

**RADMILA M. ŠEĆEROV
SOKOLOVIĆ**
SLOBODAN M. SOKOLOVIĆ
Tehnološki fakultet, Novi Sad

PREGLEDNI RAD

541.182.41:539.217

VIŠEFAZNI SISTEMI I POROZNI SLOJ

Zbog izrazite složenosti fenomena, kako višefaznih sistema i poroznog sloja pojedinačno, tako i njihovom međusobnom interakcijom, koja je samo delimično osvetljena prikazom u ovom radu, istraživači usmeravaju ispitivanja, kao i matematičko modelovanje, ka pojedinačnim, fragmentarnim fenomenima, kako bi se poznavanjem delova sagledao sistem u celini. U tom smislu, neophodno je pratiti radove u mnogo oblasti koje samo naizgled deluju daleko od posmatranog problema. Radovi koji se bave emulzijama hemijske i/ili biološke prirode, koalescencijom, agregacijom, poroznim slojem, generalno ili pojedinačnim osobinama, kao i slojem konkretnog materijala, fenomenima kvašljivosti, adhezije, čak i sušenja poroznih materijala, mogu da pruže neka objašnjenja koja se mogu generalizovati.

U pokušaju matematičkog modelovanja, bar pojedinačnih fenomena, uvode se neki pojmovi i veličine, a time i matematičke funkcije i modeli koji se mogu unificirati i uopštiti, kao što su: funkcija mobilnosti disperznog sistema, funkcija stabilnosti, funkcija hemijskog sastava, koeficijent akumulacije, deponovanja, populacija disperzije, verovatnoća i frekvencija dešavanja događaja (sudara, hvatanja, otkidanja), mreža matrice čvrstog ili mreža pora.

Višefazni sistemi su kompleksni, ne samo zbog velikog broja fenomena koji se simultano dešavaju, nego i zbog velikog broja mogućih kombinacija faza. Generalno, mogu se razlikovati dve osnovne grupe višefaznih sistema: ona kod kojih je kontinualna faza gas i ona kod kojih je kontinualna faza tečnost. Ovaj rad posvećen je višefaznim sistemima u kontinualnoj tečnoj fazi.

U kontinualnoj tečnoj fazi kao dispergovana faza mogu se naći: čvrste čestice (koloidi), kapi nemešljivih tečnosti i mehurići gasova. U ovom radu gasna faza je isključena iz proučavanja.

Kako u prirodi, tako i u praksi, često se višefazni sistem nalazi u poroznoj sredini. Uvođenjem matrice čvrste površine koja opkoljava višefazni sistem, fenomeni se komplikuju, naročito ako je višefazni sistem u pokretu, a čvrsta površina fizički, hemijski i mehanički nestabilna. Ekspolatacija nafte, gasa i vode iz zemljine dubine upravo se sreće sa problemima neotporne čvrste površine niske permeabilnosti i složenog višefaznog sistema [1–7]. Fenomeni migracije mikroorganizama i virusa kroz poroznu sredinu od značaja su kako u zaštiti kvaliteta podzemnih voda, tako i u prehrambenoj i farmaceutskoj industriji [8, 9]. Industrijske operacije koriste sloj čvrstog koji je fizički, hemijski i biološki otporan i to čvrsto može igrati različitu ulogu u procesu: katalizatora, adsorbensa i jonoizmenjivača, neaktivnog punjenja koje utiče na povećanje kontakta faza radi intenziviranja prenosa mase i/ili toplote, filtracionog medijuma i sl.

Reološke osobine fluida i površinske pojave na površinama kontakta svih prisutnih faza toliko su složene, da su, i pored intenzivnih istraživanja još uvek u "zoni sumraka" između čisto fizičkih i hemijskih fenomena [10]. Ovaj rad je zamišljen kao doprinos pregledu istraživanja fenomena u poroznom sloju sa višefaznim sistemom.

DISPERZNI SISTEMI U KONTINUALNOJ TEČNOJ FAZI

Kontinualna faza

Kontinualna tečna faza značajno određuje osobine višefaznog sistema. Generalno, mogu se posmatrati dve osnovne grupe višefaznih sistema u odnosu na prirodu tečne faze. Teorijski, svaka organska ili neorganska tečnost može biti kontinualna faza. Čini se da je moguće tvrditi da suštinski, kontinualna faza uslovljava fenomene višefaznih sistema svojom gustinom, viskoznošću, moći rastvaranja, koncentracijom i jačinom prisutnih jona. Široko su rasprostranjeni višefazni sistemi kod kojih je kontinualna faza elektrolit, najčešće voda, ili organska faza, najčešće ulje mineralnog ili biološkog porekla [11,12].

