

MILAN M. MILIVOJEVIĆ
ALEKSANDAR P. DUDUKOVIĆ
BOJANA M. OBRADOVIĆ
ALEKSANDAR M. SPASIĆ
BRANKO M. BUGARSKI

Tehnološko–metalurški fakultet
Univerziteta u Beogradu,
Beograd

PREGLEDNI RAD

66.023:577:532.005

ANALIZA HIDRODINAMIČKIH PARAMETARA PNEUMATSKIH BIOREAKTORA SA SPOLJAŠNOM RECIRKULACIJOM

U ovom radu je izvršena analiza uticaja osnovnih hidrodinamičkih parametara pneumatskog reaktora i procesnog fluida na karakteristike rada pneumatskog reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom. Definisan je uticaj projektnih i operativnih parametara (geometrije reaktora, raspodeljivača faza, površinske brzine gasa, režima strujanja i dr.) kao i osobina fluida (viskoziteta tečnosti i prisustva površinski aktivnih materija) na površinsku brzinu tečnosti i udeo gasa. Za predviđanje rada pneumatskog bioreaktora korišćen je veći broj literaturno dostupnih korelacija, kako onih koje su izvedene iz nekog od modela strujanja tako i onih poluempirijskih i empirijskih. Primenljivost korelacija je proverena na širem opsegu eksperimentalnih podataka, a dat je i predlog jednačina pomoću koji se mogu u pojedinim režimima rada najtačnije predvideti hidrodinamičke osobine ovih reaktora.

Danas se u biotehnološkim procesima koriste mnogi tipovi bioreaktora. Od standardnih tipova bioreaktora najčešće se koriste fermentori sa mehaničkim mešanjem, barbotazne kolone i pneumatski reaktori. S obzirom da bioreaktor predstavlja srce svakog biotehnološkog procesa, to od pravilnog izbora tipa i osobina reaktora zavisi uspešnost samog procesa.

Prednost pneumatskih reaktora u odnosu na druge tipove uređaja sa barbotaznim kontaktom je njihova jednostavna konstrukcija bez pokretnih delova. Odsustvo pokretnih delova, kao što su na primer mehaničke mešalice, predstavlja izvanrednu pogodnost za primenu pneumatskih reaktora u trofaznim fluidizacionim sistemima u kojima čvrstu fazu čine čestice malih gustina (približnih gustini vode) osetljive na mehanička naprezanja, što je slučaj u mnogim farmaceutskim i biomedicinskim procesima. Osim ovoga, kod pneumatskih reaktora moguće je i pri malom utrošku unete snage ostvariti veliku međufaznu kontaktnu površinu. Uz to pneumatski reaktori poseduju dobre hidrodinamičke, maseno–prenosne i toplotno–prenosne osobine usled cirkulacije tečnosti koja omogućava dobro mešanje.

Pneumatski reaktori se dele na one sa spoljašnjom i sa unutrašnjom recirkulacijom. Među njima postoje izvesne razlike u konstrukciji koje uslovljavaju različito hidrodinamičko ponašanje ovih reaktora, tako da oba tipa reaktora imaju neke svoje prednosti ali i nedostatke.

U literaturi je danas moguće naći veliki broj eksperimentalnih podataka i različitih korelacija koje opisuju pojedine parametre rada reaktora, ali još uvek ne postoje opšti modeli i sistematski pristup analizi različitih eksperimentalnih sistema.

U ovom radu je učinjen pokušaj sveobuhvatne analize uticaja osnovnih hidrodinamičkih parametara

pneumatskih reaktora i procesnog fluida na karakteristike rada pneumatskog reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom. Definisan je uticaj pojedinih projektnih i operativnih parametara, kao i osobina fluida, na brzinu tečnosti i udeo gasa. Pri tome je na većem broju prikupljenih eksperimentalnih podataka u širem opsegu različitih dimenzija i režima rada reaktora analizirana primenljivost empirijskih, poluempirijskih i teorijskih korelacija predloženih u literaturi. Ovakvo ispitivanje primenljivosti pojedinih literaturnih korelacija je omogućilo da se odaberu najpogodnije za razvoj opšteg hidrodinamičkog modela reaktora sa spoljašnjom recirkulacijom.

