurnošću i točnošću, već i zato što se prilike u flotacijskoj pulpi neprestano mijenjaju. Flotacijska je pulpa s jedne strane suspenzija sirovinskih čestica koje su sve u jačoj ili slabijoj kemijskoj vezi sa česticom na koju želimo djelovati, a s druge je strane u njoj smjesa čvrstih čestica veoma raznolike prirode. Te čvrste čestice dolaze iz korišćenje industrijske vode, različite su veličine, mogu pripadati samoj obrađivanoj sirovini, mogu potjecati iz neke prethodne oplemenjivačke faze (npr. iz gravitacijske koncentracije ili iz cijanizacije), a mogu biti i biljni ili životinjski ekstrakti. U suspenziji osim toga ima taloga nastalih reakcijom među ottopljenim sastojcima sirovine i neotopljenim organskim sastojcima, od kojih je najvažnije mazivo što ga je sirovina pokupila putem do flotacijskih uređaja. Mnogi od ovih ingredijenata mogu ulaziti u reakcije kako međusobno tako i s flotacijskim reagentima. Takve reakcije mogu izmijeniti prvobitnu površinu čestice koju želimo flotirati, a mogu prouzrokovati i mnoge druge nepredvidive, uglavnom štetne, pojave.

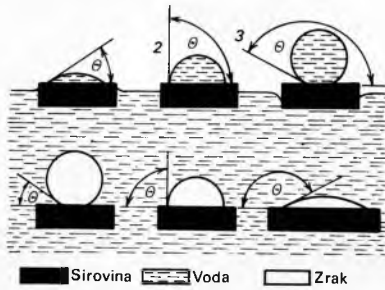
Nekada se smatralo da je tzv. *kontaktni kut* pouzdano mjerilo za flotabilnost neke sirovine. Kontaktni je kut  $\theta$  u načelu, indeks za kvašljivost; to je kut što ga zatvara površina čvrste čestice (minerala) i tangenta na površinu tekućine u točki kontakta minerala i tekućine, s tim da se kut uvijek ima mjeriti preko tekućine; v. sl. 4.

Kut  $\theta$  može imati vrijednosti  $0 \dots 180^\circ$ . Što manji  $\theta$  to veća kvašljivost; s porastom  $\theta$  voda se više razlijeva po površini čestice. Prema tome, za flotaciju je potreban što veći  $\theta$ ; maksimalna će se hidrofobnost postići pri  $\theta = 180^\circ$  (primjer 3) jer u tom slučaju voda se uopće neće razliti po površini (potpuna nekvašljivost).

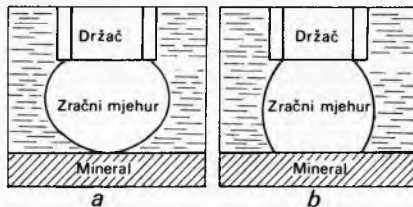
Kontaktni se kut može mjeriti na različite načine; najviše se mjeri tako da se pomoću držača na površinu minerala pažljivim pritiskom nanese zračni mjehur koji će za nju prionuti ako je hidrofobna (sl. 5).

Ipak, kontaktni kut može poslužiti samo kao općenita indikacija o flotabilnosti neke sirovine. Da bi se mogao izmjeriti, površina čestice mora biti krajnje čista, a to je gotovo nemoguće postići. Površina je mahom onečišćena (npr. oksidacijom, adsorpcijskim ili desorpcijskim procesima i dr.), a može biti i heterogena, hrpava, nagnuta itd.

Očevidno je, međutim, da će čestica flotirati ako dovoljno čvrsto prione za zračni mjehur. Sve radne manipulacije u flotaciji imaju svrhu da se taj temeljni fenomen ostvari. Dva su osnovna preduvjeta da do njega dođe: čestica mora biti dovoljno sitna i čestica mora biti pripremljena za prijanjanje.



Sl. 4. Kontaktni kut

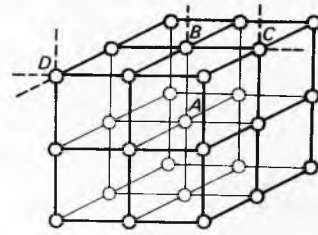
Sl. 5. Postupak za mjerenje kontaktnog kuta. a Galenit u čistoj vodi ( $\theta = 0^\circ$ ), b galenit u otopini etil-ksantata ( $\theta = 60^\circ$ )

Prvi preduvjet obično, ali ne uvijek, ispunjava se mljevenjem sirovine, dakle, prije samog flotiranja, pa čestica dolazi u proces dovoljno isitnjena. Čestica ne smije biti prevelika jer prosječna veličina zračnih mjehura ne prelazi 0,8·0,9 mm u mehaničkih, odn. 2 mm u pneumatskih flotacijskih mašina (v. dalje), pa velike (i teške) čestice mjehur ne bi mogao iznijeti na površinu pulpe. Osim toga, da bi se čestice korisne komponente oslobodile iz stijenske matrice, mljevenje obično mora biti dalekosežno, pa i zato u flotaciju ne dolaze krupne čestice. Za flotaciju dopuštena veličina čestice uglavnom je u skladu sa gustoćom sirovine: za sirovine gustoće manje od 3 g/cm<sup>3</sup> (npr. ugljen, halogenidi, neki silikati, sumpor i dr.) maksimalna se veličina može uzeti do 3 mm (optimalna, 0,5·2 mm), a za sirovine gustoće veće od 3 g/cm<sup>3</sup> (npr. metalni sulfidi) do 0,3·0,6 mm (optimalna, 0,05·0,15 mm). Donja granica nije strogo određena, ali ne bi trebalo da pređe 0,02 mm za sirovine veće gustoće, a 0,2 mm za sirovine manje gustoće. Čestice < 5 μm praktično ne flotiraju u uobičajenoj pjenastoj flotaciji, ali postoji mogućnost da se prerade u tzv. aglomeracijskoj flotaciji.

S obzirom na složenost procesa, priprema čestice za prijanjanje — drugi preduvjet za realizaciju flotacije — sastoji se od nekoliko faza od kojih svaka za sebe iziskuje poseban prikaz i objašnjenje. Faze su slijedeće: kolekcioniranje, kondicioniranje, tvorba pjene; u praksi, ove se faze obično odvijaju istovremeno.

Kolekcioniranje je dodavanje kolektora, reagenta kome je svrha da česticu što treba da ispliva presvuče hidrofobnom opnom. Čestica mora biti hidrofobna («vodoodbojna») jer će samo tada, jer je «masna», prionuti za zračni mjehur. Ukoliko je čestica po prirodi hidrofobna, dodavanje kolektora neće biti potrebno. Međutim, takvu «prirodnu flotabilnost» imaju samo ugljeni i nekoliko anorganskih materija: sumpor, grafit, jod, talk, molibdenit, borna kiselina. Sve se druge materije moraju kolekcionirati ukoliko ih želimo flotirati. Ova se situacija donekle može objasniti karakteristikama kristalne strukture pojedinih minerala.

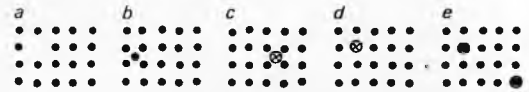
Između atoma u unutrašnjosti kristalne rešetke (A na sl. 6) i njegove okoline postoji jednako energetsko međudjelovanje u



Sl. 6. Zasićenost atoma u kristalnoj rešetki s obzirom na položaj. Puna crta — zasićena veza, crtkano — nezasićena veza

svim smjerovima, on je — može se reći — zasićen. Atomi na površini kristala, naprotiv, obrazuju površinski sloj koji, zbog razlika u energetskim odnosima između tih atoma i njihove okoline unutar kristala i izvan njega, raspolaze izvjesnim viškom energije, tzv. slobodnom površinskom energijom. Tako atom D na sl. 6 ima najveći broj nezasićenih veza, atom C nešto manje, a atom B najmanje; obrnutim redom, od B prema D, raste intenzitet njihove adsorpcijske sposobnosti, u slučaju flotacije prema vodi. A s vodom će tu mineral doći u dodir već prilikom mokrog mljevenja, tj. prilikom razaranja njegove unutrašnje veze, odnosno ubrzanja tvorbe novih slobodnih ploha, bridova i uglova. Osim toga, na sl. 6 prikazan je idealan kristal, bez tzv. defekata, dok realni kristali imaju defekte u rešetki. Ti su defekti (sl. 7) također, kao i atomi na površini kristala, povlašćene točke za adsorpciju.

Prije dodavanja kolektora, adsorpcijom vode na slobodnim ploham i zatim njezinim sidrenjem na mjestu nezasićenih atoma i kristalnih defekata za vrijeme mokrog mljevenja, čestica postaje hidrofилна, dakle neflotabilna. Da bi flotirala, mora se učiniti hidrofobnom, s tim što ta hidrofobizacija mora biti selektivna. Ona smije obuhvatiti samo čestice korisne komponente (budućeg koncentrata), dok čestice jalovine treba da ostanu hidrofилne. U tu se svrhu dodaju kolektori.



Sl. 7. Defekti kristalne rešetke. a Prazan čvor, b vlastiti atom među čvorovima, c strani atom među čvorovima, d strani atom na mjestu vlastitog atoma, e ion u normalnom položaju, ali s anomalnim nabojem

Kao kolektori se danas upotrebljavaju organski spojevi heteropolarne (polarno-nepolarne) strukture, ali se u najnovije vrijeme počinju primjenjivati i nepolarni (apolarni) reagenti kao kolektori. Od heteropolarnih daleko su najvažniji ionogeni, dok za neionogene još nema pouzdanih podataka o njihovoj uspješnoj primjeni u industrijskom opsegu. Nepolarni kolektori dolaze danas u obzir uglavnom samo u flotaciji minerala s prirod-

K ——— S ——— C ——— O		$\begin{array}{ccccccc} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \\ &   &   &   &   &   & \\ \text{—} & \text{C} & \text{—} & \text{C} & \text{—} & \text{C} & \text{—} & \text{C} & \text{—} & \text{C} & \text{—} & \text{H} \\ &   &   &   &   &   & \\ & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \end{array}$
Polarna grupa		Nepolarna grupa
Hidrofилна		Hidrofobna
Aerofobna		Aerofилна
Reaktivna		Neaktivna (reakcijski troma)
Kation	Anion	
Pozitivno nabijeni metalni ion	Negativno nabijeni atomski kompleks	Ugljikovodični radikal

Sl. 8. Molekula K-amil-ksantata sa svojstvima strukturnih elemenata

nom flotabilnošću i, ponekad, kao dopunski pjenušavci. Ionogeni se kolektori dijele na anionske i kationske, prema tome gdje im se nalazi nepolarna grupa, u anionu ili kationu. Važniji su anionski kolektori, u koje spadaju sulfhidrilni i oksidrilni kolektori, u zavisnosti od toga kako im je kation spojen s nepolarnom grupom (preko atoma S ili O). U tabl. 1 dat je pregled najviše upotrebljivanih kolektora, s primjerima primjene, a u tabl. 2 navedeni su najvažniji ionogeni kolektori.

Tablica 1  
PREGLED FLOTACIJSKIH KOLEKTORA

Kolektori			Primjena u flotaciji	
Heteropolarni	Ionogeni	Anionski	ksantati	sulfidi, plem. metali, oksidi nakon sulfidiranja
			aerofloti	sulfidi
			masne kiseline	nemetali (silikati, fosfati, fluorit, barit), oksidi (željezni i manganski), kasiterit, šelit
			sapuni	kao pod masne kiseline
			talovo ulje	kvarc, nemetali općenito
		Kationski	amini	silvin, kvarc, nemetali općenito, oksidi cinka
Neionogeni	alkoholi, fenoli	kameni ugljen, grafit		
Nepolarni		netopljiva ulja (plinska maziva i sl.), neionogeni tenzidi	prirnodnoflotabilne sirovine (ugljen, grafit, sumpor, molibdenit i dr.); aglomeracijska flotacija	

Tablica 2  
NAJVAŽNIJI IONOGENI KOLEKTORI

ANIONSKI KOLEKTORI	
<i>Sulfhidrilni kolektori</i>	
Ksantati	$\left[ \begin{array}{c} \text{R}-\text{O}-\text{C}-\text{S} \\ \parallel \\ \text{S} \end{array} \right]^{-} \text{Na}^{+}$
Alkili i arilni ditiofosfati (aerofloti, fozokrezoli)	$\left[ \begin{array}{c} \text{R}-\text{O} \\ \diagdown \\ \text{P}-\text{S} \\ \diagup \\ \text{R}-\text{O} \\ \parallel \\ \text{S} \end{array} \right]^{-} \text{Na}^{+}$
<i>Oksidrilni kolektori</i>	
Karboksilati (masne kiseline, sapuni)	$\left[ \begin{array}{c} \text{R}-\text{C}-\text{O} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array} \right]^{-} \text{Na}^{+}$
Alkilsulfati	$\left[ \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{R}-\text{O}-\text{O}-\text{O} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array} \right]^{-} \text{Na}^{+}$
Alkilsulfonati	$\left[ \begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{R}-\text{S}-\text{O} \\ \parallel \\ \text{O} \end{array} \right]^{-} \text{Na}^{+}$
KATIONSKI KOLEKTORI	
Amni	$\left[ \begin{array}{c} \text{H} \\   \\ \text{R}-\text{N}-\text{H} \\   \\ \text{H} \end{array} \right]^{+} \text{Cl}^{-}$

Od navedenih kolektora najvažniji su ksantati, jer su to glavni kolektori za flotaciju metalnih sulfida kao i oksidnih minerala olova i srebra. Najviše se upotrebljavaju alkalijski ksantati s dužinom ugljikovodičnog lanca od C<sub>2</sub> do C<sub>6</sub>. Strukturna formula na primjer kalijum-amil-ksantata s odgovarajućim svojstvima pojedinih dijelova data je na sl. 8.

Prilikom kontakta kolektorā i česticā, polarna, nezasićena i zato aktivna, grupa kolektora adsorbirat će se na odgovarajućim nezasićenim dijelovima čestice, potiskujući s tih mjesta ranije

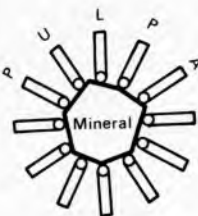
adsorbirane molekule vode. Pri tom će se kolektor orijentirati tako da će se njegov drugi, nepolarni, dakle, hidrofobni dio usmjeriti u pravcu pulpe. Na taj će način cio agregat postati hidrofoban (sl. 9).

Uspjeh hidrofobizacije čestice kolektorom zavisi u prvom redu od kristalne strukture minerala. Što gušća kristalna rešetka to jača polarnost, odn. to čvršća fiksacija adsorbirane molekule adsorbata, i obratno. Sulfidni minerali, s kubičnom rešetkom, tj. s gustim slaganjem, čvršće drže vodu od minerala sa slojnom rešetkom, kakvi su, na primjer, grafit, molibdenit, liskun i dr. To znači da će i za potiskivanje vode s površine minerala s kubičnom rešetkom, tj. s gustim slaganjem (pakovanjem), biti potrebna jača snaga, odn. adsorbat jače polarnosti nego za potiskivanje vode s površine minerala sa slojnom rešetkom, tj. sa samo slabim međumolekularnim (van der Waalsovim) silama. Zato se za kolekcioniranje sulfidnih minerala moraju upotrijebiti jače polarni kolektori, npr. ksantati, dok se prirodno hidrofobni minerali mogu kolekcionirati već i nepolarnim uljima, a katkada uopće nije ni potreban kolektor već je dovoljno i samo dodavanje pjenušavaca.

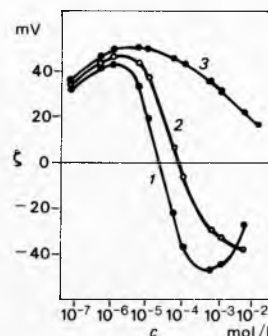
U međufaznom području mineral-voda djeluju i električne sile. Ionizirana čvrsta čestica okružena je ionima tekućine nabijenim suprotno od površine čestice. Iz hidraulike je poznato da će se prilikom kretanja čvrste čestice kroz tekućinu unutrašnji sloj tekućine što obavija česticu kretati skupa s njom. Ionizirana će čestica tako nositi sa sobom tanku tekućinsku opnu s kojom tvori integralnu cjelinu. Potencijalna razlika između vanjske površine te opne i tekućine kao cjeline naziva se *elektrokinetički potencijal* ili *zeta-potencijal* (po grčkom slovu kojim se označava) (v. *Elektrokemija*, TE 4, str. 376, i *Elektrokinetičke operacije*, TE 4, str. 397). Ovdje samo treba upozoriti na to da zeta-potencijal sigurno ima nekog uticaja na mehanizam adsorpcije kolektorskih iona na površini čestice, pa i na druge fenomene flotacije (kontakt zračnog mjehura i kolekcionirane čestice, fenomene flokulacije, kondicioniranja i dr.), ali mnogobrojna istraživanja u tom pravcu, naročito u posljednje vrijeme, još nisu dala jednoznačne rezultate. Zbog kompleksne prirode flotacijske pulpe, u njoj se javlja mnogo različitih električnih dvosloja, često s međusobno suprotnim efektima. Svaki ion u sistemu svakako djeluje na zeta-potencijal, ali još nije utvrđeno kako. Nekih sigurnijih podataka zasada ima samo za oksidne minerale u kojih veličina potencijala zavisi od koncentracije iona H<sup>+</sup>, odn. OH<sup>-</sup>. Ispod izoelektrične točke (ispod vrijednosti pH, odn. iznad koncentracije iona H<sup>+</sup> na kojoj zeta-potencijal poprima vrijednost nula) takve su čestice pozitivno nabijene i imaju pozitivni zeta-potencijal, a iznad izoelektrične točke one su negativno nabijene i imaju negativni zeta-potencijal. Nadeno je da će se ispod izoelektrične točke uglavnom adsorbirati samo anionski kolektori a iznad nje kationski. Da adsorpcija kolektora na oksidnim mineralima uzrokuje promjenu vrijednosti zeta-potencijala ilustrira sl. 10 koja prikazuje zeta-potencijal korunda u zavisnosti od koncentracije nekih kolektora i NaCl. Kolektori će na pozitivno nabijenoj površini minerala biti toliko intenzivno adsorbirani da čak mogu pro-uzrokovati i promjenu predznaka zeta-potencijala, dok se NaCl ponaša kao neutralan elektrolit.

Može se očekivati da će i istraživanja električnih pojava u flotacijskoj pulpi pridonijeti rasvjetljavanju nekih fenomena na razmeđu involviranih faza.

Velicina plohe što je kolektorska opna prekriva na čestici nije sigurno ustanovljena. S obzirom na ranije izloženo, razumljivo



Sl. 9. Adsorpcija kolektora na mineralnoj čestici

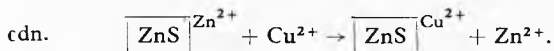
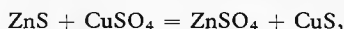


Sl. 10. Zeta-potencijal korunda kao funkcija koncentracije Na-laurata (1), Na-laurisulfata (2) i NaCl (3) pri pH = 4,6

je da cijela čestica i ne treba da bude obavljena takvom opnom, dovoljno je da kolektorske molekule prionu na mjestima najjače privlačne sile, dakle na bridovima i uglovima kristala i na defektima kristalne rešetke. Procjene su za udio kolekcionirane plohe na površini čestice u velikom rasponu, 3...100% površine. I *debljina opne* ne mora biti velika, ona čak i treba da bude monomolekularna. Nastavlja li se reakcija i dalje, tako da kolektorski ioni ulaze dublje, razara se prvobitni raspored kristalne rešetke — kojom se osigurava potrebna orijentacija kolektorske opne (sl. 9) — pa će se molekule opne rasporediti u multimolekularan film. Obično se tako dobiva površina s naizmjeničnim polarnim i nepolarnim elementima. Za takve površine zračni mjehuri ne mogu prionuti, pa se tvorba multimolekularnih filmova nastoji spriječiti, npr. aktivacijom. S obzirom na ove male vrijednosti i kolekcionirane plohe i debljine opne, jasno je da su i količine reagenata potrebne za kolekciju vecma male: one iznose 15...100 g/t prerađene rude za ksantate, ali i do 1200 g/t na primjer za masne kiseline. U specijalnim slučajevima, količine mogu biti i znatno veće; tako, npr. pri flotiranju nečistoća (tinte, štamparske boje i sl.) s otpadnog papira radi dobivanja čistih celuloznih vlakana utrošak kolektora iznosi i do 8 000 g/t.

*Kondicioniranje* obuhvaća različite postupke kojima je svrha da se omogući i osigura selektivna kolekcija. Dijeli se na dvije glavne operacije; aktivaciju i depresiju. *Aktivacija* obuhvaća grupu postupaka kojima se želi obrazovati i održati djelotvorna kolektorska opna na određenim česticama, a depresija obuhvaća postupke kojima se želi spriječiti, privremeno ili trajno, ulazak neželjenih čestica u pjenu, tj. koncentrat. Odgovarajući reagenti zovu se aktivatori, odn. depresori, a *regulatorima* u užem smislu mogu se nazvati reagenti i postupci kojima se kondicijski djeluje na pulpu općenito a ne samo na određene čestice u njoj. Pri tom treba imati u vidu da se djelovanje kondicijskih reagenata ne može strogo razgraničiti jer, zavisno od prilika u pulpi, jedan te isti reagent može imati i aktivacijsku i depresijsku funkciju, a s različitim mineralima može i različito reagirati.

Sušтина je *aktivacije* u tome da se površinski ion koji je prema kolektoru neaktivan pretvori u aktivan. Klasičan je primjer aktivacija sfalerita ionom bakra prema jednadžbi:



Ion bakra iz modre galice nadomješta ion cinka, čime se na čestici obrazuje bakreno-sulfidna površina na koju će se zatim adsorbirati ion kolektora. Slično se može aktivirati kvarc metalnim ionima Fe, Cu, Al, Mg.

Postupak obratan od aktivacije jest *depresija*, a obuhvaća metode kojima se sprečava flotiranje nekog određenog minerala ili grupe minerala. Deprimiraju se ili jalovinski minerali i međuprodukti ili (u tzv. selektivnoj flotaciji, v. dalje) jedan ili više minerala koji bi normalno flotirali. Depresija mahom iziskuje više radnih operacija od aktivacije. U depresiju spadaju: sprečavanje aktivacije, sprečavanje kolekcije, poništavanje postojećih kolektorskih opni, sprečavanje kontakta između površine čestice i zračnih mjehura, tvorba hidrofilne površine. Klasičan je primjer za sprečavanje aktivacije «cijanizacija» teškometalnih iona njihovim prevodenjem u kompleksnu tvorevinu:

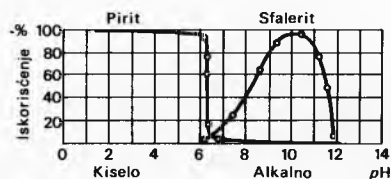


ovime se čestica obavlja «oklopom» polarne, dakle hidrofilne opne, pa kolektor za nju ne može prionuti.

Drugi su važni depresori natrijum-sulfid,  $\text{Na}_2\text{S}$  (za mnoge sulfide, sulfidne okside, neke nemetale), vodeno staklo,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (praktično, najvažniji depresor za jalovinske minerale — kvarc i silikate općenito — te dispergator za mulj koji, flokuliran, uzrokuje povećanu potrošnju reagenata i uopće jako ometa flotaciju), cink-sulfat,  $\text{ZnSO}_4$  (za sfalerit u selektivnoj flotaciji olovno-cinkovih ruda).

Mehanizam djelovanja depresora nije razjašnjen, sigurno je samo da njihova uspješnost umnogome zavisi od njihove koncentracije kao i od aciditeta (pH) pulpe. pH-vrijednost pulpe, sama po sebi, veoma je važan flotacijski regulator. Kod sulfida,

na primjer, postoji tzv. kritična vrijednost pH iznad koje zračni mjehur ne može prionuti za česticu s određenom količinom datog kolektora zato što ion OH s površinskim metalnim ionom obrazuje kompleksnu tvorevinu. Čak se pri nižem pH nastala kolektorska opna može poništiti povećajući se pH do kritične vrijednosti. Na sl. 11 vidi se kako pirit, uz određeni kolektor, flotira



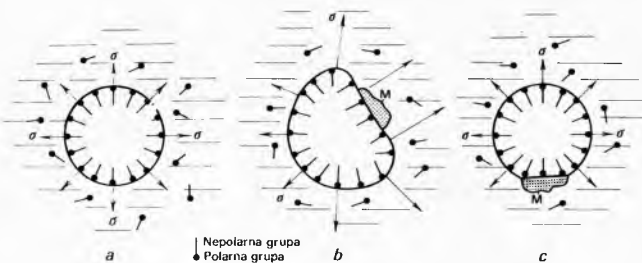
Sl. 11. Zavisnost flotabilnosti pirita i sfalerita od pH-vrijednosti pulpe

samo u kiseloj pulpi, a sfalerit, opet uz određeni kolektor, flotira samo u alkalnoj, s tim što tu, osim toga, postoji tek usko područje optimalne flotabilnosti.

Glavni je regulator za pH vapno (kreč),  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , već i zato što je to najjeftiniji nosilac hidroksidne grupe. Upotrebljavaju se i  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  te  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

*Mineralizacija zračnog mjehura*, tj. akt prijanjanja kolekcionarne čestice za zračni mjehur, osnovni je fencmen flotacije. Od njegovog uspješnog ostvarenja zavisi i uspjeh flotacije. Da bi se on ostvario, u pulpu se mora dovesti zrak (pulpa se mora *aerirati*) a zatim se nastali zračni mjehuri moraju učiniti stabilnim. Zrak se u pulpu dovodi na različite načine, zavisno od tipa flotacijske ćelije, a stabilnost se mjehura postiže dodavanjem specijalnih reagenata, tzv.  *pjenušavaca*. To su tenzidi, površinskoaktivne materije, tj. materije koje se pozitivno adsorbiraju u površini tekućine (tj. pulpe). Pozitivnom adsorpcijom — adsorpcijom kojom se adsorbat akumulira na površini adsorbenta — snižava se površinski napon adsorbenta ili, drugim riječima, površina tekućine nastoji se povećati, jer se smanjuje otpor protiv njenog istezanja. Povećanjem površine tekućine intenzivira se njeno razlijevanje, odn. njena sposobnost kvašenja. Prema tome, pjenušavcima se povećava kvašljivost površine čvrste čestice jer se snižava površinski napon tekućine. Što je veći taj napon to je manja kvašljivost, odn. to je slabije razlijevanje tekućine po površini minerala. Obrnuto, snižavanjem površinskog napona povećava se mogućnost kvašenja.

Pjenušavac je supstancija slična kolektorima: i to je heteropolarna materija, s principijelnom strukturom R—G, pri čemu je R nepolarni ugljikovodični ostatak, po pravilu s više od šest atoma C, a G je polarna grupa, npr. —OH, —COOH, =CO, —NH<sub>2</sub>. U međufaznom području voda-zrak pjenušavac će se orijentirati tako da će polarni hidrofilni (aerofobni) dio biti usmjeren prema pulpi a nepolarni hidrofobni (aerofilni) prema mjehuru; ta je situacija prikazana na sl. 12 a. Mjehuri se u pulpi podižu



Sl. 12 Faze prijanjanja kolekcionirane čestice za mjehur

naviše, a odozgo, padajući, stalno nailaze čvrste čestice, i korisne komponente i jalovine. Na sl. 12 b prikazan je sudar samo između kolekcionirane čestice i mjehura. Takva će čestica, uglavnom, nakon sudara s mjehuruom kliziti po njemu sve do donjeg pola i tu ostati pričvršćena, kao gondola na balonu (sl. 12 c), ukoliko je kontakt bio uspješan. Ukoliko nije, čestica otpada s mjehura — i nailazi na drugi, itd. Do uspješnog kontakta doći će vjerovatno onda kada se čestica i mjehur toliko približe da se njihovo

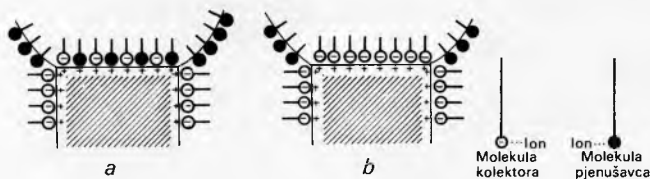


vi električni dvosloji preklope, pa se vodeni granični sloj toliko istanji da se mogu aktivirati molekularne privlačne sile.