Gustina kontinualne tečne faze može biti veća ili manja od dispergovanih komponenti. Gustina dispergovane faze u odnosu na gustinu kontinualne tečnosti, uslovljava smer raslojavanja nestabilnih sistema, jer će se lakše komponente kretati prema gornjim slojevima, a teže prema donjim slojevima kontinualne faze [13,14]. Razlika gustina faza uslovljava, ne samo intenzitet brzine taloženja, već i mogućnost deformacije dispergovanih kapi, što ima uticaja na brzinu koalescencije, o čemu će posebno biti reči.

Viskoznost kontinualne tečne faze u značajnoj meri određuje pokretljivost dispergovanih čestica u njenoj zapremini. Što je viskoznost sredine veća, to je veći otpor kretanju, a čestice manje pokretljive.

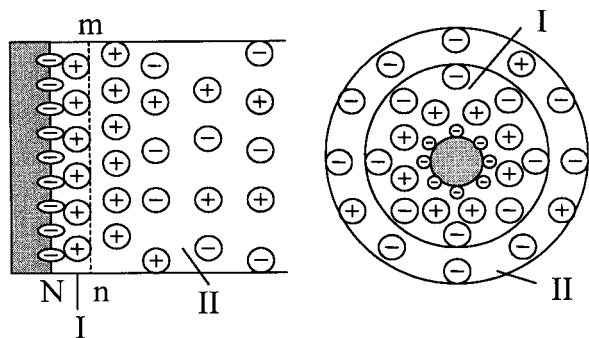
Moć rastvaranja kontinualne faze uslovljava veće ili manje prisustvo drugih molekula i jona u njoj, čime se mogu promeniti, ne samo njena gustina i viskoznost, nego i površinski napon i međupovršinski naponi u odnosu na dispergovane faze. Promenom broja i asortimana molekula i jona u kontinualnoj fazi, menja se i intenzitet i rezultujući efekti interakcije sa dispergovanim česticama.

Prisustvo jona u kontinualnoj fazi uslovljava, kao što je poznato, formiranje dvojnog električnog oblaka oko dispergovane čestice, koji sprečava spajanje česti-

Adresa autora: R. Šećerov Sokolović, Bul. Cara Lazara 1, 21000 Novi Sad

Rad primljen: Oktobar 28, 2003.

Rad prihvaćen: Januar 26, 2004.



Slika 1. Šematski prikaz dvojnog električnog sloja, I – unutrašnji jonski oblak, II – spoljašnji jonski oblak, MN – površina čestice, mn – granica oblaka I i II.

Figure 1. Double electrical layer: I – inside layer, II – outside layer, MN – solid surface, mn – border of two electrical layers

ce sa drugom česticom svoje faze (slika 1). Pored prisustva jona u nekim okolnostima (podzemnim kolektorima) vrlo je važna i jačina jona i njihova priroda, da li su u pitanju natrijum, kalcijum, sulfati ili hloridi, što otežava analizu sistema.

Višefazni sistem

Najvažnije osobine koje karakterišu disperzni sistem su: veličina čestica, granulometrijski i frakcioni sastav, koncentracija faza, stabilnost, viskoznost, električne osobine, optičke osobine, međupovršinski napon i površinske pojave. U ovom radu pod pojmom čestice podrazumevaće se element dispergovane čvrste ili tečne faze. Interakcija dispergovanih čestica međusobno, i njihova interakcija sa kontinualnom fazom spada u domen površinskih pojava na granici faza. Ti fenomeni su, u velikoj meri, uslovljeni osobinama obe faze.

Postoji veliki broj parametara koji određuje ponašanje sistema, te je teško doći do opštih i potpuno definisanih zavisnosti. Razvoj nauke i novih eksperimentalnih tehnika, kao i mogućnosti računara, intenzivirao je proučavanje površinskih pojava, i to od strane naučnika različitih profila: fizičara, hemičara, hemijskih inženjera, matematičara, ali opšte zakonitosti još nisu definisane [15].

Usled velike aktivne površine dispergovane faze, višefazni sistemi imaju visok sadržaj slobodne energije, te su, po svojoj prirodi, termodinamički nestabilni, i teže ka oblicima nižeg sadržaja energije [16,17]. To je posledica sila privlačenja, koje usmeravaju čestice ka agregaciji. Slobodna energija proporcionalna je međupovršinskom naponu i radu uloženom za dispergovanje.

Međumolekularne sile privlačenja javljaju se u svim okolnostima. Te sile su van der Waalsove i Londonove i posledica su delovanja dipola. Intenzitet tih privlačnih sila opada sa prvim stepenom rastojanja između molekula (x^{-1}), te su dugog radijusa dejstva.