HIDRODINAMIKA PNEUMATSKIH REAKTORA

Minimum zahteva koje bi hidrodinamički model jednog pneumatskog reaktora trebalo da ispuni jeste da omogućí da se sa zadovoljavajućom tačnošću predvidi uticaj jedine nezavisno promenljive veličine kod ovog tipa reaktora, a to je površinska brzina gasa na brzinu tečnosti i udeo gasa. Međutim, za razliku od barbotaznih kolona kod pneumatskih reaktora ove osnovne hidrodinamičke osobine su međusobno uslovljene na dosta složen način što otežava njihovo predviđanje. Sa druge strane, poznavanje brzine tečnosti i udela gasa čini osnovu za tačno određivanje efikasnosti mešanja i prenosa mase u reaktoru.

U literaturi se danas može naći veći broj modela i korelacija kojima su razni autori pokušavali da opišu ove uslovljenosti, ali jednostavnog i pouzdanog modela za sada još uvek nema. Većina ovih modela i zavisnosti se najčešće bazira na čisto empirijskim odnosima koji su utvrđeni samo za određeni uređaj koji je bio korišćen u eksperimentima. Mada su različite grupe istraživača na razne načine pokušavale da međusobno povežu zadržavanje gasa i brzinu tečnosti, opštiji pristup ovome problemu još uvek ne postoji.

Kombinacija jednostavnog bilansa količine kretanja duž celog puta cirkulacije sa nezavisnim izrazom koji povezuje udeo gasa i brzinu tečnosti se do sada pokazala kao najpraktičnija pri rešavanju ovog problema.

Adresa autora: M.M. Milivojević, Tehnološko–metalurški fakultet
Univerziteta u Beogradu, Karnegijeva 4, 11000 Beograd
E–mail: mmilan@tmf.bg.ac.yu
Rad primljen: Septembar 18, 2003
Rad prihvaćen: Januar 14, 2003

Kretanje fluida u reaktoru je posledica postojanja pogonske sile usled razlike gustina fluida u silaznom i uzlaznom delu reaktora. Ova sila je uravnotežena ukupnim otporima strujanju koji se javljaju duž celog puta cirkulacije i koji su dati preko odgovarajućih padova pritiska. Pri tome se zanemaruju gubici usled trenja u uzlaznom delu reaktora i udeo gasa u silaznom delu reaktora. Izraz kojim se bilans količine kretanja može matematički prikazati je dat sledećom jednačinom:

$$\rho_l \cdot g \cdot H \cdot (\epsilon_r - \epsilon_d) = \sum_i K_{fi} \frac{\rho_l \cdot V_{fd}^2}{2} \quad (1)$$

Glavna prednost ovog bilansa je to što se vrednosti otpora pojedinih delova od kojih je reaktor sastavljen (kolena, cevi, suženja i dr.) mogu predvideti korišćenjem podataka datih u odgovarajućim priručnicima.

Kako su udeo gasa i brzina tečnosti međusobno uslovljeni, potrebno je imati još jednu jednačinu koja ova dva parametra povezuje. Najčešće su to jednačine koje su dobijene primenom "drift-fluks" modela koji su razvili Zuber i Findlay ili modela zasnovanog na primeni "slip" brzine.

Kao treći pristup neki autori su pokušali da strujanje u reaktoru opišu preko energetskog bilansa. Međutim, iako ovaj pristup ima određene prednosti u odnosu na bilans količine kretanja, pokazalo se da je njegova praktična primena daleko složenija.

Model koji su razvili Zuber i Findlay [34] uzima u obzir neuniformnost radijalnih profila brzine tečnosti i udela gasa i povezuje ove dve promenljive na sledeći način:

$$\frac{V_{gs}}{\epsilon} = C_0 \cdot (V_{gs} + V_{ls}) + C_1 \quad (2)$$

U jednačini (2) neuniformnost radijalnih profila udela gasa i brzine tečnosti je uzeta u obzir preko parametra C_0 (kao njegovo odstupanje od jedinice), dok je parametar C_1 najčešće izjednačen sa brzinom dizanja mehura gasa u tečnosti. Prema autorima ovog modela ova dva parametra zavise od režima strujanja, prečnika cevi i osobina fluida. Ovaj tip modela ima svoju primenu pre svega pri većim brzinama gasa. Njegov osnovni nedostatak je taj što ne postoje izrazi za predviđenje vrednosti parametara C_0 i C_1 .

Drugi pristup problemu je preko određivanja "slip" brzine. "Slip" brzina se može definisati kao stvarna brzina gasa u odnosu na tečnost. Postojanje razlike između stvarne i površinske brzine tečnosti je posledica cirkulacija gasa i tečnosti u radijalnom pravcu. Ovom brzinom je određeno u kolikoj meri u nekom delu reaktora udeo gasa odstupa od udela zapreminskog protoka gasa u tom delu. "Slip" brzina se može izjednačiti sa relativnom brzinom gasa u odnosu na tečnost samo u slučaju kada nema radijalnih odstupanja, odnosno kod jednodimenzionog proticanja [32]. Izraz kojim se matematički može definisati ova brzina dat je sledećom jednačinom:

$$V_s = \frac{V_{gs}}{\epsilon} - \frac{V_{ls}}{1 - \epsilon} \quad (3)$$

Nađeno je da "slip" brzina zavisi od režima dvofaznog strujanja. Naime, u homogenom režimu koji se uspostavlja pri brzinama gasa manjim od 0,05 m/s gde imamo uniformnu raspodelu veličine mehurova po radijalnom preseku "slip" brzina ima tendenciju blagog opadanja sa povećanjem protoka gasa. U heterogenom režimu pri brzinama gasa većim od 0,05 m/s kada se javlja neuniformna raspodela veličine mehurova "slip" brzina raste sa povećanjem brzine gasa. Takođe je utvrđeno da je "slip" brzina u heterogenom režimu strujanja manja od brzine dizanja mehura, dok je u heterogenom režimu ona veća [19]. "Slip" brzina može se izraziti u zavisnosti od brzine dizanja mehura u medijumu jednačinom opšteg oblika [33]:

$$V_s = V_{b\infty} + f(V_{gs}, V_{ls}, D) \quad (4)$$

Modeli za određivanje udela gasa zasnovani na "slip" brzini svoju primenu imaju pre svega u oblasti homogenog mehurastog strujanja [19].

UTICAJ GEOMETRIJE REAKTORA

Pri razmatranju uticaja geometrije na hidrodinamičke osobine reaktora pre svega se imaju u vidu uticaji: tipa samog reaktora (sa unutrašnjom ili spoljašnjom recirkulacijom i dr.), otpora koji se javljaju pri strujanju fluida duž cirkulacionog puta u reaktoru, uticaj tipa i lokacije raspodeljivača gasa, veličine i rasporeda otvora na raspodeljivaču, kao i odnosa poprečnih preseka uzlaznog i silaznog dela reaktora. Neke od ovih osobina reaktora imaju izraženiji uticaj dok se druge u većini slučajeva mogu zanemariti.

Uticaj tipa reaktora

Pri upoređivanju dva osnovna tipa pneumatskih reaktora može se uopšteno reći da je za istu brzinu gasa u reaktorima sa unutrašnjom cirkulacijom udeo gasa veći, dok je u onima sa spoljašnjom recirkulacijom veća brzina tečnosti. Ovo je posledica zadržavanja gasa u silaznoj sekciji koje se javlja kod reaktora sa unutrašnjom recirkulacijom. Kod reaktora sa spoljašnjom to je izbegnuto ili umanjeno postojanjem gornje horizontalne sekcije u kojoj se u velikoj meri vrši razdvajanje faza. Pored ovih razlika koje postoje kod različitih tipova reaktora, primećeno je da se čak i kod istih tipova reaktora mogu javiti razlike kao posledica različitih konfiguracija poprečnih preseka (kružni ili kvadratni) ili konfiguracije samih reaktora (načina razdvajanja faza ili mesta uvođenja gasa) [8].

Uticaj otpora strujanju

Može se smatrati da su u reaktoru pri strujanju fluida najizraženiji gubici usled trenja o zidove reaktora, usled promene pravca strujanja na vrhu i na dnu reaktora.

ra, usled nejednakih površina za strujanje u silaznoj i uzlaznoj sekciji, a ukoliko postoje mehurovi gasa u silaznoj sekciji, i usled otpora koji ovi mehurovi prave strujanje fluida naniže. Opšti izraz za proračun koeficijenta ukupnih gubitaka može se predstaviti jednačinom [33]:

$$K_f = \frac{A_d}{A_r} \cdot (K_{fr} + 3 \cdot K_{fk} + K_{fd \rightarrow r}) + K_{fk} + K_{fr \rightarrow d} + K_{fd} \quad (5)$$

Za određivanje pojedinih koeficijenata gubitaka predložene su uobičajene jednačine koje se koriste za određene delove reaktora (kolena, suženja, ravne delove i dr.). Vrednosti pojedinih koeficijenata trenja je isto tako moguće odrediti i preko ekvivalentnih dužina, ukoliko je ta vrsta podataka dostupna. Izrazi za određivanje pojedinih gubitaka mogu se naći kod raznih autora [12, 32, 33].

Pri proračunu otpora strujanju na ovaj način kao uobičajena vrednost za Fanningov koeficijent trenja, f (za $Re > 10^5$) može se koristiti vrednost 0,005 koja se pokazala u velikom broju slučajeva bliskom eksperimentalnim vrednostima. Ukoliko se želi tačniji proračun ova vrednost se može koristiti kao prva pretpostavka u iterativnom proračunu. Proračun koeficijenta trenja u laminarnoj oblasti strujanja ($Re < 1000$) se može izvršiti korišćenjem izraza za jednofazni tok. U turbulentnom oblasti situacija je složenija pošto je faktor trenja dvofaznog toka veći od onog koji bi bio u slučaju jednofaznog, a korelacije koje postoje za dvofazni tok daju velika međusobna odstupanja [19].

Uticao raspedeljivača gasa

Uticao tipa raspedeljivača gasa kao i veličine otvora na njemu se može zanemariti u većini situacija koje se sreću u industrijskim uslovima. Osnovni razlog ovome leži u činjenici da pri uslovima razvijene turbulencije (u heterogenom režimu strujanja gasa odnosno pri površinskim brzinama gasa većim od 0,05 m/s), kao i pri radu sa fluidima koji pospešuju koalescenciju, veličina mehurova zavisi pre svega od hidrodinamičkih sila koje vladaju u masi fluida, a u znatno manjoj meri od veličine formiranih mehurova na samom raspedeljivaču gasa [8]. Međutim, iako izbor tipa raspedeljivača gasa i veličine otvora ima malog uticaja, potrebno je obratiti pažnju na to da oni budu pravilno dizajnirani (perforirani po celoj površini) tako da ne dolazi do loše raspodele gasa po poprečnom preseku uzlazne sekcije [9]. Osim toga, lokacija raspedeljivača gasa ima značajnu ulogu i na nju je takođe potrebno obratiti pažnju [8].

Uticao odnosa površina silaznog i uzlaznog dela reaktora

Odnos površina silaznog i uzlaznog dela reaktora (A_d/A_r) se javlja u većini jednačina kojima se povezuju udeo gasa i brzina tečnosti u pneumatskim reaktorima, bilo da su one empirijskog tipa ili su zasnovane na nekom od modela. Utvrđeno je da za fluide malog viskozitetu ovaj odnos ima najveći uticao na brzinu tečnosti u

reaktoru [1]. Brzina tečnosti monotono opada kada odnos A_d/A_r opada što za posledicu ima povećanje udela gasa.

Optimizacija odnosa površina se može izvršiti prema različitim kriterijumima koji zavise od cilja optimizacije.

OSNOVNI MODELI ZA HIDRODINAMIČKE PARAMETRE U PNEUMATSKIM REAKTORIMA

Modeli za određivanje udela gasa

Pri modelovanju pneumatskih reaktora pouzdanost modela zavisi pre svega od tačnosti sa kojom su određeni udeo gasa i pad pritiska u dvofaznom toku. Međutim i pored značajne pažnje koju pneumatski reaktori pobuđuju, kod njih, za razliku od barbotaznih kolona, još uvek ne postoji opšti oblik korelacije za udeo gasa [23]. Može se uopšteno reći da udeo gasa u reaktoru pre svega zavisi od prečnika i brzine dizanja mehurova u sistemu. To znači da on zavisi od brzina gasa i tečnosti, geometrije reaktora i visine reakcione smeše [25], kao i od karakteristika fluida (viskozitetu i prisustva površinski aktivnih materija). Svi oni faktori koji povećavaju bilo prečnik mehura bilo njegovu brzinu dizanja utiču na smanjivanje udela gasa, a oni koji smanjuju veličinu stabilnih mehurova i/ili smanjuju njihovu brzinu dizanja dovode do povećanja udela gasa.

Pri radu pneumatskih reaktora, u zavisnosti od površinske brzine gasa i drugih osobina sistema, mogu se javiti tri režima rada, pa je teško postaviti opštu jednačinu koja bi bila primenljiva u sva tri režima. Zato se preporučuje da se u određenim režimima koriste jednačine određenog tipa. Tako se za "slug flow" režim preporučuje korišćenje modela Zuber i Findlay-a, dok za homogeni režim rada on nije primenljiv [15].

U literaturi se može naći veći broj modela kojima su različiti autori pokušavali da odrede udele gasa u silaznom i uzlaznom delu pneumatskog reaktora. Među ovim modelima preovladavaju tri tipa. U prvoj grupi nalaze se modeli kod kojih se određivanje udela gasa bazira na određivanju "slip" brzine. Drugoj grupi pripadaju oni izvedeni iz modela Zuber i Findlay-a, dok treću grupu čine iskustvene korelacije.

Za određivanje udela gasa u pneumatskim reaktorima u ovom radu je ukupno analizirano 18 različitih jednačina koje su se mogle naći u literaturi [24]. Neke od ovih jednačina za određivanje udela gasa date su preko "slip" brzine, pa je bilo potrebno da se i za ovu brzinu odrede najtačniji izrazi. Za određivanje "slip" brzine korišćeno je 10 jednačina predloženih od strane različitih autora [24]. U tabeli 1 dat je pregled referenci jednačina za udeo gasa i za "slip" brzinu.

Modeli za određivanje brzine tečnosti

Brzina tečnosti je glavni projektni parametar kod pneumatskih reaktora. Ispitivanjima je utvrđeno da na brzinu tečnosti u reaktoru najveći uticao imaju površinska

Tabela 1. Korelacije predložene za određivanje udela gasa i "slip" brzine u pneumatskim reaktorima sa recirkulacijom.
Table 1. Correlations for gas hold up and "slip" velocity predictions in air-lift reactors

Jednačine za određivanje udela gasa	Jednačine za određivanje "slip" brzine
1) van der Lans, 1985. (a), [32]	1) van der Lans, 1985., [32]
2) Jednačina bil. kol. kretanja, [33]	2) Towell i sar., 1965., [32]
3) van der Lans, 1985. (b), [32]	3) Wallis, 1969. [32]
4) Bello i sar., 1985., [1]	4) Gomezplata i sar., 1972., [32]
5) Miyahara i sar., 1986., [8]	5) van der Lans, 1985., [32]
6) Merchuk i Stein, 1981. (a) [19]	6) Zuber i Findlay, 1965., [34]
7) Heijnen i van't Riet, 1982. [32]	7) Lockett i Kirkpatric, 1975., [19]
8) Merchuk i Stein, 1981. (b) [21]	8) Joshi i sar., 1990., [19]
9) Joshi i sar., 1990., [19]	9) Garcija-Calvo i sar. 1989., [10]
10) Lockett i Kirkpatric, 1975. [19]	10) Turner, 1966., [19]
11) Ranade i Joshi, 1988., [19]	
12) Weiland i Onken, 1981., [19]	
13) Nichol, 1984., [19]	
14) Siegel i dr, 1986., [19]	
15) Oles i sar., 1976., [32]	
16) Akita i sar., 1994., [25]	
17) Kawase i sar., 1995., [25]	
18) Miron i sar., 2000., [25]	

brzina gasa, geometrija reaktora i fizičke osobine fluida. Ova brzina je uslovljena odnosom pogonske sile (koja je jednaka razlici udela gasa u silaznom i uzlaznom delu reaktora) i sile otpora (koja je jednaka padu pritiska u dvofaznom toku). Pri malim brzinama tečnosti ($V_{ls} < 0,15$ m/s) čak i male greške u određivanju udela gasa daju velike greške u određivanju brzine tečnosti (npr. 10% greške kod ϵ daje 200% greške kod V_{ls}), dok pri velikim brzinama ($V_{ls} > 1$ m/s) ova greška ima manji uticaj (30% greške kod ϵ daje ne više od 30% greške kod V_{ls}). Takođe je utvrđeno da pri manjim brzinama tečnosti i preciznost određivanja faktora trenja bitno utiče na tačnost određivanja brzine tečnosti mada u znatno manjoj meri nego što je to slučaj sa udelom gasa [15].

U literaturi se može naći više tipova jednačina koje daju zavisnost brzine tečnosti od ostalih parametara sistema. U prvu grupu jednačina spadaju one u kojima je uticaj geometrije reaktora uključen posredno, preko koeficijentata. Ove zavisnosti su date u obliku:

$$V_{lsr} = \omega \cdot V_{gsr}^v \quad (6)$$

gde je ω parametar koji zavisi od geometrije reaktora i osobina fluida, dok vrednost parametra n zavisi od geometrije reaktora i od režima strujanja. Ova jednačina je empirijskog tipa i njen osnovni nedostatak leži u činjenici da do sada nije data opšta zavisnost na osnovu koje bi se mogao proceniti uticaj geometrije na vrednost parametra ω . Što se tiče eksponenta n neki od autora su došli do vrednosti od 0,4, s tim da dolazi do opadanja njegove vrednosti sa promenom režima strujanja pri većim brzinama gasa [13]. Međutim u literaturi je prisutan i izvestan broj radova u kojima su objavljeni eksperimentalni rezultati koji pokazuju odstupanje od ove vrednosti

tako da jednačine ovoga tipa nemaju neki veći praktični značaj pri projektovanju reaktora.

Druga grupa jednačina je zasnovana na izrazu koji su predložili Bello i saradnici [1] gde je brzina tečnosti data preko izraza:

$$V_{lsr} = \omega \cdot \left(\frac{A_d}{A_r} \right)^v \cdot V_{gsr}^{1/3} \quad (7)$$

U jednačini (7) parametar n ima vrednost koja manje-više ne zavisi od tipa reaktora i iznosi oko 0,74 za reaktore sa spoljašnjom i oko 0,78 za one sa unutrašnjom recirkulacijom tečnosti (Bello i sar., 1984). Vrednost parametra v zavisi od tipa reaktora tako da za reaktor sa spoljašnjom recirkulacijom on iznosi 1,55, dok je kod reaktora sa unutrašnjom recirkulacijom njegova vrednost 0,66. To znači da su brzine tečnosti u reaktorima sa spoljašnjom, više nego dva puta veće od onih u reaktorima sa unutrašnjom recirkulacijom pri istim brzinama gasa i odnosima porečnih preseka silaznog i uzlaznog dela reaktora. Iz jednačine (7) se takođe može zaključiti da je odnos površina poprečnih preseka silaznog i uzlaznog dela reaktora činilac koji ima najveći uticaj na odnos brzina tečnosti i gasa pošto je vrednost eksponenta $v = 0,75$. Iz tog razloga potrebno je obratiti pažnju na to da izbor odnosa površina bude što je moguće bliže optimalnoj vrednosti.

U treću grupu jednačina spadaju one koje su dobijene postavljanjem energetskog bilansa za reaktor u celini. Takvi su izrazi koje su predložili Chakravarty sa saradnicima [5] i [8]. Chakravarty-jev model je dosta složen za praktičnu primenu. