BRZINA TEČNOSTI PRI INVERZNOJ FLUIDIZACIJI U BARBOTAŽNOJ KOLONI SA KONCENTRIČNOM CEVI

LIQUID CIRCULATION VELOCITY IN THREE PHASE INVERSE FLUIDIZED BED DRAFT TUBE AIRLIFT REACTOR

DRAGICA Z. JOVIČEVIĆ, IVANA M. ŠIJAČKI, MILENKO S. TOKIĆ i PREDRAG S. KOJIĆ,
DEPARTMAN ZA HEMIJSKO INŽENJERSTVO, TEHNOLOŠKI FAKULTET, UNIVERZITET U NOVOM SADU, NOVI SAD

U ovom radu su ispitane fluidodinamičke osobine ograničenog inverzno fluidizovanog sloja u barbotažnoj koloni (eng. airlift reactor) sa koncentričnom cevi, pri čemu je rad kolone u odnosu na tečnu fazu bio šaržnog tipa, a gas kontinualna faza. Inverzno fluidizovani sloj se formirao od relativno velikih čestica (4,3 mm – 5,4 mm) lakog polietilena, u prvom slučaju, i od čestica izuzetno lakog polistirena, u drugom slučaju. Uticaj osobina tečne faze (površinski napon i viskozitet) na fluidodinamičke karakteristike određen je korišćenjem koalescentno–inhibirajućeg medijuma (1% mas. vodeni rastvor etanola) i viskoznog medijuma (46% mas. vodeni rastvor šećera). Pokazano je da ukupan sadržaj gasa, minimalna brzina fluidizacije, indukovana brzina tečne faze i ekspanzija sloja zavise od prividne brzine gasa kao i od osobina tečne i čvrste faze.

Ključne reči: *inverzna fluidizacija; brzina tečnosti; barbotažna kolona; koncentrična cev*

The objective of this work was to investigate the main fluidodynamic behaviour of a constrained inverse fluidized bed in a draft tube airlift reactor, with liquid in batch and air in continuous mode. The inverse fluidized bed was formed of relatively large particles (4.3–5.4 mm) that were composed of light polyethylene (PE), in the first case, and of particles that were composed of extremely light polystyrene (PS), in the second case. The influence of physical properties of liquid phase (surface tension and viscosity) on basic fluidodynamic characteristics was examined using coalescence-inhibiting medium (1wt % aqueous solution of ethanol) and viscous medium (46 wt % aqueous solution of sucrose). It is shown that the overall gas holdup, induced liquid velocity, minimum fluidization velocity and bed expansion are dependent on the superficial gas velocity and liquid and solid properties.

Key words: *inverse fluidization; liquid circulation velocity; airlift reactor; draft tube*

1. UVOD

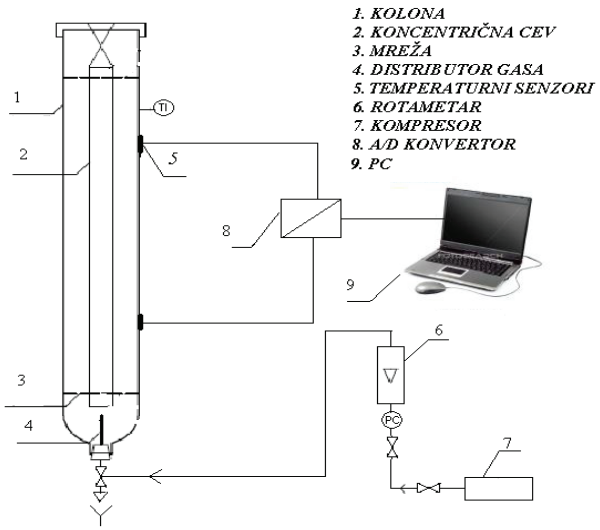
Fluidizacija gas-tečno-čvrsto se definiše kao operacija u kojoj je sloj čvrstih čestica suspendovan u gasnom i tečnom medijumu usled sile trenja gasa i/ili tečnosti, čiji je smer kretanja suprotan gravitacionoj sili ili sili potiska koja deluje na čvrstu česticu [1]. Barbotažni kolonski kontaktori imaju primenu u trofaznim sistemima zbog mogućnosti postizanja relativno velikih brzina recirkulacije tečnosti. Inverzna trofazna fluidizacija definiše se kao operacija u kojoj je sloj čvrstih čestica čija je gustina manja od gustine tečne faze suspendovan u gasnom i tečnom medijumu tokom tečnosti na dole nasuprot sili potiska koja deluje na česticu. Gas struji naviše, suprotnostrujno u odnosu na tečnost. Ekspandovanje sloja

obezbeđeno je tokom tečne faze i/ili mehurovima gasa [2]. Inverzna fluidizacija našla je primenu u biotehnološkim procesima gde čvrsta faza ima ulogu nosača aktivne biomase, kao i u slučaju bakterijskog luženja siromašnih ruda bakra i urana. Čvrsta faza može biti i katalizator, reaktant, proizvod reakcije ili može biti dodata da bi se poboljšao kontakt između faza.

U okviru ovog rada dat je opis fenomenoloških karakteristika barbotažne kolone sa koncentričnom cevi sa inverzno fluidizovanim slojem čvrstih čestica prečnika 3 – 5 mm, gustine 30 i 850 kg/dm^3. Takođe, praćen je uticaj svojstava tečnosti (površinskog napona i viskoziteta), koncentracije i gustine čvrste faze kao i geometrije kolone na brzinu cirkulacije tečnosti u sistemu.

2. EKSPERIMENT

U okviru ovog rada izvršena su merenja brzine tečnosti u vodi, 1% mas. rastvoru etanola i 46% mas. rastvoru saharoze sa dve vrste čvrstih čestica. Eksperimenti su izvođeni u staklenoj barbotažnoj koloni sa centralnom cevi prikazanoj na slici 2.1. Geometrijske karakteristike kolone date su u tabeli 2.1.



Slika 2.1 Eksperimentalna aparatura

Tabela 2.1 Geometrijske karakteristike barbotažne kolone sa centralnom cevi

Distributor gasa – staklena cev:	
Visina (mm)	68
Prečnik otvora (mm)	4
Zaustavna mreža:	
Raspored otvora	kvadratni
Dužina stranice (mm)	4,16
Ostale karakteristike:	
Razmak centralna cev – distributor (mm)	50
Visina tečnosti iznad centralne cevi (mm)	55
Visina centralne cevi ispod donje zaustavne mreže (mm)	85
Visina centralne cevi iznad donje zaustavne mreže (mm)	15
Zapremina tečnosti u koloni (dm^3)	8,86

Upotrebom zaustavnih mreža pored ograničenog kretanja fluidizovanog sloja obezbeđeno je i pozicioniranje centralne cevi u koloni. Na taj način izbegnuta je potreba ugradnje dodatnih graničnika. Eventualno pomeranje cevi u vertikalnom pravcu sprečeno je postavljanjem žice kojom je cev fiksirana za vrh kolone.

U svim eksperimentima kao gasna faza korišćen je vazduh iz laboratorijskog kompresora čiji je protok, nakon vazdušnog filtra meren rotametrom klase tačnosti 2 %. Protok gasa menjan je od 0.2 do 2.2 m^3/h sa korakom od 0.2 m^3/h. Korišćeni rotametar je baždaren na pritisku P_{STD}=101,325 kPa i temperaturi T_{STD}=288 K, što je zahtevalo korekciju izmerenog protka (Q_{STD}) prema radnim uslovima. Ta korekcija se vrši pomoću izraza:

$$Q_h = Q_{STD} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_{STD}}} \cdot \sqrt{\frac{P_{STD}}{P}} \qquad (2.1)$$

Kao tečna faza u eksperimentima su korišćeni: česmenska voda, 1 % mas. vodeni rastvor etanola i 46 % mas. vodeni rastvor saharoze. Fizičke osobine ovih tečnosti prikazane su u tabeli 2.2.

Tabela 2.2 Fizičke karakteristike korišćenih tečnosti na 20° C

Sistemi	***Gustina*** ρ *(kg/m^3)*	***Viskoznost*** μ *(mPas)*	***Površinski napon*** σ*(N/m)*
ČESMENSKA VODA	998,2	1,003	0,0715
1% RASTVOR ETANOLA	996,3	1,037	0,0655
46% RASTVOR SAHAROZE	1212	10,3	0,0758

U svim eksperimentima temperatura tečnosti iznosila je 20 ± 1°C. Rad kolone u odnosu na tečnu i čvrstu fazu bio je šaržnog tipa. Kao čvrsta faza u eksperimentima korišćene su granule polietilena i sfere od stiropora. Karakteristike korišćenih čvrstih čestica date su u tabeli 2.3.