Sile među česticama su sile koje se javljaju kao rezultanta međumolekularnih sila molekula koji čine česticu. Svaka čestica sastoji se iz većeg broja molekula, te

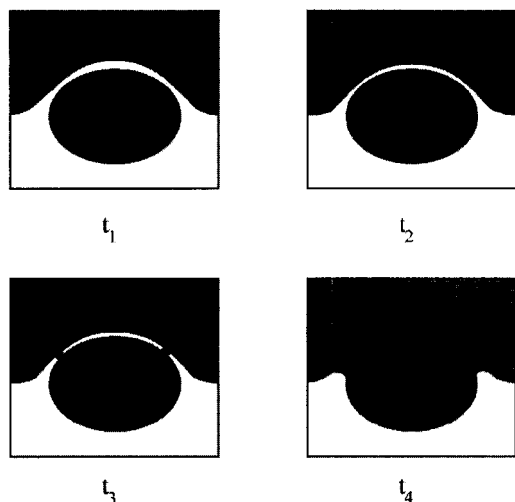
se može smatrati da će se ispoljiti privlačne međumolekularne sile između svakog molekula jedne čestice i svakog molekula druge, pa je njihov rezultujući intenzitet veći od intenziteta među bilo koja dva molekula.

Dispergovane čestice nisu proste hemijske strukture, nalaze se u tečnoj sredini koja je rastvor, koji može biti bogat jonima i drugim polarnim i nepolarnim, manjim i većim molekulima [18–20], te kontinualna faza može da prouzrokuje njihovo drugačije ponašanje. Ako je kontinualna faza elektrolit može da dođe do hidratacije i migracije jona i do formiranja dvojnog električnog sloja oko dispergovane čestice što je već naglašeno. Prisutni spoljni oblak jona oko čestica iste prirode je jednakog naelektrisanja, te će doći do njihovog međusobnog odbijanja. Porastom sila odbijanja, raste slobodna energija dispergovane površine, i da bi se čestice spojile, mora biti savladana veća energetska barijera. Jačina jona kontinualne faze određuje obim, debljinu i gustinu dvojnog električnog sloja. Kada je jačina jona velika, dvojni sloj formira se na malom rastojanju oko čestice i male je debljine, tako da se intenzitet odbojnih sila koje potiču od njega smanjuje, jer odbojne sile električnog dvojnog sloja su kratkog radijusa dejstva, tj. intenzitet opada eksponencijalno sa rastojanjem. To znači da dominiraju van der Waalsove privlačne sile. Pošto se između realnih čestica nalazi neki realan fluid, privlačne sile među njima su manjeg intenziteta nego kod idealnih sistema [21]. Suština teorije DLVO (Deryagin–Landau–Verwey–Oerwebeek) ogleda se u povezivanju i tumačenju međusobnih sila, fenomena i dejstava opisanih do sada. Stabilnost disperznog sistema kontrolisana je oblikom krive interaktivne slobodne energije. Po DLVO teoriji postoje samo dva činioca u toj energiji: privlačni van der Waals potencijal i odbojni potencijal koji nasataje kada se preklape difuzni jonski oblaci oko dve čestice.

Osobine disperzija uslovljene su i samom dimenzijom dispergovanih čestica. Krupnije čestice podložne su pre svega navedenim silama privlačenja i odbijanja, te će njihova stabilnost biti uslovljena rezultantom navedenih suprotnih efekata. Kinetička svojstva disperzija jako malih čestica, međutim ogledaju se u njihovom toplotnom, braunovskom kretanju, difuziji i visokoj stabilnosti.

Kada disperzija sadrži i kapi i čvrsto postoje četiri moguće međusobne interakcije: interakcija između dve kapi, interakcija malih kapi sa krupnijim čvrstim česticama, interakcija malih čvrstih čestica sa krupnijim kapima i interakcija između dve čvrste čestice.

Kada je reč o interakciji između dve kapi, treba poznavati fenomene koalescencije i dispergovanja. Fenomen koalescencije prvo je proučavan kao proces utapanja kapi dispergovane faze u svoju formiranu fazu koja se nalazi na površini ili na dnu kontinualne faze, u zavisnosti od gustina faza. Uvek je faza manje gustine na površini. Koalescencija kapi na granici koja je ravna površina proučavana je u dužem vremenskom periodu [22, 23]. Kap se nalazi u zapremini kontinualne faze i prvo mora da stigne do granice svoje faze. Primećeno je

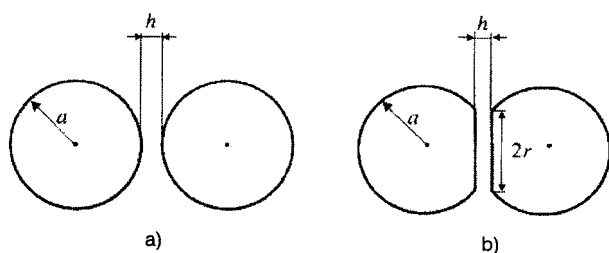


Slika 2. Koalescencija kapi na granici faza u vremenu
Figure 2. Interface drop coalescence as a function of time

da kada se kap približi granici dolazi do njene oscilacije, verovatno usled električnog pražnjenja ili razbijanja dvojnih električnih slojeva koji se nalaze i oko kapi i na površini granice faza. Daljim približavanjem kapi formira se film kontinualne faze koji postaje sve tanji i tanji, a zatim film puca i vrši se njegova drenaža iz međuprostora (slika 2). Vreme koje je potrebno da se realizuju svi navedeni koraci naziva se vreme koalescencije. Najsporiji korak jeste drenaža filma i ona je uslovljena njegovim oblikom i debljinom, kao i fizičko-hemijskim osobinama obe tečnosti. Na date fenomene utiču i veličina kapi, kao i koncentracija faza.