U fazi kontakta čvrste čestice i zračnog mjehura, prikazanoj na sl. 12 b, sudarom sa česticom *M* zračni se mjehur istegne, površina mu se (osobito na mjestu kontakta) poveća, ali time istovremeno tu opadne i koncentracija pjenušavca, što znači da naglo poraste površinski napon. Površinski je napon na sl. 12 označen vektorima; oni su u fazi *a* međusobno jednaki na cijelom perimetru mjehura, u skladu s ravnomjernom koncentracijom pjenušavca na čitavoj površini tekućine. Kad u fazi *b* na mjestu kontakta mjehura i čestice opadne koncentracija pjenušavca (što se odražava u razmicanju molekula na skici *b*), izrazit porast površinskog napona na tom mjestu, označen i povećanjem odgovarajućih vektora, prouzrokovat će opisane posljedice: smanjit će se površina pulpe u kontaktu s mineralnom česticom → smanjit će se okvašena površina → smanjit će se površina međufaznog područja mineral-voda → povećat će se površina međufaznog područja mineral-zrak — ukratko, sprječit će se pucanje mjehura u tom kritičnom trenutku. To je zaista samo trenutak, jer prema modernim mjerjenjima kontakt čestice i mjehura odigra se u vremenu od jedne do pet milisekunda. Gotovo istovremeno u međufazno područje voda-zrak već difundiraju svježije molekule pjenušavca iz tekućine, pa se opet uspostavlja prijašnje ravnotežno stanje, samo s tom razlikom što je sada čestica čvrsto prionula za stabilizirani mjehur.

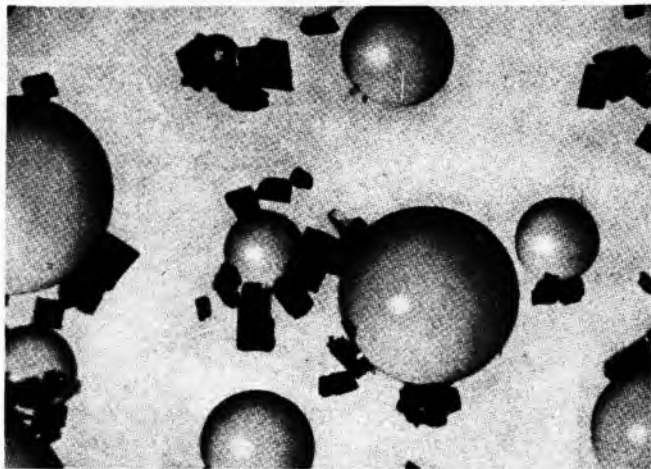
Ovo, ma i kratkotrajno, snižavanje površinskog napona podržava i elastičnost međufaznog područja voda-zrak neophodnog za održavanje stabilnosti mjehura. Osim toga, snižavanje vrijednosti napona prouzrokovat će elastičnost pulpe i na njenoj gornjoj razini, a to je korisno i potrebno zato da bi se molekule pulpe lakše razmakle prilikom probijanja mineraliziranih mjehura kroz njih u pjenu.

Konačno stanje stabiliziranog i mineraliziranog agregata čestica-mjehur prikazuje sl. 13. Danas još nije sigurno nalaze



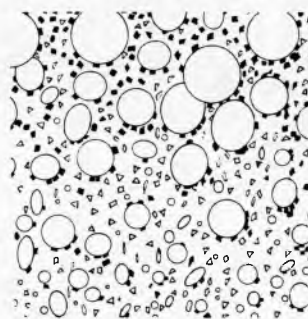
Sl. 13. Stabilizirani agregat čestica-mjehur

li se na razmеди čestica-mjehur samo molekule kolektora (sl. 12 b) ili pak miješana opna kolektora i pjenušavca (sl. 12 a). I za jedno i za drugo ima eksperimentalnih i teorijskih dokaza.



Sl. 14. Mineralizirani mjehur

Sl. 14 je fotografija mineraliziranog mjehura, a sl. 15 prikazuje, shematski, mineraliziranu flotacijsku pjenu. Od ukupne površine mjehura, kolekcioniranim česticama obično je pokriveno 1...30%, što zavisi od veličine mjehura kao i od broja uspješnih sudara.



Sl. 15. Shematziran presjek kroz flotacijsku pjenu. Crno: čestice korisne komponente, bijelo: čestice jalovine

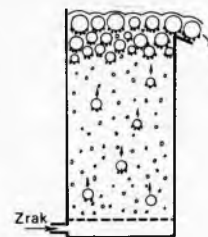
ne bi trebalo da bude ionogen kako bi bilo sigurnije da nema kolektorskih svojstava.

**Flotacijski aparati.** Postoje tri temeljna zahtjeva u pogledu konstrukcije flotacijskih mašina: one moraju raditi kontinuirano, protok pulpe ne smije se prekidati; ne smije doći do sedimentacije čestica, one stalno moraju biti suspendirane; mora se postići i održavati dobra aeracija pulpe.

U toku razvoja konstruirano je mnogo različitih tipova flotacijskih mašina (v. i sl. 1, 2 i 3), ali neka kruta sistematizacija nije moguća jer u svakoj tipskoj grupi obično ima više konstrukcijskih varijanata koje ne dozvoljavaju uvrštavanje u strogo omeđene grupe. Zato će se ovdje primijeniti najgrublja moguća podjela, tj. ona što bazira na mehanizmu za prouzrokovanje aeracije: po tom načelu, flotacijske se mašine mogu podijeliti na pneumatske i mehaničke (ili agitacijske).

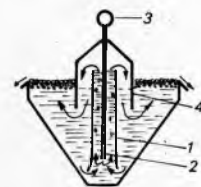
*Pneumatske flotacijske mašine* karakteristične su po tome što u njih nema nikakvog mehaničkog uređaja (agitatora) za aeriranje, već sâm ubačeni zrak, svojim strujanjem, aerira pulpu. Takve su se mašine upotrebljavale još i prije prvog svjetskog rata, ali nakon tog rata, a naročito nakon pronalaska selektivne flotacije dvadesetih godina ovog vijeka, pneumatske se mašine sve više zamjenjuju agitacijskim mašinama, te su ove bile u upotrebi gotovo univerzalno sve do prije nekoliko godina. U najnovije vrijeme, međutim, opet se opaža porast interesa za nemehaničke flotacijske aparate, jer se pokazalo da je kod najviše primjenjivanih mehaničkih flotacijskih mašina, tzv. subaeracijskih, utrošak energije znatno veći nego što iziskuju sama aeracija i disperzija. Zato su, u usporedbi s mehaničkim mašinama, i pogonski troškovi u pneumatskih nešto niži, a i investicijska su ulaganja kod potnijih manja.

Jedna je od prvih pneumatskih mašina bila ćelija tipa *Callow*, sl. 16. Ona se sastoji od korita, dugog 2...20 m, širokog ~0,80 m i dubokog ~0,5 m, u kom je neposredno iznad dna pričvršćena porozna tkanina ili guma. Izvana se ispod porozne stjenke dovodi zrak pod tlakom ~0,4 at, koji se probija kroz porozni medij u obliku mjehurâ; mjehuri se na svom putu prema površini sudaraju sa česticama sirovine što se dodaje odozgo, pa kolekcionirane čestice nose sa sobom u preliv.



Sl. 16. Flotacijska mašina Callow

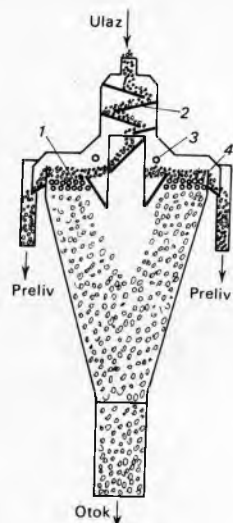
Mašina *Forrester*, sl. 17, također ima oblik korita, koje može biti dugačko 1...30 m, a široko 1,3 m. Aeracija se postiže aeroliftom koji se obrazuje od uzdužnih pregrada 1 i cijevi 2; zrak se, distribuiran dovodnom cijevi 3, uvodi kroz 2, tako da u pulpu ulazi odozgo, pa se diže između pregrada 1 i time tu smanjuje gustoću u odnosu na gustoću u prostoru van pregrada 1. Uslijed nastale razlike u hidrostatskim tlakovima, pulpa se diže kroz aerolift, pa se dobiva cirkulacija prikazana strelicama na sl. 17; 4 su štitnici protiv prskanja pulpe.