Tabela 2.3 Karakteristike korišćenih čvrstih čestica

Oznaka *(materijal)*	***Prečnik*** ***d*** *(mm)*	***Gustina*** ρ *(kg/m^3)*	***Brzina isplivavanja*** *(m/s)*
POLIETILEN (**PE**)	4,3 - 5,4	853,5	0.116
POLISTIREN **(PS)**	3,7 – 4,7	29,6	0.262

2.1 Eksperimentalna aparatura i metode merenja

U okviru ovog rada, brzina tečne faze određivana je pomoću toplotno osetljivih senzora. Senzori su bili postavljeni u anularnom prostoru barbotažne kolone sa koncentričnom cevi, na rastojanju od 0,75 m. U kolonu je ubrizgavano 60 ml vode, 1% rastvora etanola i 46%

rastvora saharoze, u zavisnosti za koji sistem je određivana brzina cirkulacije tečnosti. Temperatura ubrizgavanog rastvora je iznosila 75^{o}C. Vreme cirkulacije tečnosti u anularnom prostoru je određeno kao period između maksimuma na dijagramima temperatura-vreme, pri čemu je vremenski interval u kome su registrovane promene temperature iznosio 200 ms. Pri svakom protoku gasa bilo je ponovljeno 4 do 5 merenja. Relativna devijacija metode iznosila je do 5%. Brzina tečne faze je određena kao odnos rastojanja između senzora i vremena recirkulacije tečnosti.

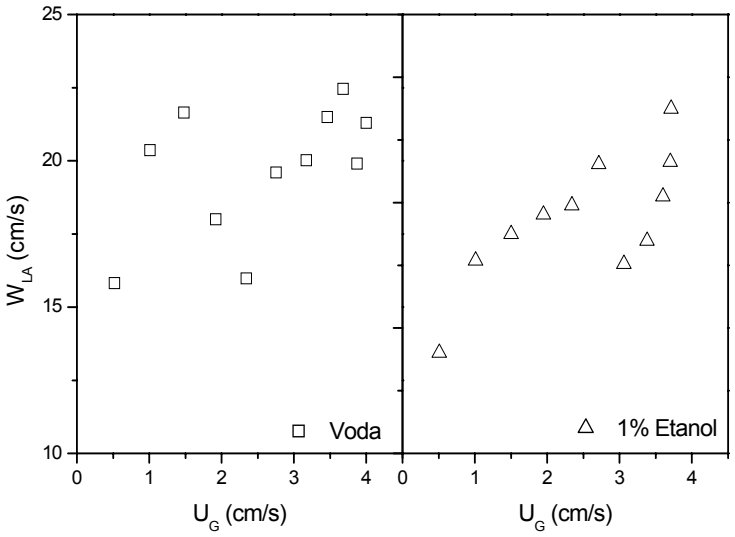
3. REZULTATI I DISKUSIJA

3.1 Preliminarna ispitivanja na dvofaznim sistemima

U ovom delu prikazani su rezultati ispitivanja uticaja prividne brzine gasa i osobina tečnosti na brzinu tečne faze u anularnom prostoru na dvofaznim sistemima radi sticanja boljeg uvida u fluidodinamička zbivanja pri radu sa trofaznim sistemima.

3.1.1 Uticaj prividne brzine gasa

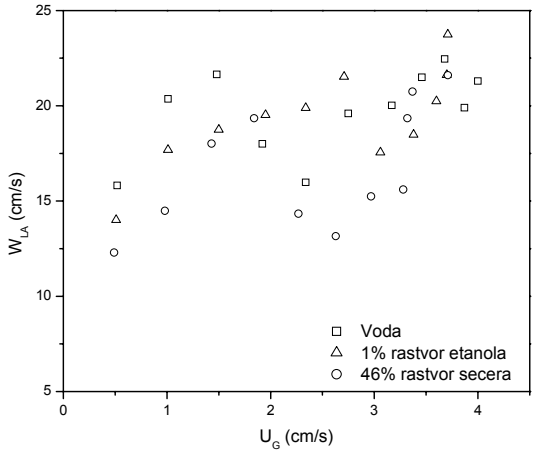
Na slici 3.1 prikazan je uticaj prividne brzine gasa na brzinu cirkulacije. Sa porastom prividne brzine gasa raste i brzina cirkulacije. Pojava pada brzine kod svih sistema može se objasniti pojavom vazdušnog čepa, tj. prisustvom zaustavnih mreža koje predstavljaju otpor prolazu mehurova gasa, usporavaju ih i izazivaju njihovo gomilanje usled čega nastaju vazdušni čepovi. Pri nižim protocima, pojava vazdušnog čepa izaziva opadanje brzine tečne faze zbog male brzine gasa koja nije dovoljna da savlada otpor vazdušnog čepa. Pri visokim protocima, do pada brzine tečnosti dolazi samo pri onom protoku pri kome dolazi do nastanka vazdušnog čepa. Dalji porast protoka gasa dovodi do povećanja brzine tečne faze u odnosu na vrednost brzine koja je postignuta pri pojavi vazdušnog čepa.



Slika 3.1 Uticaj prividne brzine gasa na brzinu tečne faze za sisteme vazduh-voda i vazduh-1% rastvor etanola u BKKC

3.1.2 Uticaj osobina tečnosti

Dodatak alkohola sprečava koalescenciju mehurova što uzrokuje manje vrednosti prečnika mehurova. Manje mehurove cirkulaciona struja lakše uvlači u anulus zbog čega dolazi do smanjenja pogonske sile za recirkulacija tečnosti a samim tim se dobijaju manje vrednosti brzine tečnosti u odnosu na brzinu tečnosti u vodi, kao što je prikazano na slici 3.2. Takođe, brzina tečnosti za 46% rastvor saharoze je manja u odnosu na vodu što je u skladu sa dosadašnjim ispitivanjima mnogih autora koji su primetili da povećanje viskoznost usled povećanog otpora pri strujanju tečnosti smanjuje brzinu tečnosti.

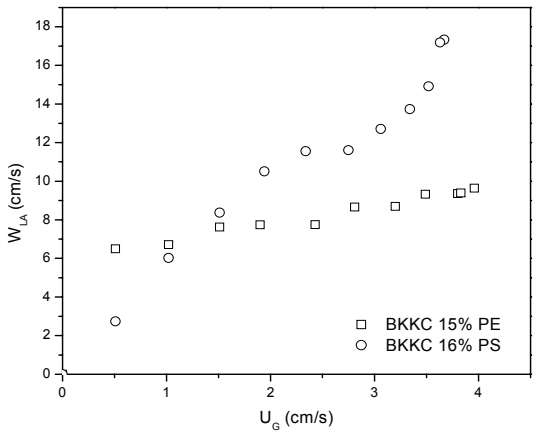


Slika 3.2 Uticaj osobina tečnosti na brzinu tečne faze u BKK

3.2 Brzina tečne faze u trofaznim sistemima

3.2.1 Uticaj prividne brzine gasa

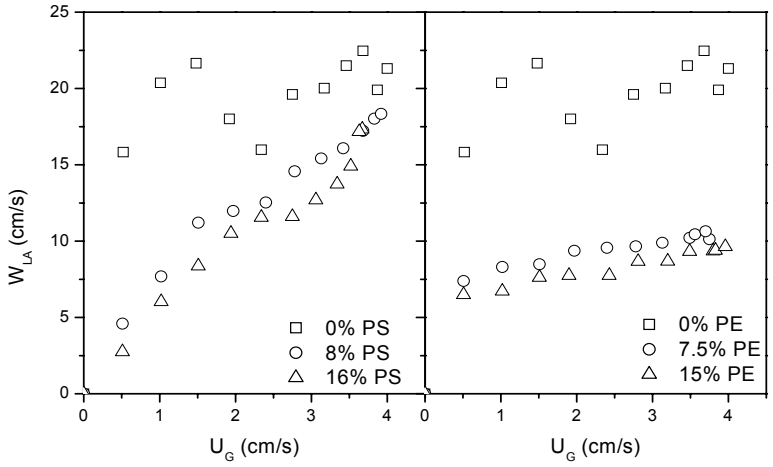
Kao i kod dvofaznih sistema, u slučaju trofaznih sistema sa porastom prividne brzine gasa dolazi do porasta brzine tečne faze (Slika 3.3). U analiziranim sistemima zabeležene su veće vrednosti brzina tečne faze u slučaju kada su korištene sfere od polistirena čija je gustina znatno manja od polietilenskih granula.



Slika 3.3 Uticaj prividne brzine gasa na brzinu tečne faze u BKKC za sisteme vazduh-voda-PE 15% i vazduh-voda-PS 16%

3.2.2 Uticaj koncentracije čvrste faze

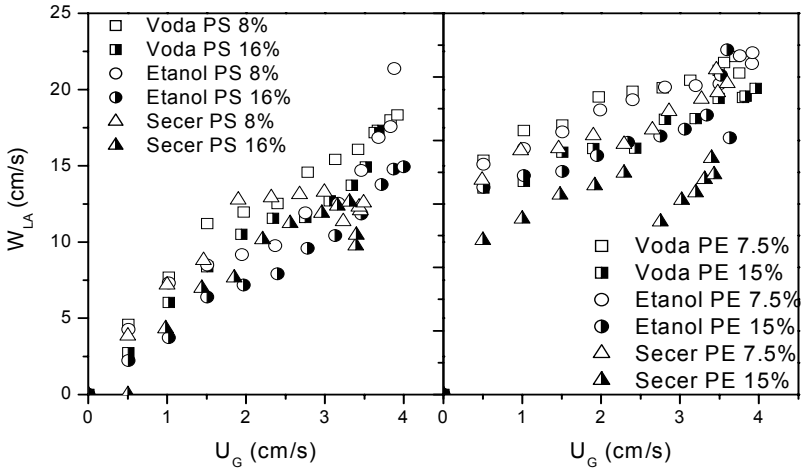
Prisustvo čvrste faze smanjuje brzinu tečne faze u odnosu na dvofazne sisteme (Slika 3.4). Sa povećanjem koncentracije čvrste faze, smanjuje se brzina tečnosti i u trofaznim sistemima. Čvrsta faza usporava punjenje anularnog prostora gasnom fazom i na taj način smanjuje brzinu cirkulacije tečnosti. U slučaju granula od polietilena razlike između dvofaznih i trofaznih sistema su očiglednije.



Slika 3.4 Uticaj koncentracije čvrste faze na brzinu tečne faze u BKKC za sisteme vazduh-voda-PS i vazduh-voda-PE

3.2.3 Uticaj osobina tečnosti

Na osnovu slike 3.5 može se zaključiti da se, kao i kod dvofaznih sistema, brzina tečne faze u anularnom prostoru smanjuje u rastvorima etanola i saharoze. Najniže vrednosti brzina postižu se u rastvoru saharoze a mogu se objasniti velikim brojem sitnih mehurova usled čega dolazi do smanjenja pogonske sile za recirkulaciju tečnosti. Takođe, u svim sistemima u kojima se kao tečna faza koristio 46% rastvor saharoze dolazilo je do pojave vazdušnih čepova zbog čega je dolazilo do naglih smanjenja brzine tečne faze.



Slika 3.5 Uticaj osobina tečnosti na brzinu tečne faze u BKKC

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu razmatrana su fluidodinamička zbivanja i određena brzina tečnosti u anularnom prostoru u barbotažnoj koloni sa koncentričnom cevi pri inverznoj fluidizaciji. Kao tečna faza korišteni su voda, 1% rastvor etanola i 46% rastvor saharoze. Eksperimenti su izvođeni sa dve vrste čvrstih čestica: sfere od polistirena i polietilenske granule. Na osnovu dobijenih rezultata i njihove analize mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Upotreba zaustavnih mreža za ograničavanje kretanja čvrste faze znatno utiče na fluidodinamiku sistema izazivajući stvaranje vazdušnog čepa.
- U ispitivanim rastvorima etanola i saharoze pored krupnijih mehurova postoji i znatna količina mehurova prečnika manjeg od 1 mm i čije vreme zadržavanja višestruko veće od srednjeg vremena zadržavanja gasne faze u koloni.
- Kvalitativna analiza sistema u saglasnosti je sa prikazom zapaženih fluidodinamičkih zbivanja.
- Povećanje prividne brzine gasa dovodi do porasta ukupnog sadržaja gasa i brzine tečne faze u anularnom prostoru u barbotažnoj koloni sa koncentričnom cevi.
- Osobine tečne faze znatno utiču na sadržaj gasa i brzinu tečne faze u koloni. Veće vrednosti sadržaja gasa a time i niže vrednosti brzine tečne faze postižu se u rastvorima etanola i saharoze u odnosu na sistem vazduh-voda.
- Pojava vazdušnog čepa izaziva pad brzine tečne faze u anularnom prostoru.
- Prisustvo čvrste faze dovodi do opadanja sadržaja gasa i smanjenja brzine tečne faze u odnosu na dvofazni sistem srazmerno koncentraciji čestica. Razlike su više izražene u slučaju polietilena kao čvrste faze.

LITERATURA

[1] Fan, L-S. *Gas-Liquid-Solid Fluidization Engineering*; Butterworths: Boston, 1989.
[2] Comte, M. P.; Bastoul, D.; Hebrard, G.; Roustan, M.; Lazarova, V. Hydrodynamics of a Three-Phase Fluidized Bed, the Inverse Turbulent Bed, *Chem. Eng. Sci*. **1997**, *52*, 3971-3977.
[3] Briens, C. L.; Ibrahim, Y. A.; Margaritis, A.; Bergougnou, M. A. Effect of Coalescence Inhibitors on the Performance of Three-Phase Inverse Fluidized-Bed Columns, *Chem. Eng. Sci*. **1999**, *54*, 4975-4980.
[4] Nikolov, L.; Karamanev, D. Experimental Study of the Inverse Fluidized Bed Biofilm Reactor*, Can. J. Chem. Eng*. **1987**, *65*, 214-217.
[5] Buffiere, P.; Bergeon, J-P.; Moletta, R. The Inverse Turbulent Bed: a Novel Bioreactor for Anaerobic Treatment, *Wat. Res*. **2000**, *34*, 673-677.
[6] Loh, K-C; Liu, J. External Loop Inversed Bed Airlift Bioreactor (EIFBAB) for Treating High Strength Phenolic Wastewater*, Chem. Eng. Sci*. **2001**, *56*, 6171-6176.
[7] Fan, L-S.; Muroyama, K.; Chern, S-H. Hydrodynamic Characteristics of Inverse Fluidization in Liquid-solid Systems, *Chem. Eng. J*. **1982**, *24,* 143-150.
[8] Chern, S. H.; Muroyama, K.; Fan, L. S. Hydrodynamics of Constrained Inverse Fluidization and Semifluidization in a Gas-Liquid-Solid System, *Chem. Eng Sci.* **1983**, *38*, 1167-1174.
[9] Albijanić, B.; Havran, V.; Petrović, D. Lj.; Đurić, M.; Tekić, M. N. Hydrodynamics and Mass Transfer in a Draft Tube Airlift Reactor with Dilute Alcohol Solutions, *AIChE J*. **2007**, *53*, 2897-2904.
[10] Chisti, M. Y. *Airlift Bioreactors*; Elsevier: London, 1989.
[11] Chakravarty, M.; Singh, H. D.; Baruah, J. N.; Iyengar, M. S. Liquid Velocity in a Gas-Lift Column, *Indian Chem. Eng*. **1974**, *16*, 17-22.

[12] Li, G. Q.; Yang, S. Z.; Cai, Z. L.; Chen, J. Y. Mass Transfer and Gas-Liquid Circulation in an Airlift Bioreactor with Viscous Non-Newtonian Fluids, *Chem. Eng. J.* **1995**, *56*, B101-B107.
[13] Hwang, S. J.; Cheng, Y. L. Gas Holdup and Liquid Velocity in Three-Phase Internal-Loop Airlift Reactors, *Chem. Eng. Sci.* **1997**, *52*, 3949-3960.
[14] Petrović, D. Lj. Hydrodynamics and Mass Transfer in a Three Phase Draft Tube Airlift Reactor, *PhD Thesis*, Faculty of Technology, Novi Sad, Serbia, 1989.
[15 Lee, J.C.; Sherrard, A. J.; Buckley, P. S. Optimum Particle Size in Three Phase Fluidized Bed Reactors, In *Fluidization and its applications*, Angelino, H. et al. Eds.; Cepadeus-Editions: Toulouse, 1974, p. 407.
[16] Kim, S. D.; Baker, C. G. J.; Bergougnou, M. A. Phase Holdup Characteristics of Three Phase Fluidized Beds*, Can. J. Chem. Eng.* **1975**, *53*, 134-139.
[17] Kawalec-Pietrenko, B. Liquid Circulation Velocity in the Inverse Fluidized Bed Reactor, *Bioprocess Eng*. **2000**, *32*, 397-402.
[18] Nikov, I.; Karamanev, D. Liquid-Solid Mass Transfer in Inverse Fluidized Bed, *AIChE J.* **1991**, *37*, 781-784.