Ako se koncentracija dispergovane faze povećava, može da dođe do inverzije [24]. U jednom trenutku, pri određenom zapreminskom udelu dispergovane faze od oko 0,75, od dispergovane faze može da se formira kontinualna, a od kontinualne dispergovana.

Kada je u pitanju koalescencija između dve kapi tada je proces sličan [25, 26]. Takođe dolazi do približavanja, oscilacije, formiranja i ruptur filma kao i njegove drenaže. Posle toga formira se jedna veća kap u kojoj ne postoje granice prethodnih kapi. Proces koalescencije između kapi uslošnjava se uočenim pojavama da kapi mogu da se ponašaju kao krute sfere ili da dođe do njihove deformacije (slika 3). Film formiran između dve de-



Slika 3. Koalescencija između kapi, poluprečnik kapi a , rastojanje kapi h , (a) nedeformisane kapi, (b) deformisane kapi.

Figure 3. Two drop coalescence, drop radius a , drop distance h , (a) spherical drops, (b) flattened drops.

formisane kapi ima jednaku debljinu celom dužinom, te su njegovo pucanje i drenaža otežani. Od čega zavisi da li će kapi ostati nepromenjenog oblika ili će doći do deformacije još uvek je predmet proučavanja naučnika.

Male kapi dispergovane faze mogu se hvatati na površinu krupnijih čvrstih čestica, što će odrediti osobine kvašljivosti date čvrste površine tom tečnosti u postojećim realnim uslovima.

Male čestice čvrstog mogu da se uhvate na površinu kapi i da je opkole te time spreče koalescenciju između kapi i stabilizuju sistem. Stabilizacija sistema tečno-tečno može da se postigne i dodavanjem emulgatora (površinski aktivne materije ili molekuli polimera). Tako dolazi do prostornog odbijanja dispergovanih čestica i stabilizacije sistema dodatkom treće komponente (stabilizirajuće materije). Kod realnih sistema može da se desi da dispergovana ili kontinualna faza sadrže prirodne emulgatore i da spontano dođe do formiranja stabilnog sistema.

Interakcija između dve čvrste čestice uključuje fenomenone agregacije, koagulacije i flokulacije [27].

POROZNI SLOJ

Porozni sloj je sloj čvrstog materijala koji u svojoj strukturi ima protočne i slepe kanale, pore, različitog oblika i dimenzije [28]. Pore su relativno mali razmaci u matrici čvrstog, i najčešće sadrže jedan ili više fluida, tj. višefazni sistem. Sloj koji je predmet proučavanja u ovom radu je permeabilan, tj. fluid mora da može da prođe kroz njega sa jedne strane na drugu.

Najvažniji makroskopski parametri sloja su: poroznost, permeabilnost, specifična površina, koeficijent otpora i smanjenje kapilarnog pritiska. Morfologija i kvalitet površine čvrstog, kao i prostorni raspored čvrstog (pora) takođe, značajno utiču na osobine sloja.

Površinske pojave u poroznom sloju kroz koji protiče višefazni sistem su još složenije, i o njima će biti reči u narednom poglavlju. Kada je reč o interakciji čvrste površine sa fluidom, tada je neophodno ukazati na veličine: površinski napon, međupovršinski napon i kritični površinski napon. Najčešće se pod površinskim naponom podrazumeva da je to napon čvrste ili tečne površine u dodiru sa vazduhom, dok je međupovršinski napon interakcija između površina faza isključujući vazduh.

Kritični površinski napon je osobina čvrste površine koja određuje njenu kvašljivost različitim tečnostima, zapravo daje vrednost površinskog napona tečnosti za koju je ugao kvašenja definisane čvrste površine jednak nuli. Tečnosti čiji je površinski napon manji od kritičnog, slobodno se šire po toj čvrstoj površini, dok će tečnost sa većim površinskim naponom formirati kapi na čvrstoj površini određenog ugla kvašenja [29]. U literaturi se mogu naći podaci vrednosti kritičnog površinskog napona za veći broj čvrstih materijala [30]. Generalno se može reći da neorganski materijali (keramika, staklo, bakar, nerđajući čelik i sl.) imaju visoke vrednosti kritičnog pov-

ršinskog napona (100–1000 mN/m), dok su kod polimernih materijala one niže (20–50 mN/m).

