

Kada tlak u plućima padne na neku donju graničnu vrijednost, uređaj se opet automatski prebacuje u položaj udisaja i ciklus se ponavlja.

Jedno od mogućih rješenja *umjetnog srca* predstavlja sistem prikazan na sl. 61. Pumpa, «umjetno srce», djeluje na ovaj način: kada se otvori ventil za podešavanje tlaka (4), stlačeni uzduh teče u lijevi kanal specijalnog bistabila čiji su otvori za odražavanje izvedeni tako da je osjetljiv prema promjeni protoka, a zatim u komoru pumpe (1) istiskujući krv iz mijeha kroz izlazni (tlačni) ventil pumpe. Zbog toga dolazi do otvaranja otvora za upravljanje deformacijom mijeha (3), te signal deformacije mijeha djeluje kroz lijevi upravljački vod (3) bistabila, tako da se mlaz prebacuje u desni izlazni kanal. Uslijed toga dolazi do odražavanja lijevog upravljačkog kanala i komore pumpe. Tlak u komori pumpe se smanjuje i omogućava ponovno punjenje mijeha krvlju kroz usisni ventil pumpe. Istovremeno se usisava uzduh i kroz desni upravljački vod, u kojem je ugrađena prigušnica za podešavanje trajanja pulsa. Kada se otvor za upravljanje otklona mijeha ponovo zatvori, tlak u desnom upravljačkom kanalu poraste tako da se formira upravljački signal koji mlaz ponovo prebacuje u lijevi izlazni kanal, i time počinje novi ciklus. Praktična izvedba umjetnog srca prema ovoj shemi omogućuje podešavanje tlaka krvi od 0 do 650 mbar, protoka od 0,5 do 10 l/min i pulsa od 30 do 180 udaraca na minutu.

LIT.: V. Ferner, *Anschauliche Regelungstechnik*, Berlin 1960. — R. Hahn, *Digitale Steuerungstechnik*, Stuttgart 1961. — J. F. Blackburn, G. Reethof, S. L. Shearer, *Fluid power control* (njemačko izdanje), Mainz 1962. — H. Zoebli, *Pneumatikfibel*, Mainz 1964. — V. Weuh, *Elemente der Schaltungsgebra*, München 1964. — Пневмо- и гидроавтоматика (Сборник), Москва 1964. — F. E. Humphrey, H. D. Tarumoto (eds.), *Fluidics*, Boston (Mass.) 1965. — S. M. Kirshner, *Fluid amplifiers*, New York 1966. — Пневмоавтоматика (Сборник), Москва 1966. — L. A. Zalmanzon, *Components for pneumatic control systems*, New York 1967. — D. Grosser, *Arbeitsbuch der Drucklufttechnik*, Mainz 1968. — K. Ziesling, *Kombinationsbuch für pneumatische Steuerungen*, Mainz 1968. — Л. А. Залманзон, *Теория элементов пневмоники*, Москва 1969. — K. Foster, G. A. Parker, *Fluidics - Components and circuits*, New York 1970. — V. Multrus, *Fluidik, Pneumatische Logikelemente und Steuerungssysteme* (prijevod s češkoga), Mainz 1970. — L. Helm, J. Marton, *Pneumatikus logikai elemek*, Budapest 1971 (njem. prijevod: Einführung in die Fluidik-Pneumatische logische Elemente und Systeme, München-Wien 1971). — *Fluidonics Division of the Imperial-Eastman Corp.*, - Fluidika - elementi, sistemi, projektiranje, Zagreb, 1975.

G. Nikolić A. Stušek

FLUIDIZACIJA, operacija kojom se sloj čvrstih čestica, kontaktom s plinom ili tekućinom dovodi u stanje slično tekućini koja vrije. Pri tome dolazi do međusobnog miješanja kako samih čestica čvrste tvari tako i tih čestica i sredstva za fluidizaciju (plina ili tekućine). Ovakvo ponašanje fluidiziranih slojeva čvrste tvari ispoljava neke karakteristike homogenih sistema, pa se fluidizirani sloj često naziva pseudohomogenim sistemom.

U procesnoj tehnici fluidizacija se upotrebljava kako kod dvofaznih sistema (sistema od jedne čvrste i jedne tekuće, odnosno jedne plinovite faze), tako i kod višefaznih sistema (npr. sistema od jedne čvrste, jedne tekuće i jedne plinovite faze, sistema od više čvrstih faza i jedne tekuće, odnosno jedne plinovite faze). Tako se fluidizacija danas primjenjuje npr. kao metoda miješanja prašaka dviju ili više čvrstih komponenata, gdje se drugim metodama miješanja narušava željena granulacija (veličina zrna) i nasipna težina materijala (težina materijala sadržanog u jedinici volumena); ona nalazi danas najširu primjenu u katalitičkim procesima (v. dalje); također je značajna njena primjena u sušenju sipkih i vrlo vlažnih sitnozrnastih (pastastih) materijala.

Kod fluidizacije višefaznih sistema pogotovo u području reaktorske tehnike, gdje se u fluidiziranom sloju istodobno javlja prijenos količine gibanja, energije i tvari na površinu čvrste tvari (čestice sloja) bilo uz heterogenu kemijsku reakciju (uz sudjelovanje više faza) bilo uz homogenu kemijsku reakciju (reakciju unutar jedne faze), opis sistema postaje veoma složen i specifičan. Zbog toga se razmatranje teoretskih osnova fluidizacije u ovom članku nužno ograničava na analizu osnovnih fizikalno-hidrodinamičkih karakteristika fluidiziranog sloja manje složenih sistema, kao što su dvofazni sistemi čvrsto-plinovito ili čvrsto-tekuće, bez odvijanja kemijske reakcije.

Početak primjene fluidizacije nije sa sigurnošću utvrđen. Prema zapisima G. Agricole (1494—1555) primjenjena je fluidizacija već u XVI st. za pročišćavanje ruda u prostroju toku tekućine. Bolja tehnička rješenja namijenjena sličnoj svrsi javljaju se u prošlom stoljeću. Prva ozbiljnija industrijska primjena fluidizacije javlja se 1910, kada su W. A. Phillips i J. A. Bulteel dobili patent za katalitički reaktor sa fluidiziranim slojem katalizatora, gdje je plinska faza (fluidizator) korištena ujedno i za recirkulaciju finopraškastog katalizatora.

Vjerojatno prvi ovakav uređaj komercijalnog značaja bio je Winklerov plinski generator koji je razvila tvrtka BASF (Badische Anilin und Soda Fabrik) 1921 u Njemačkoj. Ovaj je uređaj upotrijebljen za proizvodnju generatorskog plina iz ugljene prašine i smjese zraka i vodene pare u fluidiziranom sloju. Tijekom sljedećih godina bili su konstruirani brojni aparati slične izvedbe, a korišteni su prvenstveno u Njemačkoj i Japanu, gdje je bila velika potražnja sirovog plina za kemijske sinteze.

Prva veća primjena fluidizacije u USA javlja se 1940, a odnosi se na kontinuirani postupak katalitičkog krekkinga naftinih para. Za vrijeme drugog svjetskog rata pojavila se velika potražnja visokootantskih goriva, što je dovelo do razvoja novih katalitičkih procesa prerade nafte i pojedinih njenih frakcija. U tim postupcima fluidizacija je našla značajno mjesto. Uspješnost primjene fluidizacije u tim tehnološkim postupcima uvjetuje njen intenzivni razvoj u nizu industrijski razvijenih zemalja (USA, Francuska, Engleska i dr.); pedesetih godina javljaju se veće grupe istraživača koji razvijaju nove tehnološke primjene bazirane na teoretskim studijama ove operacije.

Osnovne karakteristike fluidiziranog sloja

Fluidizirani sloj čvrstih čestica pojavljuje se u više vidova, što je uglavnom uvjetovano karakteristikama sistema čvrsto-fluid, geometrijom prostora u kojem se fluidizirani sloj nalazi, brzinom strujanja fluida kojim se sloj fluidizira (fluidizatora) kroz sloj i o tipu (vrsti) nosača sloja, tzv. razdjelne rešetke odnosno distributora, kroz koji se fluidizator raspodjeljuje u donjoj, gustoj zoni fluidiziranog sloja.

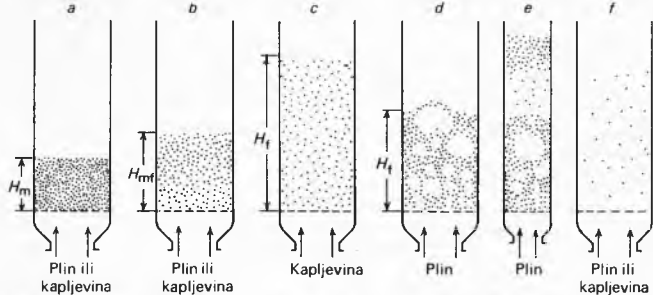
Nastajanje fluidiziranog sloja čestica čvrstog materijala prolaskom struje fluidizatora kroz razdjelnu rešetku kojom je pregrađen donji dio kolone za fluidizaciju shematski je prikazan na sl. 1. Razdjelna rešetka ima ovdje dvojak funkciju: sprečava propadanje materijala u niže zone uređaja, te oblikom i brojem otvora ostvaruje željenu raspodjelu fluida, koji se u uređaj za fluidizaciju uvodi odozdo. Pri razmjerno malim brzinama strujanja fluidizatora (sl. 1 a), sloj čvrstih čestica mirno leži na razdjelnoj rešetki, pri čemu se ostvaruje njegovo najtješnje pakovanje. (Za razlikovanje od fluidiziranog sloja ovaj sloj naziva se mirujućim, a visina mu se označava s H_m .) Pri tome su karakteristike strujanja fluidizatora jednake kao kod strujanja fluida kroz poroznu sredinu (v. *Hidromehanika*).