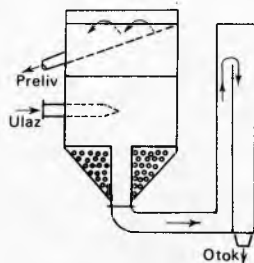
Sl. 17. Flotacijska mašina Forrester

Od novih konstrukcija pneumatskih mašina treba spomenuti *pneumatsku mašinu FPS*, razvijenu u SSSR za preradu krupnih zrna. To je jedan od pokušaja da se flotacija proširi i na područje krupnijih zrna, već i zato da se smanje troškovi sitnjenja, najskuplje radne faze u oplemenjivanju. Za razliku od svih drugih flotacijskih mašina, kod mašine FPS (sl. 18) pulpa se dodaje odozgo na samu pjenu, i to preko kosih dovodnih ploča 2 koje osiguravaju ravnomjeran dotok pulpe. Sloj pjene obrazuje se, uz pomoć pjenušavca, putem gumenih aeratora 1 raspoređenih u dva reda na međusobnom rastojanju od oko 20 mm. Kroz prskalice 3 dodaje se, prema potrebi, voda ili depresor. Koncentrat se odvođi preko prelivnog praga 4, a otok (jalovina) kroz cijev na dnu aparata. Dosada se pokazalo da se s takvom mašinom mogu flotirati kalijeve soli do 3...4 mm veličine zrna, fosforiti do 1,5 mm, sulfidi do 2 mm, ugljen do 3...4 mm i dijamanti do 2 mm.

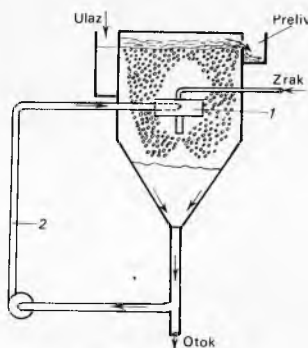
Na sl. 19 prikazana je tzv. *ciklonska ćelija*, također moderna konstrukcija pneumatskih mašina, ali namijenjena preradi



Sl. 18. Flotacijska mašina FPS. 1 Gumeni aeratori, 2 dovodne kosine, 3 prskalice, 4 prelivni prag



Sl. 19. Ciklonska flotacijska ćelija

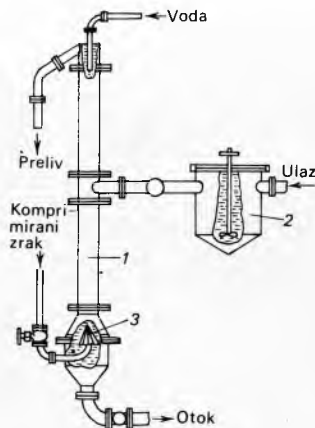


Sl. 20. Ciklo-ćelija

finih zrna. Pulpa se tu dovodi tangencijalno putem aerolifta, dakle intenzivno aerirana, u centralni dio okrugle ćelije. Po principu ciklonskog djelovanja, pjena se kao lakša koncentrira u sredini pa je tu nastala uzgonska struja iznosi na površinu, odakle se kao preliv odvodi, a nekolekcionirane čestice, kao teža frakcija, tonu po periferiji na dno, odakle se, kao otok, iznose pa obrađuju ili kao jalovina ili se, opet aeroliftom, prevode u susjednu ćeliju. U SR Njemačkoj takve su ćelije u flotaciji cinkovih ruda i veoma fino zrnatih (do 80% - 0,36 mm) starih jalovišta olova daleke dobre rezultate.

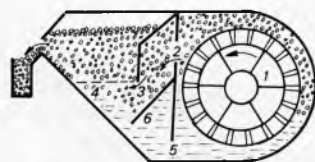
Na principu ciklona radi i tzv. *ciklo-ćelija*, sl. 20, razvijena početkom šezdesetih godina u Americi. Aeracija se tu prouzrokuje intenzivnim vrtloženjem pulpe u specijalnoj komori 1. U tu se komoru centralno uvodi zrak, a jedan dio pulpe, odvojen iz glavne mase putem bočne cijevi 2, dovodi se tangencijalno. Navodno, pogonski troškovi iznose samo 90% tih troškova kod mehaničkih ćelija, a investicijski čak i samo 10%; i vrijeme flotiranja imalo bi biti smanjeno gotovo za polovinu.

Gotovo istovremeno s ciklo-ćelijom, u Kanadi je razvijena *stubna* (ili protustrujna) *pneumatska flotacijska mašina*, sl. 21. Ona se s uspjehom primjenjuje u flotaciji sumpora u Poljskoj, a i u poluindustrijskim pokusima s flotacijom bakra u SSSR dala je zadovoljavajuće rezultate (navodno je tu postignut čak 5...8 puta bolji učinak od subaeracijskih mašina). Kao što se vidi na sl. 21, ona se sastoji od kućišta u vidu 7...9 m dugačke vertikalne cijevi s promjerom do 1 m (1) u koju se pulpa ubacuje kroz kondicijsku posudu 2. Pulpa struji u cijevi 1 naniže, a aerira se komprimiranim zrakom utiskivanim protustrujno kroz difuzor 3. Pjena se



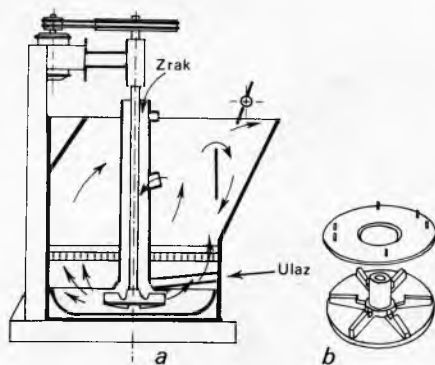
Sl. 21. Stubna flotacijska mašina

obrazuje u gornjoj trećini cijevi 1, a propire se vodom odozgo radi povećanja iskorišćenja (što se postiže sprečavanjem ulaska sitnih hidrofilnih zrna u pjenu).  
*Mehaničke flotacijske mašine.* Mehaničke su ili agitacijske flotacijske mašine one u kojih se aeracija pulpe postiže nekim mehaničkim agitatorom, danas najčešće vijkom, koji se po anglo-američkom terminu gotovo univerzalno naziva »impelerom«. Impeler je kod modernih mehaničkih mašina smješten pri dnu ćelije tako da se ona aerira odozdo, pa se zato te mašine i nazivaju »subaeracijskim«. U starijih je mašina impeler bio smješten drukčije ili je pak aeracija postizavana na drugi način. Tako je u jednoj od prvih mehaničkih flotacijskih mašina, *Minerals Separation Standard*, opisanoj prije (v. sl. 3), impeler smješten u posebnu agitacijsku komoru, dok kod tzv. *kaskadnih* flotacijskih mašina funkciju aeratora preuzimaju drugi uređaji. Kod kaskadne mašine K. & K. (Kraut-Kohlberg), na primjer (sl. 22), aeracija se prouzrokuje horizontalnim cilindrom 1 s prorezima, koji se okreće brzinom od blizu 200 okreta u minuti. Tako se pulpa podiže i ubacuje kroz uzdužne proreze 2 i 3 u šiljasti sanduk 4, gdje se na taj način intenzivno aerira; brana 6 sprečava kratak spoj kroz otvor 5, tako da se zračni mjehuri dižu u 4. Dužina korita K. & K. iznosi 3...5 m, a promjer cilindra 1 ~ 600 mm.



Sl. 22. Flotacijska mašina K. & K.

U *subaeracijskih* se mašina zrak dovodi pri dnu i tu se mehanički razbija u zračne mjehure koji se onda dižu prema razini pulpe. Na putu se sudaraju sa česticama sirovine, pa kolekcionirane (hidrofobne) čestice mjehuri iznose na površinu, obrazujući tu mineraliziranu pjenu, a hidrofilne (nekolekcionirane) čestice padaju na dno. Pjena je koristan produkt (koncentrat) koji se kontinuirano automatski skida i odvodi kao preliv, a potonule su čestice jalovina, odn. međuprodukt; i one se kontinuirano odvođe kao otok, i to ili na jalovište ili u narednu, susjednu ćeliju.



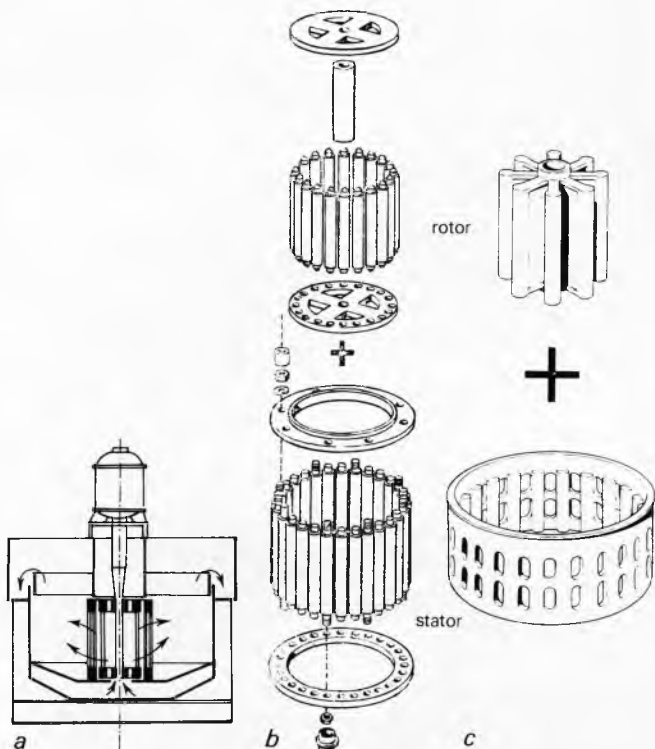
Sl. 23. Flotacijska mašina Denver »Sub-A« Fahrenwald. a Presjek, b standardni impeler

Ranije su se subaeracijske mašine uvijek izrađivale u vidu pojedinačnih ćelija koje su se spajale u *baterije* prema potrebi. U posljednje vrijeme sve se više prelazi na princip kontinuiranog korita u kom su pojedine ćelije međusobno odvojene samo zavješanim pregradama ili i nikako. Princip rada u svih je tipova jednak, razlikuju se uglavnom samo po agitatoru za pulpu, impeleru.