Površina čvrstog u sloju u kome se nalazi kontinualna faza koja je elektrolit, kao i dispergovana čvrsta ili tečna čestica, biva opkoljena dvojnim električnim slojem. Kakav će to imati efekat na njihovu međusobnu interakciju zavisi od prostornog rasporeda jona pozitivnog i negativnog naelektrisanja i jačine jona, koja određuje debljinu jonskih oblaka, kako je već istaknuto.

U praksi poroznost može da se kreće praktično od nule pa skoro do jedan. Ako je u pitanju sloj formiran od nasutih granula, njegova poroznost se kreće do oko 0,50. Sloj vlakana predstavlja sloj visoke poroznosti. Postoje vlaknasti materijali (staklo, nerđajući čelik) koji, zbog svoje visoke krutosti, mogu da obezbede postojanu strukturu čija je poroznost i 0,99. S tim u vezi treba istaći da se fenomenološki, u velikoj meri, razlikuje sloj visoke poroznosti od sloja niske poroznosti [31].

DISPERZNI SISTEMI U POROZNOM SLOJU

Ako disperzni sistem protiče kroz porozan sloj, tada su moguće, u zavisnosti od niza parametara, sledeće situacije: da nema međusobne interakcije, da dođe do akumulacije dispergovane faze u prostoru pora i/ili na površini čvrstog, da se smanji ili poveća disperznost prisutnih čestica u prostoru pora, ili da dođe do otkidanja akumulisanih čestica ili čestica matrice čvrstog koja je mehanički neotporna. Pri proticanju u ovakvom sistemu dolazi do energetskih gubitaka usled oblika i usled produžnog trenja. Da bi se došlo do nekih egzaktnih zakonitosti koliki je udeo površinskog trenja, a koliki otpora usled oblika, neophodno je analizirati uticaj sila koje dominiraju u postojećim uslovima. Fenomene ponašanja višefaznog sistema u poroznom sloju neophodno je proučavati kako makroskopski tako i mikroskopski.

Da bi se razumeli mnogobrojni fenomeni složenog sistema disperzije u poroznoj sredini, neophodno je prodiskutovati makar najvažnije mehanizme i zakonitosti koje vladaju u njemu, o čemu su pisali naučnici još sedamdesetih godina prošlog veka [32,33].

Mogu se uočiti dve opšte grupe međusobnih interakcija između matrice čvrstog i dispergovanih čestica: sile ili mehanizmi zadržavanja i sile ili mehanizmi otkidanja.

Mehanizmi zadržavanja mogu da se grupišu u dve osnovne grupe: transportni mehanizmi i mehanizmi privlačenja. U transportne mehanizme se mogu ubrojati: prosejavanje, presretanje, hidrodinamička sila, taloženje, inercija, difuzija. Do prosejavanja dolazi kada je čestica koja prolazi većih dimenzija od kanala, te se ona zaglavi. U tim okolnostima drugi mehanizmi zadržavanja i ne dolaze do izražaja. Međusobna interakcija matrice čvrstog i dispergovane čestice, zapravo se odnosi na one čestice čije su dimenzije značajno manje od prečnika pora, kanala. U mehanizme privlačenja mogu se uključiti: elektrostatička interakcija, van der Waalsove sile, adhezija, međusobna adsorpcija.

Hidrodinamička sila određena brzinom kretanja fluida, praktično je dominantna veličina koja jasno određuje granicu oblasti delovanja sila zadržavanja od sila otkidanja. Mehanizam delovanja hidrodinamičke sile pri malim brzinama strujanja fluida, ogleda se u postojanju gradijenta brzine unutar pora. Na zidovima pora brzina je jednaka nuli, dok je u središnjem delu pora maksimalna, što izaziva rotaciju čestica. Rotacija usmerava čestice ka površini zidova pora, tj. ka sporijim slojevima tečnosti. Pri maloj hidrodinamičkoj sili, dolazi do izražaja međusobno privlačenje čestica i površine matrice čvrstog, ukoliko dvojni električni slojevi oko njihovih površina to dozvoljavaju, i vrši se akumulacija dispergovane faze. Na taj način, slobodan poprečni presek pora koji je na raspolaganju strujanju višefaznog sistema smanjuje se sa vremenom, menja se udeo faza u porama, što utiče na povećanje mesne brzine fluida i intenzitet hidrodinamičke sile. U nekom trenutku mesna brzina može da bude dovoljno velika da počne da nosi akumulisane čestice. Nije dovoljno poznato koliki je maksimalni udeo zapremine pora koji može biti ispunjen akumulisanom dispergovanom fazom, a da ne dođe do otkidanja. To je uslovljeno kako intenzitetom hidrodinamičke sile, tako i rezultantom ostalih interakcija. Postoje neke procene da se pri malim brzinama može posednuti oko 30% zapremine pora, a da ne dođe do otkidanja i iznošenja akumulisane dispergovane faze. Koja je to oblast vrednosti brzina ne može se sa sigurnošću tvrditi, jer nije poznat intenzitet ostalih interakcija koje je potrebno savladati. Vrlo rano je definisan modifikovan Reynoldsov broj za poroznu sredinu i potvrđeno sa sigurnošću da je za njegovu vrednost manju od 1 dominantno deluju viskozne sile, tj. da postoji gradijent brzina u porama [34]. Pri velikim vrednostima početne brzine fluida nema gradijenta brzine, te time ni graničnog sloja fluida na površini zida pora. U tim uslovima je moguće da ne dolazi do akumulacije dispergovane faze i/ili da dođe do otkidanja već akumulisanih čestica.