Ovisnost pada tlaka Δp fluidizatora o brzini v_m njegovog strujanja kroz mirujućii sloj izražena je pri malim brzinama linearnom, a pri velikim brzinama paraboličnom funkcijom. Linearna ovisnost Δp o v_m karakteristična je za protočne sisteme u kojima prevladavaju sile viskoziteta, dok je paraboličan oblik te funkcije karakteristika protočnog sistema s vrtložnim, turbulentnim tokom fluida u kojemu prevladavaju sile inercije.

Povećanjem brzine strujanja fluidizatora pad tlaka u sloju raste samo do neke granice, a onda, unatoč daljem povećavanju brzine, zadržava približno konstantnu vrijednost. Ovakav tok funkcije $\Delta p, v$ posljedica je bitnih promjena koje se javljaju u do tada mirnom sloju čvrstih čestica. Naime, kad je brzina strujanja fluidizatora nešto manja od brzine kod koje nastupa karakteristična promjena ovisnosti $\Delta p, v$, pojavljuje se gibanje čestica čvrste tvari na gornjoj površini sloja, praćeno povećanjem visine sloja, odnosno njegovog volumena (poznato pod nazivom ekspanzija sloja).

Brzina strujanja fluidizatora kod koje dolazi do promjene toka funkcije $\Delta p, v$ naziva se minimalnom brzinom fluidizacije (v_{m1}). Minimalnoj brzini fluidizacije odgovara i minimalna visina H_{m1} fluidiziranog sloja (sl. 1 b). Minimalna brzina fluidizacije predstavlja prvi granični uvjet za provedbu fluidizacije, pa se stoga naziva također donjom kritičnom brzinom fluidizacije i označuje simbolom v_{k1} .

Daljim povećavanjem brzine strujanja fluidizatora dolazi do primjetne ekspanzije sloja (povećavanja visine H_f fluidiziranog sloja, sl. 1 c) praćene sve intenzivnijim kretanjem čestica sloja.



Sl. 1. Tipovi kontakta čvrste tvari i fluidizatora. a Mirujući sloj, b minimalna fluidizacija, c partikularna fluidizacija; d, e agregativna fluidizacija (pojavom mjehura, odnosno mjehura i čepova); f fluidizacija u «rijetku» fazu s transportom čestica

Raspodjela čvrste tvari po visini sloja postaje sve ravnomjernija, a koncentracija čvrste tvari u sloju sve manja. U tom području brzina strujanja fluidizatora, koja se nalazi između v_{m1} pa do brzina koje su nekoliko puta veće od v_{m1} , odvija se tipična fluidizacija. Čestice čvrste tvari suspendirane su u uzlaznoj struji fluidizatora, što znači da se kod tih okolnosti sile trenja između čestica i fluidizatora izjednačavaju sa silom teže koja djeluje na svaku česticu

sloja. Pad tlaka kroz sloj postaje jednak težini sloja po jedinici površine vodoravnog presjeka uređaja u kojemu se sloj nalazi i prestaje biti funkcija brzine strujanja fluidizatora.

Pri daljem povećavanju brzine strujanja fluidizatora sloj postoji u tipično fluidiziranim stanjima sve dok se ne dosegne brzina v_0 strujanja fluidizatora kod koje nastupa odnošenje čestica iz sloja (tzv. brzine odnošenja), poznato pod nazivom pneumatski ili hidraulički transport (ovisno o tome da li je fluidizator plin ili tekućina), sl. 1 f. Ta brzina predstavlja drugi granični uvjet fluidizacije, poznat pod nazivom gornja kritična brzina fluidizacije, koja se označava s v_{k2} . Pri toj brzini i ekspanzija sloja dostiže svoju maksimalnu vrijednost (pri maksimalnoj visini H_{max} i maksimalnom volumenu V_{max} sloja). Prekoračenjem brzine odnošenja fluidizirani sloj gubi karakteristike stacionarnog stanja, fizikalno-hidrodinamički parametri sistema postaju funkcija vremena, a fluidizacija poprima karakter diskontinuirane operacije. Za industrijsku praksu mnogo značajnija kontinuirana fluidizacija u tim uvjetima može se naravno ostvariti, ako se gubitak materijala iz sloja, koji nastaje odnošenjem transportom, stalno (kontinuirano) nadomješta novim materijalom.

Kod fluidizacije tekućim fluidizatorom povećavanje njegove brzine u području iznad vrijednosti koja odgovara minimalnoj brzini fluidizacije obično dovodi do ravnomjerne ekspanzije sloja, bez većih razlika koncentracije čvrste faze u njegovim pojedinim dijelovima (zonama). Ovakvi slojevi ne pokazuju tendenciju stvaranja lokalnih aglomerata, čije prisustvo najčešće izaziva nestabilnost sloja. Ravnomjerno ekspanzirani slojevi (sl. 1 c) pojavljuju se redovito pri fluidizaciji sistema u kojima su prisutne samo faze gustoćom jedne od drugih malo različite. Tad se običava govoriti o partikularno fluidiziranim (homogeno fluidiziranim ili, jednostavno tekuće fluidiziranim) slojevima.

Plinno fluidizirani slojevi čvrstih čestica pokazuju ponašanje bitno različito od ponašanja slojeva fluidiziranih tekućinom. U području brzina strujanja fluidizatora bliskih minimalnoj brzini fluidizacije sistemi čvrsto-plinovito ispoljavaju bitna kolebanja visine sloja uz pojavu mjehura plinske faze (sl. 1 d), koji prolaskom kroz sloj mijenjaju svoj oblik i volumen uvjetujući lokalne promjene gustoće. Često je geometrija sloja kod ovakvih sistema od presudnog značaja za kvalitetu fluidizacije. Ako je visina sloja izrazito veća od promjera posude (kolone), a čestice sloja veoma fine, vrlo često dolazi do pojave da mjehuri stvoreni u donjim zonama sloja prerastu u jedan mjehur takvih dimenzija da on zauzme čitav presjek posude (sl. 1 e). Takve pojave uzrokuju stvaranje jednog ili više čepova čvrste tvari. Ako su čestice čvrste tvari vrlo fine, u tako fluidiziranom sloju može doći i do formiranja kažala, kroz koje prolazi veći dio fluidizatora. U fluidiziranim slojevima kod kojih se javljaju mjehuri i kanali dolazi do stvaranja aglomerata čestica čvrste tvari, pa se takav tip fluidizacije naziva agregativnom fluidizacijom, a ti slojevi agregativno ili heterogeno fluidiziranim slojevima.

Donekle se sve ove karakteristike fluidiziranih slojeva mogu na zadovoljavajući način opisati jednadžbama na osnovi kojih se, za dani slučaj, može dobiti uvid u funkcionalnu vezu fizikalno-hidrodinamičkih i geometrijskih parametara sistema. Problematika rješavanja jednadžbi s pomoću kojih se analizira ponašanje fluidiziranih slojeva vezana je, u prvom redu, na poznavanje niza osnovnih parametara sistema kao što su: mjerodavni promjer zrna čvrste tvari, njene gustoće i specifične površine u sloju, faktora oblika čestica, slobodnog volumena (poroznosti) fluidiziranog sloja, donje i gornje kritične brzine fluidizacije, ovisnosti volumena sloja i pada tlaka kroz sloj o brzini strujanja fluidizatora, koeficijenta trenja u fluidiziranom sloju, kriterija za kvalitetu fluidizacije.

Energetska stanja fluidiziranog sloja. Osnovni oblik energije koju fluidizirani sloj izmjenjuje s okolinom jest kinetička energija. Tu energiju sloju privodi fluidizator. Povećanjem sadržaja energije fluidizatora uslijed povećanja njegove brzine strujanja povećava se i sadržaj kinetičke energije E_{ke} čestica sloja, a time i njihova brzina gibanja. Dakako, to je moguće samo ako se istovremeno povećavaju duljine slobodnih putova tog gibanja (tj. ako sloj ekspandira). Matematički izraženo to znači da je ki-

netička energija čvrstih čestica u fluidiziranom sloju funkcija brzine strujanja fluidizatora, pa se smije pisati:

$$E_{ke} = \frac{m_c \bar{u}_c^2}{2} = f(v),$$

gdje je m_c masa čestica, \bar{u}_c srednja brzina čestica, v srednja brzina strujanja fluidizatora.

Izraz za kinetičku energiju čestica fluidiziranog sloja našao je potvrdu u matematičkoj analizi pulzacionog kretanja unutar ovakvih slojeva. Razmatrajući utjecaj gravitacije na periodičku kontrakciju (sažimanje) elementarnog volumena sloja i sila hidrodinamičkog tlaka koje djeluju na povećanje tog volumena, J. Furukava i T. Ohmae su uvođenjem srednje vrijednosti kinetičke i potencijalne energije pulzacionog kretanja čvrstih čestica promjera d_c dobili izraz:

$$E_{ke} = 11 \pi \eta_f \left(\frac{d_c}{r_c} \right)^2 \left(1 + \frac{d_c}{r_c} \right) a_c v,$$

gdje se r_c , srednji razmak između čestica, i a_c , amplituda njihovog pulzacionog gibanja, mijenjaju u zavisnosti od brzine v a η_f je koeficijent viskoznosti fluidizatora.

Iz energetske analize fluidiziranih slojeva može se izvesti zaključak da se čitav niz njihovih svojstvenih parametara mijenja u zavisnosti od srednje brzine strujanja fluidizatora.

Volumen fluidiziranog sloja. Za određivanje volumena V fluidiziranog sloja kod bilo koje brzine v strujanja fluidizatora u granicama $v_{mf} < v < v_0$, može se na osnovi poznatih vrijednosti graničnih brzina (v_{mf} , v_0) i graničnih volumena fluidiziranog sloja V_{mf} i V_{max} , koje odgovaraju tim brzinama, upotrijebiti izraz

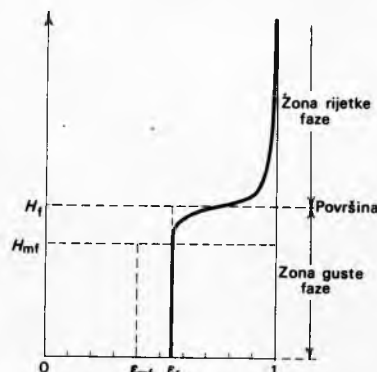
$$\frac{V}{V_{mf}} = \frac{V_{max}}{V_{mf}} - \left(\frac{V_{max}}{V_{mf}} - 1 \right) \left(1 - \frac{v - v_{mf}}{v_0 - v_{mf}} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Pri tome se za V_{max} uzima volumen sloja tik prije početka odnošenja materijala iz sloja.

Poroznost fluidiziranog sloja (koeficijent slobodnog volumena). Udio volumena koji nije zaposjednut čvrstim česticama u ukupnom volumenu sloja naziva se poroznošću sloja, a označava sa ε . Veličina ε ovisi o obliku elemenata sloja i nije ovisna o njihovoj apsolutnoj veličini. Eksperimentalno određivanje poroznosti sloja pravilnih čestica ne predstavlja poteškoću. Za tu svrhu potrebno je odrediti gustoću ρ_c materijala čestica i nasipnu gustoću ρ_N materijala u sloju. Iz očite jednakosti $\rho_N = (1 - \varepsilon) \rho_c$ slijedi

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_N}{\rho_c}.$$

Pri tome se za čestice koje imaju unutarnju poroznost veličina ρ_c zamjenjuje prosječnom gustoćom ρ'_c porozne čestice, tj. odnosom mase m zrna njegovom volumenu V (zajedno s volumenom pora), $\rho'_c = \frac{m}{V}$. Ako je unutarnja poroznost ε_u čestice poznata, gustoća ρ'_c može se odrediti iz odnosa $\rho'_c = (1 - \varepsilon_u) \rho_c$. Poroznost mirujućeg sloja kuglastih čestica jednolikog promjera približno je 0,4.



Sl. 2. Jednostavni model raspodjele poroznosti u jednom fluidiziranom sloju

Kod ekspanzije fluidiziranih slojeva dolazi do povećavanja njihove poroznosti. Pri tome vrijednost poroznosti teži jedinici kao graničnoj vrijednosti koju bi trebala postići u trenutku kad sloj prestaje postojati, tj. kad brzina strujanja fluidizatora dosegne brzinu odnošenja. Međutim, poroznost fluidiziranog sloja kod određene brzine strujanja fluidizatora nije po pravilu ravnomjerna po visini sloja, jer, kao što je

ranije spomenuto (v. i sl. 1), u velikom dijelu područja brzina strujanja fluidizatora pod kojima se odvija fluidizacija sloj se može aproksimativno podijeliti na dvije zone, tzv. gustu i rijetku fazu, sa znatnom razlikom poroznosti. Ovisnost poroznosti fluidiziranog sloja, kad se on nalazi u posudi jednolikih presjeka (koloni), prikazana je dijagramom na sl. 2. Zbog svega toga u području fluidizacije (određenom granicama $v_{mf} < v_f < v_o$, gdje je v_f neka određena brzina strujanja fluidizatora) računa se s vremenski srednjim vrijednostima poroznosti ϵ_f fluidiziranog sloja, njegovom srednjom gustoćom ρ_f i srednjom visinom H_f . Ove veličine povezane su među sobom izrazom

$$\frac{H_f}{H_{mf}} = \frac{1 - \epsilon_{mf}}{1 - \epsilon_{mf}} = \frac{\rho_{mf}}{\rho_f}$$

gdje su ρ_{mf} , H_{mf} i ϵ_{mf} karakteristični parametri sloja u stanju minimalne fluidizacije.

Specifična površina i mjerodavni promjer čestica čvrste tvari. Površine svih čestica čvrste tvari u jedinici volumena sloja, zvana specifičnom površinom čvrste tvari u sloju ovisi o veličini i obliku elemenata sloja, te o njegovoj poroznosti. Očito je ta zavisnost općenito određena izrazom

$$a = a_0(1 - \epsilon),$$

gdje je a_0 površina čestice po jedinici njenog volumena, zvana specifičnom površinom čestice, koja ne ovisi o poroznosti sloja.

Za čestice pravilne forme (kugle, cilindre, Raschigove prstene i slično) a_0 se lako može izračunati, ali veoma je komplicirano pouzdano odrediti površinu čestice nepravilnog oblika u odnosu prema njenom volumenu. Po pravilu se a_0 takvih čestica određuje eksperimentalno, mjerenjem pada tlaka kroz njihov sloj, uz režim strujanja fluida za koji su dobro definirani odnosi između pada tlaka i te tražene veličine. Pri tome se dobivaju podaci za određivanje tzv. sfericiteta Φ_s , zvanog još i faktorom oblika, koji dopušta izračunavanje specifične površine čestice kao da je ona sferičnog oblika. Općenito je sfericitet definiran izrazom

$$\Phi_s = \frac{P_k}{P_c}$$

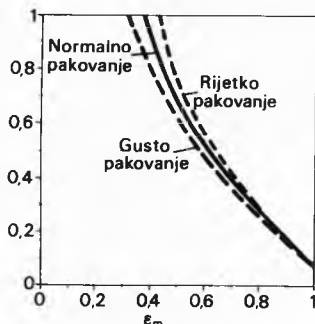
gdje je P_c stvarna površina čestice, a P_k površina kugle koja ima volumen V_k jednak volumenu V_c te čestice i promjer d_c . Na osnovi te definicije $\Phi_s = 1$ kad su čestice oblika kugle, a $0 < \Phi_s < 1$ za sve druge oblike čestica. Onda općenito vrijedi

$$a_0 = \frac{P_c}{V_c} = \frac{6}{\Phi_s d_c^2}$$

a s time već navedeni izraz za specifičnu površinu čestice u mirujućem sloju, gdje je $\epsilon = \epsilon_m$, postaje

$$a = \frac{6(1 - \epsilon_m)}{\Phi_s d_c}$$

Ovisnost poroznosti sloja sipkog materijala po veličini jednakih čestica o načinu pakovanja i sfericiteta prikazana je na sl. 3.



Sl. 3. Odnos sfericiteta i pakovanja mirujućeg sloja čestica jednolične veličine

Veličina čestice izražena njenim promjerom određuje se na više načina. Za velike čestice ($d_c > \sim 5\text{mm}$) promjer se određuje mikrometarskim mjerenjem. Kod vrlo finih čestica mikroskopske veličine ($d_c < \sim 0,04\text{mm}$) koriste se indirektno metode bazirane na brzini taloženja u viskoznom mediju, Brownovo kretanje i sl. Između tih ekstrema za određivanje veličine čestica najčešće se upotrebljavaju metode prosijavanja čestica kroz sita standardnih otvora (v. *Granulometrija*).

Kod slojeva čvrstih čestica koje su različite veličine, ali istog oblika, određuje se srednja specifična površina \bar{a}_0 , i to na osnovi

srednjeg promjera \bar{d}_c čestica zastupljenih u dotičnom kolektivu, a prema izrazu

$$\bar{a}_0 = \frac{6}{\Phi_s \bar{d}_c}$$

Pri tome se srednji promjer \bar{d}_c čestica određuje s pomoću poznatih težinskih udjela x_i u materijalu, te promjera $(d_c)_i$ zrna iz pojedinih veličinskih intervala i , prema izrazu

$$\bar{d}_c = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{d_c} \right)}$$

Kod smjesa čestica različite veličine i oblika moguće je odrediti srednju specifičnu površinu \bar{a}_0 i srednji promjer d_c jednostavnom zamjenom \bar{d}_c sa $\Phi_s \bar{d}_c$, odnosno d_c sa $\Phi_s d_c$ u prednjim jednadžbama.

Pad tlaka fluidizatora. Promjene pada tlaka fluidizatora, do kojih dolazi pri strujanju kroz sloj mirnih čestica čvrste tvari, mogu se opisati s pomoću različitih izraza kao pojave strujanja kroz poroznu sredinu. To vrijedi i pri povećanju brzine, kada se proces odvija u smjeru fluidizacije, i pri smanjenju brzine, kada se fluidizirani sloj umiruje. Jedan od temeljnih izraza jest tzv. Ergunova jednadžba

$$\frac{\Delta p}{H_m} = 150 \frac{(1 - \epsilon_m)^2}{\epsilon_m^3} \cdot \frac{\eta \cdot v}{(\Phi_s d_c)^2} + 1,75 \frac{1 - \epsilon_m}{\epsilon_m^3} \cdot \frac{\rho_f v^2}{\Phi_s d_c} \quad (1)$$

gdje je H_m visina mirujućeg sloja, ρ_f gustoća fluida, a ostali simboli imaju već određeno značenje. Ona, naime, obuhvata utjecaje svih hidrauličkih otpora u sistemu, tj. otpora uzrokovanih i silama viskoziteta (predstavljenima prvim članom izraza na desnoj strani) i vrtloženjem (predstavljenima drugim članom izraza na desnoj strani), koji podjednako dolaze do izražaja u prijelaznom području između područja laminarnog i turbulentnog strujanja.

Pri laminarnom strujanju u području vrijednosti Reynoldsove značajke $Re = \frac{d_c v}{\nu} < 20$ (gdje je ν kinematički viskozitet), tj.

pri malim brzinama strujanja fluidizatora, prevladavaju utjecaji sila viskoziteta, pa se drugi član desne strane Ergunove jednadžbe može zanemariti te ona prelazi u tzv. Cramer-Kozenyjevu jednadžbu

$$\frac{\Delta p}{H_m} = 150 \frac{(1 - \epsilon_m)^2}{\epsilon_m^3} \cdot \frac{\eta v}{(\Phi_s d_c)^2} \quad (2)$$

za laminarno strujanje fluida kroz poroznu sredinu.

Obrnuto, pri turbulentnom strujanju u području visokih vrijednosti Reynoldsove značajke ($Re > 1000$) prevladavaju utjecaji vrtloženja, pa se može zanemariti prvi član izraza na desnoj strani Ergunove jednadžbe. Ona tada prelazi u tzv. Burk-Plamerovu jednadžbu

$$\frac{\Delta p}{H_m} = 1,75 \frac{1 - \epsilon_m}{\epsilon_m^3} \cdot \frac{\rho_f v^2}{\Phi_s d_c} \quad (3)$$

S druge strane, omjeri pada tlaka struje fluida i visine sloja u stanju minimalne fluidizacije mogu se izraziti s pomoću parametara tog stanja. Pri tome se polazi od toga da je pad tlaka fluidizatora u fluidiziranom sloju praktički jednak umnošku visine sloja i efektivne specifične težine $(\rho_c - \rho_f)g$ u njemu sadržane čvrste tvari po jedinici površine razdjelne rešetke, gdje je ρ_c gustoća te tvari. Uzme li se još da je A površina presjeka aparata koji služi za fluidizaciju, a G težina sloja kad se on počinje fluidizirati, dobije se onda

$$\Delta p_f A = G = A H_{mf} (1 - \epsilon_m) (\rho_c - \rho_f) g, \quad (4)$$

odnosno

$$\frac{\Delta p_f}{H_{mf}} = (1 - \epsilon_m) (\rho_c - \rho_f) g. \quad (5)$$

Minimalna brzina fluidizacije sistema koji sadrži neku određenu čvrstu tvar, na prvom mjestu zavisi od veličine čestice te tvari. Zbog toga sistemi kojima su neke od tih čestica, ili sve te čestice vrlo fine, počinju se fluidizirati, odnosno potpuno se fluidiziraju već i pri laminarnom strujanju, a sistemi kojima su sve te čestice grube, tek pri turbulentnom strujanju fluidizatora. Zbog toga se i izračunavanje minimalne brzine fluidizacije izvodi

s pomoću različitih jednadžbi već prema uvjetima strujanja fluidizatora. Do ovih jednadžbi može se doći npr. promatrajući stanje minimalne fluidizacije kao granično stanje mirujućeg sloja, pa uzeti da i za to stanje vrijede jednadžbe (1), (2) i (3). U tom slučaju se umjesto H_m , ϵ_m i v u tim jednadžbama smije pisati H_{mf} , ϵ_{mf} i $v_{mf} = v_{k1}$, pa se npr. za minimalnu brzinu fluidizacije, kad se sistem fluidizira u uvjetima laminarnog strujanja fluidizatora, iz jednadžbe (2) i (5) dobiva jednadžba

$$v_{mf} = v_{k1} = \frac{(\Phi_s d_c)^2}{150} \cdot \frac{\rho_c - \rho_r}{\eta} \cdot g \cdot \frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}}$$

a za minimalnu brzinu fluidizacije kad se sistem fluidizira u uvjetima turbulentnog strujanja fluidizatora iz jednadžbi (2) i (4),

$$v_{mf}^2 = v_{k1}^2 \frac{\Phi_s d_c}{1,75} \cdot \frac{\rho_c - \rho_r}{\rho_r} \cdot g \epsilon_{mf}^3$$

Međutim, izračunavanje minimalne brzine fluidizacije s pomoću ovih jednadžbi nije sasvim egzaktno, jer vrijednost ϵ_{mf} poroznosti u stanju minimalne fluidizacije nije zavisna samo od faktora oblika kao što je to ϵ_m , već još i od privlačnih sila i sila trenja među česticama. Bolji rezultati određivanja minimalne brzine fluidizacije dobiju se eksperimentalnim putem (mjerenjem pada tlaka u sistemu — v. dalje).

Brzina odnošenja. Temeljni izraz za određivanje brzine odnošenja koji se, kako je već rečeno, može izvesti iz zakona o slobodnom padu jest

$$v_o = v_{k2} = \left[\frac{4g d_c (\rho_c - \rho_r)}{3 \rho_r C_d} \right]^{1/2}$$

gdje je C_d koeficijent trenja koji se određuje eksperimentima.

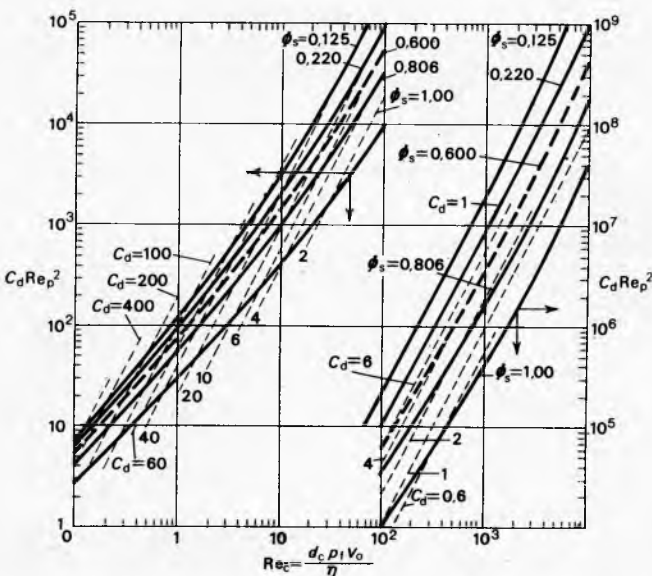
S pomoću tzv. modificirane Reynoldsove značajke

$$Re_c = \frac{d_c \rho_r v_o}{\eta}$$

može se ova jednadžba transformirati u izraz

$$C_d Re_c^2 = \frac{4g d_c^3 \rho_r (\rho_c - \rho_r)}{3 \eta^2}$$

gdje je $C_d Re_c^2$ o brzini neovisna i također bezdimenzijska grupa, pa izraditi dijagram u kojem se mogu prikazati funkcije $C_d Re_c^2 = f(Re)$, s jedne strane, familijom krivulja za pojedine konstantne vrijednosti sfericiteta, a s druge strane familijom krivulja za pojedine konstantne vrijednosti koeficijenta trenja. Takav dijagram prikazan je na sl. 4. On omogućava određivanje brzine odnošenja čestica s bilo kakvim oblikom.