Kao prototip modernih mehaničkih subaeracijskih flotacijskih mašina može se uzeti ćelija *Denver »Sub-A«* (tip *Fahrenwald*), sl. 23. Zrak se tu nasivava impelerom kroz centralnu dovodnu

cijev, i to ili direktno iz atmosfere ili se dovodi komprimirani zrak. Impeler dakle služi i kao zračna pumpa i kao agitator odn. dispergator.

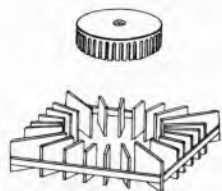
Kod mašine *Wemco-Fagergren*, sl. 24, impeler se sastoji od rotora i statora koji su kod starijeg tipa bili izgrađeni od gumom



Sl. 24. Flotacijska mašina *Wemco-Fagergren*. a Presjek, b standardni stator i rotor, c stator i rotor tipa »1 + 1«

obloženih pojedinačnih palica, a kod novijeg tipa »1 + 1« agregat se sastoji samo od dva dijela (sl. 24 c).

Mašina *Mehanobr* također ima impeler u obliku rotora i statora, a kod mašine *Galigher Agitair* impeler ima oblik diska s naniže usmjerenim čeličnim prstima na periferiji (sl. 25).

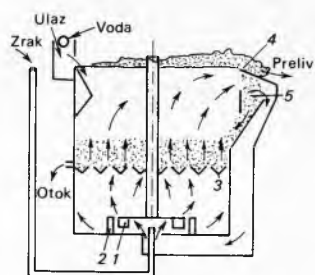


Sl. 25. Rotor (gore) i stator (dolje) tipa *Agitair*

Kao što je rečeno, subaeracijske su mašine danas najviše u upotrebi. Od najuspješnijih tipova, danas je u svijetu u pogonu oko 300 000 ćelija. U Jugoslaviji se danas primjenjuju samo subaeracijske mašine, i to uglavnom ovdje spomenutih tipova.

Posljednjih nekoliko godina javljaju se nove ideje i u konstrukciji mehaničkih flotacijskih aparata. Tako je razvijena flotacijska mašina na bazi primjene *vrtožnog sloja* (fluo-solid-principa, v. *Fluidizacija*). Ona je shematski prikazana na sl. 26. Ćelija je rešetkom 3 podijeljena na donji i gornji dio; u donjem se dispergira impelerom 1 nasisani zrak, a u gornjem dolazi do mineralizacije zračnih mjehura u vrtožnom sloju što se razvija neposredno iznad rešetke 3. Preliv (koncentrat) odlazi preko prelivnog praga 4, a u umirenoj zoni 5 mogu se iz pjene izdvojiti zaletale čestice jalovine i vratiti se u vrtožni sloj. Ovakva se mašina s uspjehom primjenjuje u SSSR za preradu kalijumskih soli znatosti 3/0,6 mm, dakle krupne granulacije.

Dimenzije najviše upotrebljanih mehaničkih flotacijskih



Sl. 26. Flotacijska mašina s vrtožnim slojem. 1 Impeler, 2 stator, 3 rešetka, 4 prelivni prag, 5 umirena zona

mašina (*Denver*, *Fagergren* i *Agitair*) praktično se nisu mijenjale decenijama. Standardne ćelije imaju volumen od, okruglo, 1,1 (*Agitair*) do 2,8 m<sup>3</sup> (*Denver*). U flotacijskim postrojenjima velikog kapaciteta zato takvih ćelija ima na stotine. Tako je u novoj flotaciji u Majdanpeku, od godine 1971 s kapacitetom od 11 miliona tona godišnje prerade, montirano 754 *Agitair*-ćelija, volumena od 1,1 do 11,2 m<sup>3</sup>; od potonjih ima 48 komada.

Sve do sredine šezdesetih godina smatralo se da su ćelije malog volumena tehnološki djelotvornije i ekonomski povoljnije od velikih ćelija. Tada je došlo do temeljite promjene u tom stavu, jer se našlo da se male ćelije ekonomski ne mogu uskladiti sa sve većim kapacitetima ostalih oplemenjivačkih uređaja (mlinova u prvom redu, ali i filtara, zgušnjivača i dr.) koji su nezadrživo rasli zbog sve izrazitije potrebe prerade sve većih količina sve siromašnijih sirovina.

Posljednjih petnaestak godina zato postoji naglašena tendencija povećanja zapremine flotacijskih mašina. Tako je ćelija *Agitair* povećana i do 11,3 m<sup>3</sup>, a *Denver* na 17 m<sup>3</sup>, s tim da se ide na 25 m<sup>3</sup>. Time se znatno povećava i učinak pojedine mašine: dok ćelija od 1,1 m<sup>3</sup> može imati učinak do nekoliko tona rude na sat, ćelija *Denver* od 17 m<sup>3</sup> postiže učinak i do 35...40 t/h, dakako sve u zavisnosti od sirovine i njenih tehnoloških svojstava.

Najnovija je konstrukcija na polju velikih flotacijskih aparata kanadska mašina *Maxwell*, prikazana na sl. 27. Prvi put je primijenjena 1970 na rudniku bakra *Opemiska* u Kanadi, a otada se, ubrzano, uvodi u sve više rudnika metalnih ruda u USA, Kanadi i Grenlandu, bilo kao dopuna postojećih postrojenja radi povećanja kapaciteta, bilo kao jedini flotacijski uređaj.



Sl. 27. Flotacijska mašina *Maxwell*

Mašina *Maxwell* sastoji se od ćelije cilindričnog oblika koja, u zavisnosti od tipa, ima različite dimenzije: najveći tip, *Mx-14*, visok je 4,3 m, a toliki mu je i promjer, a zapremina dostiže 56,6 m<sup>3</sup> (2 000 cu. ft.). To je tipična subaeracijska mašina. Zrak se dovodi pri dnu ispod šestokrakog impelera, a pulpa otprilike na 2/3 visine ćelije; mineralizirana se pjena preliva u žlijeb pri vrhu i odvodi cijevima. Tehnološki su rezultati vrlo dobri, pri čemu navodno čak i kolebanja u ulazu od ± 30% bilo kvaliteta ili količine nemaju utjecaja na uspjeh.

Principi djelovanja flotacijske mašine *Maxwell* još nisu potpuno proučeni, ali je već sada očevidno da se ona može uzeti kao jasna indikacija daljeg pravca razvoja flotacijskih aparata.

**Radne faze flotacije.** Flotacijski se postupak može podijeliti na sedam radnih faza. To su: mrokle mljevenje, razblaživanje pulpe, kondicioniranje, kolekcioniranje, aeriranje, dodavanje pjenušavca, skidanje pjene.



Mokro mljevenje obavlja se u bubnjastim mlinovima (v. članak *Mljevenje*). Sirovinu treba usitniti da bi se dobila tražena veličina zrna. Kao što je rečeno, ona samo izuzetno prelazi vrijednost od 0,6 mm.

Flotacijska je pulpa obično razblažena toliko da odnos čvrsto: tekuće iznosi  $\sim 1:4$ , ali je razblaženje često i jače, i do  $1:10$ , osobito u slučajevima kada sirovina sadrži veći udio glinastih sastojaka.

Kondicioniranje obuhvaća dodavanje reagenata kojima je svrha da osiguraju neometano odvijanje flotacijskog procesa, kako u pogledu pulpe općenito (podešavanje pH) tako i obrađivanih čestica (postupci aktivacije, odn. depresije).

Kolekcioniranje je dodavanje i djelovanje reagenata kojima je svrha da mineral ili minerale što treba da isplivaju obaviju hidrofobnom opnom.

Aeriranje je dodavanje zraka, bilo nasisavanjem bilo utiskivanjem, ili na neki drugi način, kako bi kolekcionirane (hidrofobirane) čestice naišle na dovoljan broj zračnih mjehura za prijanjanje.

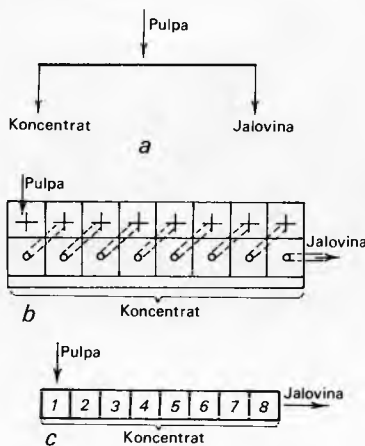
Reagent pjenušavac dodaje se radi osiguranja stabilnosti zračnog mjehura do te mjere da ne puca pri sudaru sa čvrstim česticama, nego da ih iznese na površinu pulpe, u pjenu.

Pjena s mineralnim tovarom skida se s površine pulpe kontinuirano i automatski, jednostavnim rotacijskim skidačem.

Ne obuhvaća svaka flotacijska operacija sve spomenute dane faze, a niti se one moraju odvijati baš ovim redom. Tako ponekad nije potrebna faza kondicioniranja, ili se ona sastoji samo od podešavanja pH, a često ni pjenušavce ne treba dodavati. Reagenti se obično dodaju u samoj flotacijskoj ćeliji, ali često već i u mlinu; optimalni režim njihovog dodavanja (»receptura«) utvrđuje se tek provjerom u praktičnom radu, ali se stalnom kontrolom mora prilagođivati aktuelnim prilikama (u prvom redu, varijaciji sadržine korisne komponente u ulaznoj sirovini).

#### Režim rada i način prikazivanja flotacijskog procesa.

Flotacija može biti kolektivna i selektivna. *Kolektivna* je flotacija postupak kojim se u jednom zajedničkom koncentratu dobivaju sve korisne komponente sirovine, bez obzira na to bila to samo jedna korisna komponenta ili više njih, a u *selektivnoj* se flotaciji korisne komponente izdvajaju iz pulpe uzastopno jedna za drugom, počinjući obično s lakoflotabilnom komponentom. Danas se pretežno primjenjuje selektivna flotacija.



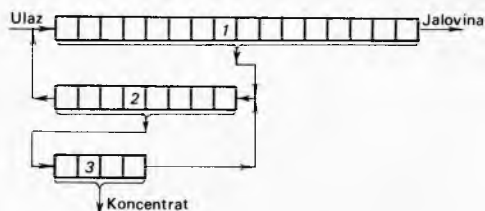
Sl. 28. Principi prikazivanja flotacijskih shema. a Rječišta shema, b vođenje pulpe u bateriji sa 8 ćelija, c prikazivanje baterije sa 8 ćelija u tehnološkoj shemi

I u jednom i u drugom slučaju rijetko se kada finalni koncentrat može dobiti u jednom radnom stupnju. Gotovo je uvijek potrebno prvi ili *grubi* koncentrat prečistiti kako bi on bio što bogatiji korisnom komponentom, ili pak iz jalovine treba izdvojiti što je moguće više korisne komponente kako bi jalovina bila što siromašnija. Prema tome što se u flotaciji želi postići — optimalni kvalitet koncentrata ili optimalno iskorišćenje korisne komponente (= siromašna jalovina) — flotacijsko se postrojenje i podešava. U zavisnosti od cilja razlikuju se, u načelu, dva moguća režima za vođenje flotacijskog postupka: flotacija sa čišćenjem

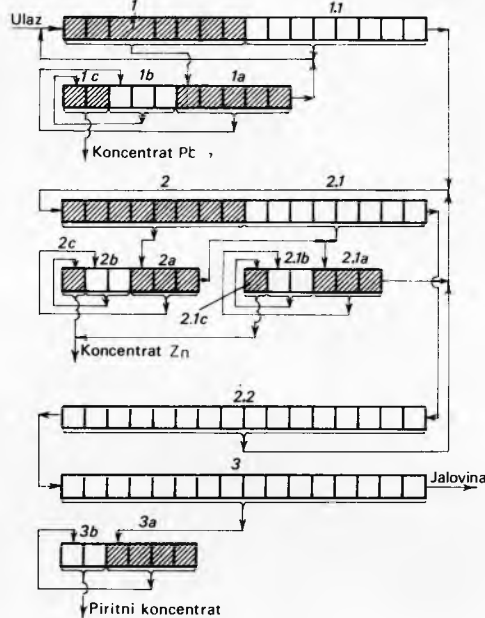
koncentrata i flotacija s preradom međuprodukta, ili kontrolna flotacija; u praksi se najčešće primjenjuje kombinirana flotacija.

Način vođenja pulpe kroz flotacijske aparate (baterije) prikazuje se grafički pomoću tzv. *flotacijskih shema*. Na sl. 28 vidi se princip izrade takvih shema, a na sl. 29 dati su primjeri iz naše prakse.

Na sl. 29 prikazana je flotacija bakra u Majdanpeku. To je kolektivna flotacija s dvokratnim čišćenjem grubog koncentrata, dakle flotacija kojom se ide na kvalitet koncentrata. Iskorišćenje, tj. količinu iz rude flotacijski izvađene korisne komponente (bakra) ne treba dalje poboljšavati, jer već otok grube flotacije sadrži toliko malo bakra da se može odbaciti kao jalovina; nema, prema tome, ni međuprodukta koje bi trebalo preraditi. Baterija 1 predstavlja tzv. grubu flotaciju, baterija 2 prvi je »prečištač« koncentrata dobivenog grubom flotacijom, a u bateriji 3 koncentrat se čisti drugi, u ovom slučaju posljednji put, jer je postignut zadovoljavajući kvalitet koncentrata bakra; preliv ovog drugog prečištača, dakle, finalni je koncentrat bakra.



Sl. 29. Tehnološka shema flotacije s dvokratnim čišćenjem koncentrata



Sl. 30. Tehnološka shema kombinirane flotacije sa selektivnim flotiranjem

Na sl. 30 prikazana je shema flotacije olovno-cinkovnih ruda kombinata »Trepča« u Zvečanu. To je selektivna flotacija sa tri produkta od kojih se svaki višekratno čisti, a dva se podvrgavaju u kontrolnom flotiranju.

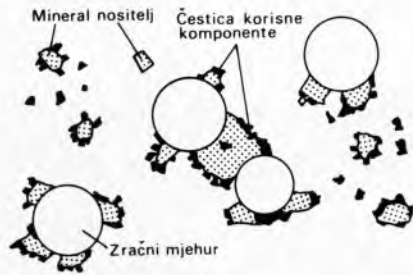
U bateriji 1 obavlja se gruba flotacija olova; ruda olova tu se kolekcionira, a ruda cinka deprimira se skupa s ostalim primjesama i jalovinom. U baterijama 1a, 1b i 1c čisti se, u tri stepena, grubo koncentrat olova; preliv trećeg stepena čišćenja (1c) daje finalni olovni koncentrat. Otok svih triju stepena čišćenja vraćaju se na ponovnu preradu, uvijek u prethodnu bateriju. Otok grubog olovnog koncentrata podvrgava se kontrolnoj flotaciji u bateriji 1-1; preliv te baterije vraća se u grubu flotaciju olova (1), a otok, koji sadrži deprimirani cink i ostale komponente s jalovinom, ide u sekciju cinka. Tu se, u bateriji 2, aktiviranjem dobiva grubo koncentrat cinka koji se, u baterijama 2a, 2b i 2c, trostepeno čisti, nakon čega se, u vidu preliva iz 2c, dobiva finalni koncentrat cinka. Za razliku od olova, koje se doduše trostepeno čisti ali ipak samo u jednom prečištaču, cink se mora čistiti dvokratno. Drugo se čišćenje obavlja u prečištaču 2.1a—2.1b—2.1c. Ovom se dovodi otok prve faze čišćenja 2a i preliv prve refloatacije cinka 2.1. Preliv prečištačkog stepena 2.1c finalni je cinkov koncentrat kao i preliv iz 2c, pa se s njim i spaja. Cink se dvaput refloatira: u bateriji 2-2; preliv se odavde vraća čak u glavu grube flotacije cinka, a otok, koji sadrži pirit i jalovinu, ide u piritnu sekciju. Tu se prvo, u gruboj flotaciji piritu 3, pirit aktivira (i kolekcionira) i zatim dvostepeno čisti u baterijama 3a i 3b; otok grube piritne flotacije (3) finalna je jalovina cijelog postrojenja.

**Flotacije u Jugoslaviji.** U Jugoslaviji se trenutno (jesen 1975) nalazi u pogonu 19 flotacija. Od toga je 13 u rudnicima olova i cinka; to su: Mežica u Sloveniji, Srebrnica u Bosni, Rudnik i Veliki Majdan i Lece u užoj Srbiji, Zvečan, Leposavić, Kišnica (Badovac), Novo Brdo (Mrevci) i Blagodat u pokrajini

Kosovo, Zletovo (Probištip) i Sasa u Makedoniji, te Šuplja Stijena u Crnoj Gori. U rudnicima bakra postoje dvije flotacije (Bor i Majdanpek u istočnoj Srbiji), kao i u rudnicima antimona (Brasina i Stolice u zapadnoj Srbiji). Po jedna je flotacija u rudnicima kroma (Raduša u Makedoniji) i na kvarcnom pijesku (Pula). Kapaciteti su tih flotacija različiti. Daleko je najveća flotacija bakra u Majdanpeku, puštena u pogon 1961 (prva faza), s kapacitetom od 36 000 t/d, čime se uvrštava među pet najvećih flotacija bakra u svijetu; u Evropi je to najveća flotacija bakra. Na olovu i cinku najveća je naša flotacija ona u Zvečanu kod Kosovske Mitrovice, u okviru poduzeća »Trepča«, s kapacitetom od 3 500 t/d. Flotacija u Mežici ima kapacitet od 2 000 t/d, a nova u Leposaviću, nedaleko od Zvečana, 1 300 t/d. Druge su flotacije olova i cinka manje tako ona u Velikom Majdanu u zapadnoj Srbiji ima kapacitet od 100 t/d. Izgrađene su i neke druge flotacije (na rudama olova i cinka, željeza i dr.) koje trenutno nisu u pogonu, a projektiraju se i neke nove, kao na primjer za bakar kod Bučima u istočnoj Makedoniji od 15 000 t/d, za fosfatne rude u Lisini kod Bosiljgrada, kao i neke druge.

**Varijante flotacijskog postupka.** Kao što je već spomenuto u uvodu, osim opisane konvencionalne pjenaste flotacije postoje još neki flotacijski postupci koji su u posljednje vrijeme razvijeni za rješavanje nekih specijalnih problema, u prvom redu za flotiranje zrna koja u normalnoj flotaciji flotiraju teško ili nikako. To su veoma fina ili pak krupna zrna.