Još je Darsy definisao da je pad pritiska po jedinici debljine poroznog sloja pri proticanju fluida linearna funkcija brzine, pri malim brzinama. On je i definisao koeficijent permeabilnosti kao merilo provodljivosti sloja u odnosu na fluid. Kada je u pitanju višefazni sistem tečno/tečno, tada se Darsyjevi zakon odnosi na svaku pojedinačnu fazu posebno, a merljiva veličina je relativna permeabilnost jedne od faza kao udeo ukupno moguće permeabilnosti. Kod sistema čvrsto/tečno veličina koja pokazuje odnos faza u zapremini pora jeste koeficijent filtracije. Preciznija izračunavanja navedenih veličina preko matematičkih relacija još uvek su predmet istraživanja [35–37].

Fenomene privlačenja i otkidanja kod pojedinačnih čestica se dešavaju i simultano. Promena disperznosti višefaznog sistema ogleda se ili kroz smanjenje ili kroz povećanje veličina čestica. U porama sloja, pri različitim uslovima, može da dođe i do drobljenja i do uvećavanja čestica. Ako se sistem nalazi u režimu dominantnog de-

lovanja mehanizama zarobljavanja, tada je verovatnoća uveličavanja čestica disperzije koagulacijom (koalescencijom) velika. Čak i u pojedinim fazama otkidanja akumuliranih čestica može da se otkidaju veće čestice od onih koje ulaze u sloj. Ako je brzina fluida velika, naročito pri malim prečnicima pora, može da dođe do povećanja disperznosti, i to kao posledica drobljenja i ulaznih i otkinutih čestica.

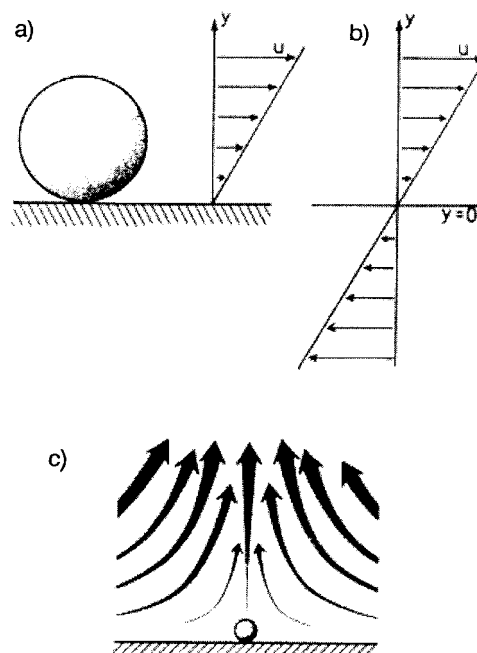
Da li će u poroznom sloju doći do dominantnog zadržavanja ili otkidanja disperzne faze, kao što je već napomenuto, zavisi od mesne brzine strujanja fluida. Dok je hidrodinamička sila manja od ostalih uticaja zadržavanja, sistem će biti u zoni akumulacije, ali kada mesna brzina fluida premaši intenzitet ostalih efekata zadržavanja dolazi do masovnog otkidanja i nošenja akumulirane dispergovane faze. Kod operacije filtracije kroz duboki sloj kaže se da je došlo do prosejavanja filtra ili da je iskorišćeno vreme zaštitnog svojstva filtra. Vrednost srednje brzine fluida pri kojoj sistem prelazi iz oblasti dominantnog zadržavanja u oblast dominantnog otkidanja naziva se kritična brzina. Ovu veličinu naučnici su ranu uočili, ali šta sve utiče na njenu vrednost i kako se može matematički izračunati i dalje je predmet istraživanja [38–40].

Fenomeni i mehanizmi otkidanja ušli su u fokus istraživača istovremeno sa fenomenima zadržavanja [41–44]. Već je istaknuto da otkidanje može da bude posledica više uzroka. Te uzroke najbolje je posmatrati kroz dve grupe: fizičko uznemiravanje i promena hemije sistema.

Fizičko uznemiravanje odnosi se na porast lokalne brzine kretanja fluida, dok se hemija sistema menja promenom pH sredine, jonskim sastavom kontinualne faze, promenom prirode površine matrice čvrstog usled dodavanja ili uklanjanja površinski aktivnih supstanci. Pored tendencije klizanja, čestica je izložena i kotrljanju, i podizanju kao posledica efekata delovanja sile potiska, sile trenja i adhezione sile (slika 4).