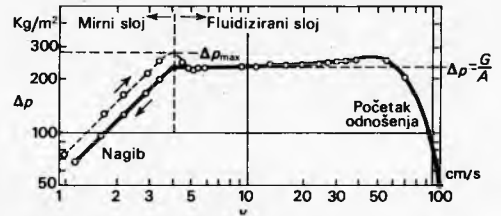


Sl. 4. Dijagram za određivanje brzine odnošenja čestica iz fluidiziranog sloja

Dijagrami $\Delta p, v$ i kvaliteta fluidizacije. Dijagram $\Delta p, v$ može korisno služiti za razmatranje niza pojava pri fluidizaciji,

naročito tamo gdje nisu moguća vizuelna zapažanja. Jedan takav dijagram (za sloj pijeska jednolične veličine čestica koji se fluidizira zrakom) prikazan je na sl. 5.

Vidi se da krivulja p, v ima dvije grane u području promjena pada tlaka fluidizatora proporcionalnih brzini strujanja. Jedna od tih grana (prikazana isprekidanom linijom) predstavlja promjene do kojih dolazi pri odvijanju procesa u smjeru rasta brzine strujanja fluidizatora, a druga (prikazana punom linijom) one koje se odvijaju u suprotnom smjeru, pri smanjivanju brzine strujanja fluidizatora, počevši od neke brzine iznad v_{k1} . To je



Sl. 5. Dijagram $\Delta p, v$ fluidizacije sloja pijeska zrakom u sistemu pri slaboj fluidizaciji uslijed pojave mjehura

u skladu s već rečenim i nepodudaranju poroznosti ϵ_m mirujućeg sloja i poroznosti ϵ_{mf} sloja u stanju minimalne fluidizacije, nasuprot očekivanju na temelju jednostavne predodžbe stanja minimalne fluidizacije kao graničnog stanja područja postojanja mirujućeg sloja. Istim utjecajima treba pripisati i okolnost što je pad tlaka u sistemu unutar područja brzina strujanja ispod v_{mf} veći kad se proces odvija u smjeru rasta brzine strujanja i okolnost što prije nego sistem dospije u fluidizirano stanje, pad tlaka naraste iznad vrijednosti $\Delta p = G/A$, tako da odgovarajuća grana krivulje u dijagramu ima izraziti maksimum Δp_{max} . Zbog toga se v_{mf} određuje pri smanjivanju brzine strujanja fluidizatora. Tada je stanje kojemu ta brzina odgovara mnogo bolje definirano (razmjerno oštrim lomom krivulje).

Manje je sigurno određivanje minimalne brzine fluidizacije slojeva sa česticama čvrste tvari raznoličnijeg granulometrijskog sastava. Što je raspodjela veličina tih čestica šira, prelazi krivulja u njihovim dijagramima $\Delta p, v$ iz vodoravnog u položeni dio sve su blaži. Tada se za v_{mf} uzima brzina strujanja u stanju određenom sjecištem produžetaka ravnih dijelova krivulja.

S druge strane, kako su za održavanje fluidiziranih slojeva bez odnošenja materijala iz njih mjerodavne kritične brzine strujanja fluidizatora, omjer v_{k2}/v_{k1} , odnosno v_o/v_{mf} , važan je indikator različitih karakteristika fluidizacije u određenom slučaju. Posebno su važni dijagrami u kojima se promjene pada tlaka u sloju koji se fluidizira prikazuju kao

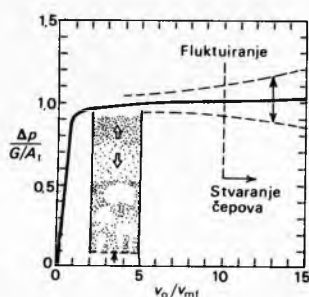
$$\frac{\Delta p}{G/A} = f(v_o/v_{mf}^*)$$

Tako se omjer kritičnih brzina strujanja fluidizatora obično nalazi u granicama od 10:1, a to je manji što su čestice čvrste tvari sistema veće. Zbog toga je taj omjer indikator fleksibilnosti operacija koje se izvode u fluidiziranim sistemima (s obzirom na brzinu strujanja fluidizatora). Osim toga on je ujedno indikator maksimalne visine fluidiziranih slojeva. Pri njegovoj upotrebi važno je voditi računa o tome da, u slučajevima agregativne fluidizacije, kad se mjehuri ili čepovi pojavljuju u znatnoj mjeri, radne brzine fluidizatora često premašuju (na već opisani način određenu) brzinu odnošenja, jer je moguće da veći dio fluidizatora napušta sistem bez u njemu suspendirane čvrste tvari.

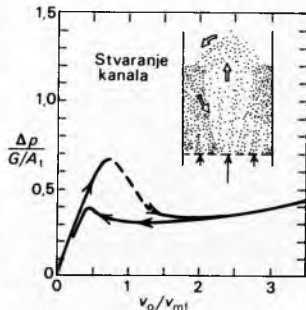
Neki primjeri ponašanja slabo fluidiziranih sistema ilustrirani dijagramima $\frac{\Delta p}{G/A}, v_o/v_{mf}$ prikazani su na sl. 6 i 7. Pri slaboj fluidizaciji uslijed pojave mjehura u sistemu (sl. 6), pad tlaka u fluidiziranom sloju ne samo što se ne zadržava na vrijednosti $\Delta p = G/A$ u području povećavanja brzine strujanja fluidizatora od v_{mf} do v_o nego još i fluktuiru oko te vrijednosti.

Anomalno spori rast pada tlaka pri fluidizaciji na sl. 7 i postizanje Δp_{max} daleko ispod vrijednosti $\Delta p = G/A$ i zatim, s daljnim povećavanjem brzine strujanja fluidizatora, smanjenje pada tlaka

na još nižu vrijednost, znak je da struja fluidizatora ne zadržava veći dio čvrste tvari sistema i da se radi samo o djelimičnoj fluidizaciji.



Sl. 6. Dijagram pada tlaka u sistemu pri slaboj fluidizaciji uslijed pojave mjehura i čepova



Sl. 7. Dijagram pada tlaka u sistemu pri slaboj fluidizaciji uslijed pojave kanala

Kvaliteta fluidizacije pod visokim tlakovima. Općenito je prihvaćeno stajalište da je razlika između partikularne fluidizacije, tipično za sisteme čvrstih tvari i kapljevine i agregativne fluidizacije, karakteristične za sisteme čvrstih tvari i plinova, posljedica bitne razlike gustoća fluidizatora u ta dva slučaja. Međutim, kad se radi o fluidizaciji sistema pod visokim tlakovima, te razlike nisu jasne, niti je tada tako jednostavno predvidjeti kvalitetu fluidizacije. I. B. Romero i L. N. Johanson našli su da je to izvedivo s pomoću produkta četiriju bezdimenzijskih grupa i to: $(\rho_s - \rho_f)/\rho_f$, H_{mf}/D , te Reynoldsovog i Froudeovog broja u stanju minimalne fluidizacije (Re_{mf} , odnosno $Fr_{mf} = v_{mf}^2/dg$), vrijednosti kojih rastu sa smanjivanjem stabilnosti fluidiziranog sloja, odnosno s jačanjem tendencije razvoju agregativne fluidizacije. Partikularna fluidizacija trebalo bi da se razvije ako je vrijednost produkta ovih grupa manja od 100; inače, ako je veća od 100, trebalo bi da se razvije agregativna fluidizacija.

Primjena fluidizacije

U fluidiziranim sistemima moguće je izvesti mnoštvo procesa. Vrlo često se pri tome u usporedbi s odgovarajućim procesima u sistemima koji se ne nalaze u tom stanju ostvaruju vrlo značajne tehnološko-ekonomske prednosti. Zbog toga je područje primjene fluidizacije u tehnici vrlo široko. Ono se i dijeli prema procesima koji se izvode s pomoću fluidizacije. Svi se ti procesi mogu svrstati u dvije temeljne skupine. Jednu od tih čini primjena fluidizacije u izvođenju fizikalnih operacija, a druga primjena fluidizacije u izvođenju kemijskih reakcija.

Primjena fluidizacije u izvođenju fizikalnih operacija. Fizikalne operacije u izvođenju kojih se može primijeniti fluidizacija mogu se podijeliti na mehaničke operacije, operacije s prijenosom topline i operacije s prijenosom topline i tvari.

Najvažnije mehaničke operacije koje se izvode s pomoću fluidizacije jesu neke operacije miješanja, klasiranja i sortiranja, te neke transportne operacije. Miješanje fluidizacijom često se primjenjuje u priređivanju ili za održavanje suspenzija čvrstih tvari u kapljevina ili plinovima (v. *Miješanje i gnjetenje*). Klasiranje i sortiranje s pomoću fluidizacije obuhvata važne operacije pneumatskog i hidrauličkog klasiranja, odnosno sortiranja (v. *Klasiranje i Sortiranje*). Od transportnih operacija s pomoću fluidizacije posebno su važne operacije pneumatskog transporta, ali često dolaze u obzir i operacije hidrauličkog transporta (v. *Prijenosna tehnika*).