Za preradu zrna mikroskopskih i submikroskopskih veličina predlaže se tzv. *ultraflotacija*. Primijenjena prvi put početkom šezdesetih godina, ona je do sada ostala ograničena na uklanjanje nečistoća s koncentrata (konkretno, titanovih minerala s kaolina). Princip postupka prikazan je na sl. 31. U pulpu se dodaju tzv.



Sl. 31. Princip ultraflotacije

*mineralni nositelji* čime se povećava površina raspoloživa za priranje čestica (korisnog) mulja. Mineralne nositelje (npr. vapnenac, barit, fluorit, kalcit, pijesak) treba samljeti na  $-0,044$  mm (325 meša), a korisni mineral na  $100\% - 3$   $\mu$ m, odn.  $48\% - 0,5$   $\mu$ m. Postupak je predložen, i u manjoj mjeri primijenjen, za dobivanje fosfata iz starog jalovišta, pa i za izdvajanje željeznog oksida iz boksita. Ukoliko bi se pokazalo da je princip šire primjenljiv, moglo bi se govoriti o početku rješenja problema inače krajnje štetnog prisustva mulja u flotacijskoj pulpi.

Za flotaciju mulja, dakle čestica  $-0,1$  mm, razvija se posljednjih desetak godina u SSSR i tzv. *elektroflotacija*. Elektroflotacija se od konvencionalne flotacije načelno razlikuje po tome što se u njoj ne koriste zračni mjehuri već mjehuri vodika i/ili kisika dobiveni elektrolizom vode. U tu se svrhu ispod impelera postavljaju elektrode, npr. od nerđajućeg čelika, s vodljivom membranom među njima. Plinski mjehuri što se tu razvijaju znatno su sitniji od mjehura zraka, prosječna im je veličina  $8 \cdot 15$   $\mu$ m, a izvanredno su fino dispergirani u pulpi, tako da se dobiva veoma velika površina za njihov kontakt sa česticama korisne komponente. Postupak se u SSSR već primjenjuje u industriji mesa, kože, maziva, a ispituje mu se i primjena u flotiranju minerala. Pokazalo se, npr., da se elektroflotacijom iz kimberlitske jalovine može dobiti dijamska sitnež (klase  $0,5/0,042$  mm) koja se inače nepovratno gubi. Isto tako, uspješno je prerađen manganski mulj ( $-10$   $\mu$ m) koji se u konvencionalnoj flotaciji mora obradivati kao jalovina; u ovom slučaju dobio je vrlo dobar koncentrat sa  $36,0\%$  Mn.

Za preradu veoma sitnih zrna primjenjuje se i tzv. *aglomeracijska flotacija*. Od konvencionalne pjenaste flotacije razlikuje se

po tome što se materijalu prije samog flotiranja dodaju i prilične količine ( $2 \cdot 80$  kg/t) ulja (parafinska, aliciklična, olefinska, aromatska), obično u vidu emulzije koja sadrži i određenu količinu kolektora, pa se smjesa intenzivno promiješa. Dolazi do sudaranja finih kapljica ulja s hidrofobiranim mineralnim česticama, te do tvorbe aglomerata (približnog promjera od  $01 \cdot 0,4$  mm) koji onda normalno flotiraju. Postupak je našao primjenu u flotiranju praškastih manganskih i finosraslih ilmenitskih (titano-željeznih) ruda, a ispituje se i u oplemenjivanju željeznih i kositrenih ruda.

I krupna se zrna ne mogu preraditi uobičajenim flotacijskim postupcima. Za rješenje tog problema predložena je i tzv. *gravitacijska flotacija* ili *flotogravitacija*. Ona je donekle slična opisanoj aglomeracijskoj flotaciji po tome što i ovdje materijalu (granulacije  $4/0,5$  mm) prije flotiranja treba dodati, uz redovne flotacijske reagente, još i ulja, pa smjesu dobro promiješati. Međutim, dobivena gusta pulpa ne vodi se u flotacijsku ćeliju već na koncentracijski stol (v. *Gravitacijska koncentracija*). Tu će za nauljene (hidrofobirane) čestice prionuti zračni mjehuri, a time će se specifična težina tih aglomerata toliko sniziti da će se oni prelići preko stola na strani jalovine, odn. na »lakoj strani« stola. Tim se postupkom mogu oplemeniti i fosfati, a mogu se izdvojiti i sulfidi iz gravitacijskih koncentrata sulfidonosnih kositrenih ruda.

Ovdje treba spomenuti i tzv. *ionsku flotaciju* koja se s uspjehom primjenjuje u dobivanju korisnih komponenata iz razblaženih otopina, kao što su npr. jamske vode, morska voda i neke industrijske otpadne vode. Princip postupka sastoji se u vezivanju traženih iona za površinskoaktivne materije (tenzide) te njihovom iznošenju u pjenu na površini. Kao tenzidi upotrebljavaju se ionogeni kolektori s nabojima suprotnim nabojima traženih iona (kationski kolektori za anione i obratno); to su, npr.: alkilkarboksilati, alkilksantati, alkilsulfati, alkilfosfati. Ovim se postupkom mogu iz spomenutih tekućina dobiti detergentski, radioaktivni elementi, fosfati, fenoli.

LIT.: K. Ф. Белоглазов, Закономерности флотационного процесса, Москва 1947. — K. L. Sutherland, I. W. Wark, Principles of flotation, Melbourne 1955. — A. M. Gaudin, Flotation, New York-Toronto-London 1957. — В. И. Классен, В. А. Мокроусов, Введение в теорию флотации, Москва 1959. — D. W. Fuerstenau, ed., Froth flotation. 50th anniversary volume, New York 1962. — F. Sebba, Ion flotation, Amsterdam-London-New York 1962. — В. И. Классен, Флотация углей, Москва 1963. — L. Usani, Teoria della flottazione, Roma 1963. — М. А. Эйделес, Основы флотации несульфидных минералов, Москва 1964. — В. А. Глембоцкий, Е. А. Амфилова, Флотация окисленных руд цветных металлов, Москва 1966. — С. И. Митрофанов, Селективная флотация, Москва 1968. — М. Манюлович-Гифинг, Теоретские основы флотации, Београд 1969. — С. Ф. Кузькин, А. М. Гольман, Флотация ионов и молекул, Москва 1971. — В. А. Глембоцкий, Физикохимия флотационных процессов, Москва 1972. — В. А. Глембоцкий, В. И. Классен, Флотация, Москва 1973.

R. Marušić

**FLUIDIKA**, grana nauke i tehnike koja obuhvaća izučavanje i primjenu strujanja fluida za prenošenje i preradu informacija. U njezin djelokrug spada i razvoj fluidičkih elemenata (sastavnih dijelova), sklopova i uređaja koji služe toj svrsi. Kao radni fluid u tim uređajima služe plinovi — kao uzduh (zrak), ispušni plinovi, ugljični dioksid — i tekućine — kao voda, ulje i dr.

Termin fluidika pojavljuje se u literaturi tek 1965, ali istraživanja upravljačkih elemenata kojima se mogu ostvariti izlazne funkcije traženih karakteristika iskoristavanjem dinamike strujanja fluida počela su nešto ranije. Već 1957 i 1958 sovjetski profesor M. A. Ajzerman vrši takva istraživanja sa »strujnim relemom« u Institutu za automatiku i telemehaniku Akademije nauka SSSR. U USA 1958 Moor i Klein izrađuju difuzor sa dva stabilna stanja, a najintenzivnija razvojnja istraživanja vršena su 1959 u Diamond Ordnance Fuse Laboratories (kasnije Harry Diamond Laboratories). Nakon toga u mnogim se laboratorijima i institutima počinje s proučavanjem fluidičkih elemenata.

Iako intenzivni pristup proučavanju upravljanja pomoću fluidičkih elemenata počinje početkom šezdesetih godina, prva su istraživanja vršena već početkom ovog stoljeća. Njemački aerodinamičar L. Prandtl 1904 razrađuje difuzor s priranjem mlaza uz stijenku, a Nikola Tesla već 1916 patentira pneumatičku diodu koja je radila na sličnom principu kao ona na sl. 22 d. Smatra se, međutim, da je začetnik fluidike rumunjski inženjer H. Coanda, koji u svojim radovima početkom tridesetih godina objašnjava pojavu lijepljenja mlaza uz stijenku. Taj tzv. Coanda-efekt jedan je od osnovnih principa rada fluidičkih elemenata bez pokretnih dijelova. Početak primjene fluidičkih elemenata vezan je za razvoj raketne tehnike. S električnim, elektroničkim i drugim elementima, kojima se do tada raspolagalo, bilo je nemoguće riješiti niz problema zbog osjetljivosti tih elemenata prema kozmičkim i ionizirajućim zračenjima, prema temperaturnim promjenama, mehaničkim udarima, vibraciji i sl. Pomoću fluidičkih elemenata pošli su za rukom mnoge od tih problema riješiti.

Fluidički elementi i sklopovi mogu normalno raditi i u uvjetima kao što su zagađena i agresivna okolina, eksplozivna atmosfera, ionizirajuća zračenja i magnetska polja, niske temperature do  $-50$  i visoke temperature do  $\sim +1000$  °C, vibracije, udari i sl.

Prema dijagramu J. Bahra (sl. 1) fluidički se elementi nalaze po vremenu potrebnom za promjenu stanja (preradu informacije)