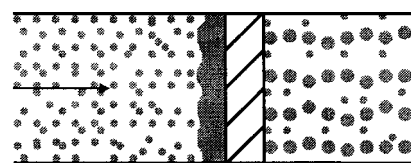
Pored međupovršinskih fenomena i interakcije između površine matrice čvrstog i dispergovane čestice stvar se usložnjava dalje što i morfologija deponovanog taloga utiče dalje na fenomene [45].

Nestacionarni uslovi proticanja višefaznog sistema kroz porozan sloj ogledaju se u porastu pada pritiska sa vremenom. U zavisnosti od brzine strujanja fluida, osobina sloja i disperzije, porast pada pritiska u vremenu može biti linearan, ili eksponencijalan. Kada se dostigne maksimalno moguća akumulacija dispergovane faze u zapremini pora za postojeće realne uslove, daljim radom doći će do iznošenja dela dispergovane faze. Kod operacije filtracije kroz nasuti sloj dolazi do prosejavanja filtra, te je vreme za njegovo pranje. Međutim, ako je u porama poroznog medijuma akumulirana tečna dispergovana faza, tada kapi koje napuštaju sloj mogu biti većeg prečnika od onih koje ulaze, i one se mogu efikasnije odvojiti gravitacionom separacijom. Metoda koja koristi taj fenomen za separaciju emulzija može se nazvati ko-



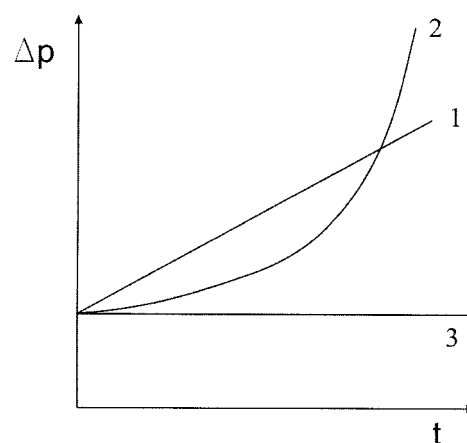
Slika 4. Šematski prikaz mehanizama otkidanja kapi: a) klizanje, b) kotrljanje, c) dizanje.

Figure 4. Drop detachment mechanisms: a) sliding, b) rolling, c) lifting.



Slika 5. Koalescentna filtracija.

Figure 5. Bed coalescence.



Slika 6. Pad pritiska u vremenu za nestacionarno, krive 1 i 2 i stacionarno stanje, kriva 3.

Figure 6. Pressure drop as a function of time for unsteady-state regime, curves 1 and 2, and a steady-state regime, curve 3.

alescentna filtracija (slika 5). Sve vreme rada nadalje sistem je u stacionarnom stanju, nema promene količine dispergovane faze u porama sloja niti promene pada pritiska (slika 6).