Zbog razmjerno velikog toplinskog kapaciteta, velike specifične površine i vrtložnog gibanja njihove čvrste tvari, fluidizirani slojevi se u tehnici prijenosa topline mogu upotrijebiti kao sredstva kako za zagrijavanje tako i za hlađenje sa specijalnim vrlo važnim svojstvima. Tako oni omogućavaju postizanje visokih koeficijenata prijelaza topline, bilo da se taj prijelaz ostvaruje posredstvom stijenki, bilo da se ostvaruje izravnim dodirnom s medijem koji treba zagrijati, odnosno ohladiti. (Općenito, ti koeficijenti zavise od brzine strujanja fluidizatora na sličan način kako od toga zavisi i pad tlaka fluidizatora u fluidiziranom sloju: iznad minimalne brzine fluidizacije brzo rastu s povećavanjem

brzine strujanja fluidizatora sve dok ne dosegnu stanovitu vrijednost, koja zatim ostaje manje ili više konstantna, ili pak prije toga dosegne neki maksimum, nakon čega opadaju. Koliki se maksimum vrijednosti tih koeficijenata može postići zavisi od vodljivosti topline fluidizatora i veličini čestica fluidizirane čvrste tvari.) Tako se npr. na vrućim česticama čvrste tvari fluidiziranih sistema u djeliću sekunde mogu ispariti ubrizgane hladne kapljevine i pri tome pare pomiješati, ili u hladni fluidizirani sistem ubrizgani vrući plinovi vrlo brzo ohladiti na niske temperature.

Operacije s prijenosom topline i tvari koje se mogu izvoditi s pomoću fluidizacije vrlo su brojne. Među tim operacijama nalaze se mnoge operacije kemijske tehnike, npr. sušenje, isparivanje, sublimacija, kristalizacija, apsorpcija, ekstrakcija (v. *Adsorpcija*, TE 1, str 1, *Ekstrakcija*, TE 3, str. 537, *Isparivanje*, *Kristalizacija*, *Sublimacija*) i neke njima suprotne, npr. vlaženje, desublimacija, otapanje, desorpcija. Dalji važni slučajevi primjene fluidizacije u operacijama iz ove skupine jesu neke operacije ličenja i oblaganja, koje se izvode sa fluidiziranim sredstvima za ličenje ili oblaganje. Vrlo suvremeni postupci takvog ličenja, odnosno oblaganja jesu tzv. postupci elektrostatičkog ličenja i oblaganja. I niz drugih elektrostatičkih operacija izvodi se s pomoću fluidizacije (v. *Elektrostatičke operacije*, str. 43).

Primjena fluidizacije u izvođenju kemijskih reakcija.

Kemijske reakcije u izvođenju kojih se može primijeniti fluidizacija mogu se podijeliti na tzv. homogene reakcije (reakcije u homogenim sistemima) pri kojima čvrsti materijal služi kao nosilac ili kao sredstvo za odvođenje topline, reakcije tzv. heterogene katalize (reakcije pojedinih sastojaka fluidizatora koje se odvijaju pod utjecajem čvrste tvari fluidiziranog sistema kao katalizatora) i reakcije u kojima je sudionik sama čvrsta tvar fluidiziranog sistema.

Primjena fluidizacije u homogenim reakcijama u kojima je čvrsta tvar nosilac topline ili sredstvo za odvođenje topline zapravo je slična već opisanim slučajevima fizikalnih operacija s prijenosom topline, samo što se pri tome radi o odvođenju, odnosno o privođenju topline reakcije (prvo kad se radi o egzotermnim, drugo kad se radi o endotermnim reakcijama). Već opisana svojstva fluidiziranih sistema omogućuju da se takve reakcije izvode praktički izotermno. Sve razlike temperatura koje mjestimice mogu nastati, mogu se smjesta izjednačiti. Najčešće homogene reakcije koje se izvode na ovakav način jesu različite pirolize. U te procese treba ubrojiti i neka spaljivanja (npr. muljevutih ili kapljevutih otpadaka industrije na ugrijanom, fluidiziranom pijesku).

Od reakcija heterogene katalize koje se izvode s pomoću fluidizacije najpoznatije su one koje se izvode u različitim procesima krekovanja (v. *Nafta*, kemijska prerada) i one koje se izvode u tzv. Fischer-Tropschovim sintezama (v. *Goriva i sredstva za pogon motora*). U novije vrijeme na ovaj se način izvode i različite druge reakcije heterogene katalize.

Najpoznatije reakcije u kojima je fluidizirana čvrsta tvar sudionik jesu tzv. heterogene reakcije (reakcije u heterogenim sistemima od čvrstih tvari i fluida); izvode se u različitim procesima rasplinjavanja i švelovanja ugljena (v. *Ugljen*, kemijska prerada), nekim procesima prženja (posebno materijala koji sadrže sulfide, kao što je npr. pirit radi dobivanja sumpor-dioksida, v. *Sumpor i njegovi spojevi*) i pečenja (npr. vapnenca, v. *Kreč*). Ovom tehnikom izvode se u novije vrijeme i neke nuklearne reakcije.

Prednosti i nedostaci primjene fluidizacije. Prednosti postizive izvođenjem procesa u fluidiziranim namjesto u mirujućim slojevima, ako je riječ o alternativni između tih dviju mogućnosti, jesu brojne. Prva od tih prednosti jest što se fluidizacijom osigurava približno jednoličan raspored tvari i temperature sistema. Osim toga, kako je to već pobliže opisano, time se povećava brzina prijenosa topline i tvari između čvrstih čestica i fluida. Dalja važna prednost jest što se fluidizacijom ostvaruje mogućnost rada s česticama čvrste tvari malih dimenzija i velike specifične površine. Time se stvaraju uvjeti za smanjenje toplinskih i difuzijskih otpora, pa zbog toga i mogućnost povećanja produktivnosti aparature. (Za razliku od slučaja u mirujućem sloju, gdje je aktivna površina kontakta čvrste tvari mnogo manja od stvarne ukupne površine čestica, veličina aktivne površine kontakta čvrste tvari

fluidiziranog sistema bliska je veličini stvarne ukupne površine čestica.) Važna prednost izvođenja procesa u fluidiziranim sistemima jest i to što se time, uslijed pokretljivosti fluidiziranih slojeva, može izraditi aparature s kontinualnim protokom čvrste tvari i razmjerno lako održavati temperatura procesa. Konačno, izuzevši samo neke pojedine elemente, konstrukcija aparature za fluidizaciju razmjerno je jednostavna, što omogućava da se lako provedu mehanizacija i automatizacija procesa i da eksploatacija postrojenja bude razmjerno jednostavna.

Međutim, kao i u drugim oblastima tehnike, i za primjenu fluidizacije u izvođenju procesa o kojima je bilo govora postoje ograničenja i ona, u usporedbi s procesima u sistemima s mirujućim slojevima ima i stanovite nedostatke. Prvo, zbog intenzivnog miješanja faza u fluidiziranim sistemima nije moguće ostvariti protustrujne tokove čvrste tvari i fluidizatora samo jednim fluidiziranim slojem. (To je moguće samo s pomoću više fluidiziranih slojeva.) Osim toga, brzo miješanje čestica tvari u fluidiziranim sistemima ima za posljedicu nejednolično vrijeme njihovog zadržavanja u aparaturi. Dalji nedostaci izvođenja procesa u fluidiziranim sistemima jesu što uslijed istiranja, raspadanja, sljepiljivanja i drugih utjecaja jednih čestica čvrste tvari na druge, u fluidiziranim sistemima dolazi do nepoželjnih promjena svojstava tih čestica, i što je posebno u polidisperznim sistemima sa širokim područjem raspodjele veličine čestica to povezano s odnošenjem znatnih količina fine prašine iz sistema. Nadalje, za odvajanje čvrste tvari fluidiziranih sistema od fluidizatora po izvođenju procesa potrebni su posebni uređaji, i konačno, gibanje čvrste tvari u tim sistemima ima za posljedicu snažnu abraziju materijala cjevovoda i aparata postrojenja u kojem se izvode ove operacije.

Ipak, i pored ovih nedostataka, nalaze se stalno nova rješenja u primjeni fluidizacije. Ona se postižu ne samo sagledavanjem i uklanjanjem utjecaja tih nedostataka nego i kombiniranjem fluidizacije, kao osnovne metode, s drugim suvremenim metodama procesne tehnike. Tako su, npr. poznate moderne metode sušenja vrlo vlažnih mikrokristalnih i pastastih materijala u fluidiziranom stanju uz pomoć dodatnih tokova toplog fluidizatora, raznovrsnih mješala, pomoćne inertne faze.

Aparatura za fluidizaciju

Zbog toga što se ta aparatura razlikuje od slučaja do slučaja, već prema procesu za svrhu kojega se izvodi fluidizacija, podrobniji opisi pojedinih uređaja nalaze se u člancima u kojima se govori o tim procesima, a u ovom članku opisivanje se ograničava na najopćenitije.