LITERATURA

- [1] J.N. Ryan, M. Elimelech; *Colloids and Surfaces SA*, **107** (1996) 1–56.
- [2] F.A.L. Dullien; *Porous Media Fluid Transport and Pore Structure*, Academic Press, 1992.
- [3] T.W. Chiu, R.J. Wakeman, P.R. Harris, O.F.J. Meuric; *Trans. I Chem. Eng.*, **74** (A) (1996) 220–231.
- [4] Sung-Jae Kim, L.D. Benefield; *Separation Science and Technology*, **31** (19) (1996) 2621–2653.
- [5] B. Maini, F. Wassmuth, L.L. Schramm; *Advances in Chemistry Series* **251** (1996) 321–375.
- [6] T. Pernyesyi, A. Patzko, O. Berkesi, I. Dekany; *Colloids and Surfaces SA*, **137** (1998) 373–384.
- [7] R.M. Šećerov Sokolović, S.M. Sokolović; *Koalescencija u poroznom sloju*, Monografija, Tehnološki fakultet, 2000.
- [8] G. Chen, K.A. Strevett; *Environmental Microbiology* (2001) 237–245.
- [9] Y. Jin, M. Flury; *Advances in Agronomy* **77** (2002) 39–102.
- [10] D.Y. Myers; *Surfaces, Interfaces and Colloids, Principles and Applications*, Wiley-VCH, 1999.
- [11] J. Soma, K.D. Papadopoulos; *Colloids and Surfaces* **101** (1995) 51–61.
- [12] F.A. Schneider, D.W.T. Rippin; *Ind. Eng. Chem. Res.* **29** (1990) 988–994.
- [13] J. Hapanowiz, L. Troniewski; *Chem. Engin. Proc.* **41** (2002) 165–172.
- [14] J. Hapanowiz, L. Troniewski, S. Witczak; *Transactions of the Institute of Fluid-Flow* **106** (2000) 3–12.
- [15] D.H. Everett; *Basic Principles of Colloid Science*, University of Bristol, 1988.
- [16] M. Elimelech; C.R. O'Melia; *Langmuir*, **6** (6) (1990) 1153–1163.
- [17] M. Elimelech; *J. Colloid Interface Sci.*, **146** (2) (1991) 337–352.
- [18] M. Elimelech; *Wat. Res.* **26** (1) (1992) 1–8.
- [19] M. Elimelech, P.R. Johnson; *Langmuir* **11** (3) (1993) 801–812.
- [20] Elimelech, M., J. Gregory, X. Jia, R.A. Williams; *Particle Deposition and Aggregation*, BH Oxford, 1995.
- [21] R. Bai, C. Tien; *J. Colloid Interface Sci.*, **186** (1997) 307–317.
- [22] W. Rommel, W. Meon, E. Blass; *Separation Sci. Technol.* **27** (2) (1992) 129–159.
- [23] Q. Saether, J. Sjoblom, S. Verbich, S.S. Dukhin; *J. Dispersion Sci Techn.* **20** (1) (1999) 295–314.
- [24] G.E.J. Vaessen, M. Visschers, H.N. Stein; *Langmuir* **12** (4) (1996) 875–882.
- [25] I.B. Ivanov, K.D. Danov, P.A. Kralchevsky; *Colloids and Surfaces SA* **152** (1999) 161–182.
- [26] T. Sakai, K. Kamogawa, F. Harusawa, N. Momozawa, H. Sakai, M. Abe; *J. Surfaces and Colloids* **17** (2) (2001) 255–259.
- [27] J. Lee, J. Koplik; *Physical Review* **E54** (4) (1996) 4011–4020.
- [28] R.M. Šećerov Sokolović, S.M. Sokolović; *Inženjerstvo u zaštiti okoline*, Tehnološki fakultet, Novi Sad, 2002.
- [29] K.G. Kabza, J.E. Gestwiski, J.L. McGrath; *J. Chem. Educ.* **77** (1) (2000) 66–70.
- [30] J. Lee, J. Koplik; *Physics of Fluids*, **11** (1) (1999) 76–87.
- [31] Šećerov Sokolović R.M., Stanimirović O.P., Sokolović S.M.; *Hem. Ind.* **57** (7–8) (2003) 335–340.
- [32] K.J. Ives; *The Scientific Basis of Filtration*, Noordhoff–Leyden 1975.
- [33] L.A. Spilman, J.A. Fitzpatrick; *J. Colloid Interface Sci.* **42** (3) (1973) 607–623.
- [34] G.W. Jackson, D.F. James; *Can. J. Chem. Eng.* **64** (1986) 364–374.
- [35] J. Hapanowiz, L. Troniewski; *Chem. Eng. Proc.* **41** (2002) 165–172.
- [36] B.N. Dhotkar, R.P. Chhabra, V.J. Eswaran; *App. Polym. Sci.* **76** (2000) 1171–1185.
- [37] S. Shibu, R.P. Chhabra, V. Eswaran; *Chem. Eng. Sci.* **56** (2001) 5545–5554.
- [38] J.I. Rosenfield, D.T. Wasan; *Can. J. Chem. Eng.* **52** (2) (1974) 3–9.
- [39] S.D. Rege, H.S. Fogler; *AIChE J.* **34** (11) (1988) 1761–1771.
- [40] R.M. Šećerov Sokolović, S.M. Sokolović, B.D. Đoković; *Ind. Eng. Chem. Res.* **36** (1997) 4949–4953.
- [41] M.A. Hubbe; *Colloids and Surfaces* **12** (1984) 151–178.
- [42] M.A. Hubbe; *Colloids and Surfaces* **16** (1985) 227–248.
- [43] M.A. Hubbe; *Colloids and Surfaces* **16** (1985) 249–270.
- [44] K.J. Ives, C.S.B. Fitzpatrick; *Colloids and Surfaces* **39** (1989) 239–253.
- [45] M. Wiesner; *J. Envir. Eng.* **12** (1999) 1124–1132.
- [46] R. Bai, C. Tien; *J. Colloid and Interface Science* **186** (1997) 307–317.
- [47] H. Sharifi, J.M. Shaw; **51** (21) (1996) 4817–4826.

SUMMARY

DISPERSIONS IN POROUS BEDS

(Review paper)

Radmila M. Šećerov Sokolović, Slobodan M. Sokolović
Faculty of Technology, Novi Sad

Dispersions and porous media exist either in nature or in industrial applications. They have been the subject of investigations for a long time, but the complexity of the phenomenon is the major obstacle to its better understanding. Many factors influence the interface interactions, transport, accumulation and detachment of particles in a porous matrix limiting new applications. The current state of investigations which include dispersions in the liquid continuous phase, especially emulsions, liquid/solid interface interactions in porous media and some new mathematical functions were reviewed in this paper.

Key words: Dispersions • Emulsions • Interface interactions • Porous media •
Ključne reči: Disperzije • Emulzije • Površinske pojave • Porozni sloj •