Oblici aparata za fluidizaciju. Osim aparata za fluidizaciju s površinom presjeka jednakom na svim mjestima, pa i na razdjelnoj rešetki, o kojima je bilo već govora, postoje aparati za fluidizaciju u kojima ti presjeci nisu jednaki, pa u njima pad tlaka fluidizatora kroz fluidizirani sloj nije upravno proporcionalan efektivnoj težini čvrste tvari, a obrnuto proporcionalan jednoj određenoj površini, kako je to uzeto u jednadžbi (4). Odnos između pada tlaka fluidizatora kroz fluidizirani sloj, njegove efektivne težine i površina presjeka u tim aparatima mnogo je složeniji. Općenito se može prikazati s pomoću neke funkcije $f(A_d, A_g)$ donje i gornje površine fluidiziranog sloja $A_d = A_r$, odnosno A_g , gdje je A_r površina razdjelne rešetke, a A_g zavisi od visine sloja, tako da se za efektivnu težinu sloja u ovim slučajevima općenito može pisati

$$G = (1 - \epsilon)(\rho_c - \rho_f) g H f(A_d, A_g)$$

odakle, prema jednadžbi (5) za pad tlaka u fluidiziranom sloju slijedi

$$\Delta p_f = \frac{G}{f(A_d, A_g)}$$

Dakako, zbog spomenute zavisnosti A_g od H , u primjeni ovog općenitog izraza na pojedine određene slučajeve pri stanjima koja se uspostavljaju ekspanzijom sloja pod utjecajem povećavanja brzine strujanja fluidizatora iznad v_{k1} , treba uzeti u obzir još i zavisnost funkcije $f(A_d, A_g)$ od H .

Iz ovog općenitog izraza mogu se izvesti izrazi za Δp_f za pojedine karakteristične oblike koji dolaze u obzir za gradnju apa-

rata za fluidizaciju, kao što su npr. stožasti, piramidasti, kuglasti. Tako se za aparate stožastog oblika dobiva izraz

$$\Delta p_f = \frac{3G}{A_d + \sqrt{A_d A_g + A_g}}$$

a ovaj se, s pomoću promjera D_d donje površine A_d , vršnog kuta α stošca koji predstavlja temeljni oblik aparata i visine H fluidiziranog sloja, može transformirati u

$$\Delta p_f = \frac{G}{\frac{\pi}{4} \left(D_d^2 2 H D_d \tan \frac{\alpha}{2} + \frac{4}{3} H^2 \tan^2 \frac{\alpha}{2} \right)}$$

Analognim postupkom dobiva se i izraz za Δp_f aparata za fluidizaciju piramidastog oblika

$$\Delta p_f = \frac{G}{b_d^2 + 2 H b_d \tan \frac{\beta}{2} + \frac{4}{3} H^2 \tan^2 \frac{\beta}{2}}$$

gdje je b_d stranica donje baze, β vršni kut piramide koja predstavlja temeljni oblik aparata.

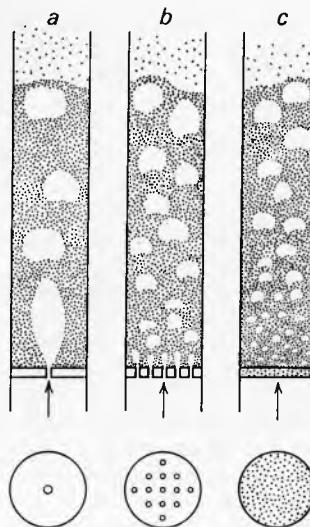
Za aparate kojima površine stijenki predstavljaju površine kugle dobiva se

$$\Delta p_f = \frac{6G}{\pi(3r_d^2 + 3r_g^2 + H^2)}$$

gdje su r_d i r_g polumjeri donje, odnosno gornje površine sloja.

Razdjelne rešetke vrlo su važan činilac kvaliteta fluidizacije. Razdjelne rešetke s većim otvorima uzrokuju manje gubitke tlaka fluidizatora, tj. manje opterećuju strojeve za njegovu dobavu

(pumpe, ventilatore), ali, posebno u sistemima čvrsto-plinovito, uzrokuju agregativnu fluidizaciju. Najbolji kvalitet fluidizacije postiže se u aparatima sa sinterovanim pločama kao razdjelnim rešetkama. One doduše uzrokuju velike padove tlaka fluidizatora, ali dobro raspodjeljuju strujanje, zbog čega se u fluidiziranom sloju uspostavljaju samo razmjerno male razlike gustoće, te su u takvim slojevima uvjeti za agregativnu fluidizaciju nepovoljniji. Neki primjeri utjecaja razdjelne rešetke na kvalitet fluidizacije prikazani su na sl. 8. Vidi se kako je kvalitet fluidizacije u aparatu s razdjelnom rešetkom s jednim otvorom (sl. 8 a) slab i kako dolazi do fluktuacije gustoće sloja, uz pojavu u kanala i čepova, i kako su te štetne pojave u aparatu sa sinterovanom pločom kao razdjelnom rešetkom (sl. 8 b) mnogo slabije izražene, a kvalitet se fluidizacije u aparatu s razdjelnom rešetkom s više otvora (sl. 8 c) u sredini nalazi između kvaliteta ovih dvaju krajnjih slučajeva.



Sl. 8. Utjecaj tipa razdjelne rešetke na kvalitet fluidizacije. a Fluidizacija u aparatu s jednim otvorom u razdjelnoj rešetki, b s više otvora, c u aparatu sa sinterovanom pločom kao razdjelnom rešetkom

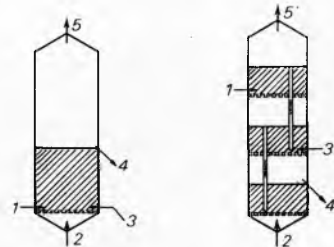
litet se fluidizacije u aparatu s razdjelnom rešetkom s više otvora (sl. 8 c) u sredini nalazi između kvaliteta ovih dvaju krajnjih slučajeva.

Najvažniji tipovi aparata za fluidizaciju. Aparati za fluidizaciju mogu biti ili otvorenog ili zatvorenog tipa.

Prvi aparati od ovih dviju vrsta za fluidizaciju upotrebljavaju se tamo gdje se s pomoću fluidizacije izvodi neki proces pri kojemu se sistemu mora stalno privoditi svježi materijal i od njega odvoditi korisni ili otpadni proizvod. (U tu skupinu aparata za fluidizaciju mogu se ubrojiti i aparati nekih postrojenja za transport zrnatog ili praškastog čvrstog materijala, kao što su npr. postrojenja za pneumatski transport, v. *Prijenosna tehnika*.) Tipični predstavnici aparata iz ove skupine jesu aparati za izvođenje nekatalitičkih reakcija plinova sa čvrstim tvarima s pomoću fluidizacije. Za tu svrhu oni imaju neke uređaje za hranjenje svježim materijalom (obično pužni transporter) i neke uređaje za odvođenje ko-

rinsnog ili otpadnog proizvoda (obično također pužni transporter ili, pak, obični ispusni priključak). Izmjena topline između tih aparata i okoline, nužna za odvijanje procesa u njima, općenito se izvodi direktno, npr. toplina im se može privoditi izgaranjem ulja za loženje, a od njih odvoditi isparavanjem vode u fluidiziranim sloju.

Na sl. 9 shematski su prikazane dvije vrste aparata iz ove skupine. To su tzv. aparati s jednim fluidiziranim slojem (sl. 9 a) i aparati s više fluidiziranih slojeva (sl. 9 b). Prvi zadovoljavaju za izvođenje većine nekatalitičkih procesa. Drugi mogu biti potrebni u slučajevima gdje treba ostvariti neku od prednosti protustrujnog toka postignutog konstrukcijom tih aparata. Tada je za proces potrebno više fluidiziranih slojeva i za tu svrhu aparat je podijeljen u potreban broj zona.

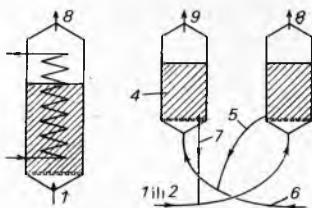


Sl. 9. Aparati za fluidizaciju otvorenog tipa: a s jednim fluidiziranim slojem, b s više fluidiziranih slojeva a: 1 dovod svježeg materijala, 2 dovod fluidizatora, 3 direktno grijanje, odn. hlađenje, 4 proizvod, 5 otpadni plin

Jedan od takvih slučajeva jeste, kad je zbog odvijanja reakcije na vrlo visokim temperaturama, potrebno ekonomično iskoristiti toplinu. Tada je u aparatu osim zone s fluidiziranim slojem koji se grije potrebna još zona s fluidiziranim slojem za predgrijavanje čvrste tvari koja ulazi u proces vrućim plinovima i zona s fluidiziranim slojem za predgrijavanje plinova koji ulaze u proces vrućom čvrstom tvari iz grijane zone. Na taj način rekuperira se dio topline plinova i čvrste tvari koji bi inače za proces beskorisno otpao.

Druga dva slučaja, kad su potrebni aparati za fluidizaciju s više fluidiziranih slojeva, jesu kad se traži vrlo čist čvrsti ili plinoviti proizvod, ili kad je, da bi se ograničilo ili spriječilo odvijanje sporednih reakcija, potrebno ostvariti jednolično vrijeme zadržavanja čvrste tvari u reakcijskom prostoru. Rezultat se u tim slučajevima postiže podjelom aparata na više reakcijskih zona.

Aparati za fluidizaciju zatvorenog tipa nazivaju se tako zbog toga što su prilagođeni izvođenju procesa u kojima treba zadržati čvrstu tvar u sistemu. To su tipični aparati za izvođenje, s pomoću fluidizacije, reakcija heterogene katalize, gdje je katalizator čvrsta tvar sistema. Proces, u njima općenito se odvijaju samo u jednom fluidiziranom sloju. Budući da direktno zagrijavanje i hlađenje fluidiziranih slojeva ometaju većinu katalitičkih reakcija koje se izvode u fluidiziranim sistemima, ovi se aparati griju ili hlade indirektno izmjenom topline posredstvom neke zagrijevne, odnosno rashladne površine. Među tim aparatima razlikuju se aparati bez cirkulacije i aparati sa cirkulacijom čvrste tvari, shematski prikazani na sl. 10.



Sl. 10. Aparati za fluidizaciju zatvorenog tipa: a bez cirkulacije, b sa cirkulacijom čvrste tvari; 1 i 2 svježip lin, odn. ulje; 3 i 4 fluidizirani sloj aktivnog katalizatora, odn. katalizatora u regeneraciji, 5 istrošeni katalizator, 6 zrak, 7 regenerirani katalizator, 8 reakcijski plin, 9 otpadni plin s prašinom

Prvi se upotrebljavaju tamo gdje je trajnost katalizatora velika, a drugi tamo gdje je ona mala, pa ga treba stalno odvoditi iz reakcijske zone, regenerirati i ponovo vraćati u reakcijsku zonu. U ovom drugom slučaju zapravo se radi o dva procesa, od kojih se i jedan i drugi izvode s pomoću fluidizacije u dva posebna aparata među sobom spregnuta uređajima za cirkulaciju

LIT.: D. F. Othmer, Fluidization, New York 1956. — M. Leva, Fluidization, New York 1959. — J. F. Davidson, D. Harrison, Fluidized particles, New York 1963. — H. Reuter, Chemiker Ztg. 89/1965/8, 276/282, cit. prema L. Reh, Fließbett-Technik, Fortsch. Verfahrenstech. 7/1964/65/1, 770. — M. Э. Аеро, О. М. Тодес, Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем, Ленинград 1968. — D. Kunii, O. Levenspiel, Fluidization engineering, New York 1969. — И. М. Разумов, Псевдоожождение и пневмотранспорт сыпучих материалов, Москва 1972. — R. H. Perry, C. H. Chilton, Chemical engineers handbook, New York 1973.

D. Skansi

FLUOR (fluorum, F, at. br. 9, at. tež. 18,9984), kemijski element, prvi u redu halogenih elemenata, sedme skupine periodskog sistema. Elektronska konfiguracija njegovog atoma je $1s^2 2s^2 2p^5$. Poznat je samo jedan postojani izotop fluora, ^{19}F .

Povijest kemije fluora i njegovih spojeva počinje 1771 kad je C. W. Scheele dobio fluorovodičnu kiselinu. Sam fluor izolirao je H. Moissan 1886 elektrolizom otopine kalijum-hidrogenfluorida u fluorovodiku u platinskom aparatu s elektrodama od platin-iridijuma. Dosta dugo nakon toga istraživanjem kemije fluora i njegovih spojeva bavili su se gotovo isključivo Belgijanc F. Swarts i Nijemac O. Ruff sa saradnicima. Industrija se počela jače zanimati za to područje tek nakon prvog svjetskog rata, tridesetih godina, najprije zbog primjene organskih spojeva fluora za tehničke svrhe (najvećim dijelom u industriji rashladnih sredstava i aerosola), a zatim zbog značaja spojeva fluora općenito u nuklearnoj tehnici. Istraživanja na području fluora i njegovih spojeva sporo su se razvijala zbog poteškoća koje izaziva njegova izvanredno velika reaktivnost i njegovo neugodno fiziološko djelovanje.

Ime fluor potječe od latinske riječi *fluere*, teći, a nadjenuto mu je zbog primjene njegovog glavnog minerala, fluorita, u metalurgiji kao taljiva (sredstva za snižavanje točke taljenja).

Prema najnovijim procjenama, prosječni sadržaj fluora u Zemljinoj kori kreće se oko 0,065%, pa je on trinaesti u nizu elemenata svrstanih po zastupljenosti u Zemljinoj kori; zbog velike reaktivnosti fluora, njegovi su spojevi u Zemljinoj kori dosta rasprostranjeni. Slobodni fluor ne nalazi se u prirodi, osim u tragovima zapaženim u određenim fluoritima izloženim radioaktivnom djelovanju. Glavni je mineral fluora fluorit (kalcijum-fluorid), CaF_2 ; drugi važan mineral je kriolit, $3\text{NaF}\cdot\text{AlF}_3$. Osim toga fluor se nalazi u apatitu, $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\cdot\text{CaF}_2$, topazu $\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3\cdot 2\text{Al}(\text{OH},\text{F})_3$, hiolitu $3\text{AlF}_3\cdot 5\text{NaF}$ i nekim drugim mineralima koji ga sadržavaju u većim ili manjim količinama. Zbog sve intenzivnijeg korišćenja nalazišta fluorita, u budućnosti će porasti ekonomski značaj sadržaja fluora u otpadnim produktima industrijske proizvodnje fosfornih spojeva iz prirodnih fosfata. (Ovi sadrže ~ 3% F.) Tragovi fluora nalaze se i u svim prirodnim vodama.

ELEMENTARNI FLUOR

Svojstva elementarnog fluora. Elementarni fluor u običnim je uvjetima plin (d 1,31 u odnosu prema zraku; t. k. -188°C ; t. t. $-219,8^\circ\text{C}$), blijedozelenkastožute boje, prodornog i oštrog vonja zamjetljivog već pri koncentracijama od 0,02 dijela na milijun. (Vonj jako razrijeđenog fluora podsjeća na ozon i hipoklorit.) Krična mu je temperatura -129°C , a kritični tlak 55 atm; latentna toplina isparavanja mu je 1,56 kcal/mol (pod 760 mmHg), a latentna toplina taljenja 1,22 kcal/mol. Sastoji se od dvoatomnih molekula F_2 kojima je energija disocijacije 37,4 kcal/mol.

Toksikna su djelovanja fluora, topljivih fluorida i fluorovodika manje ili više jednaka. Sve te tvari izazivaju upale i teško izlječive rane na vanjskoj koži, a mnogo teže ozljede na sluzokožama, posebno oči i dišnih organa. Pri malim koncentracijama para tih tvari ozljede nastupaju nekoliko sati nakon ekspozicije bez prethodnih simptoma. Zato pri radu s ovim tvarima treba upotrebljavati prikladne zaštitne naočale, rukavice, čizme, pregače i odijela. Maksimalna dopustiva koncentracija ovih tvari u zraku radnih prostorija obično je $3\text{ cm}^3/\text{m}^3$ zraka (računato kao HF), a u nekim zemljama još i niža ($1\text{ cm}^3/\text{m}^3$ u USA).

Fluor je ne samo najelektronegativniji halogen već i najelektrotronegativniji i zato najreaktivniji element uopće; zbog velikog afiniteta prema elektronima njegov atom u stanovitim slučajevima može, uz jednu kemijsku vezu za koju je i inače sposoban, stvarati i razmjerno slabu drugu, kao posljedicu djelovanja ion-dipola (vodikova veza ili fluorni most).

Fluor se spaja s gotovo svim elementima. Čak su u najnovije vrijeme dobiveni fluorida, oksifluorida i kompleksni fluorida kriptona, ksenona i radona, tipa XeF_2 , XeF_4 , XeF_6 , XeOF_4 i XePtF_6 . Najveći broj supstancija reagira s fluorom već na vrlo niskim temperaturama. Tako s vodikom reagira već u mraku na običnoj temperaturi uz pojavu plamena i čak uz eksploziju, a Br, J, S, P, As, Sb, S i fino raspršeni C zapale se u struji fluora i gore uz nastajanje fluorida, najčešće najvišeg stupnja valencije. U struji fluora, također na običnoj temperaturi, zapale se i alkalijski metali, a ako su dovoljno usitnjeni, i zemnoalkalijski metali, te gore uz nastajanje fluorida tipa MF, odnosno MF_2 .

Pri djelovanju fluora na površinu kompaktnih metala (npr. bakra) može tanka prevlaka fluorida koja nastaje pri prvom dodiru štiti metal od daljeg djelovanja fluora, te izgleda kao da su ti metali na običnoj temperaturi otporni prema djelovanju fluora. Tako se mogu ponašati i neki laki metali, npr. Al, pa čak i Mg, čija je reaktivnost prema fluoru inače vrlo velika. Od metala na taj način je najotporniji prema fluoru nikal. On odolijeva fluoru do temperatura oko 600°C .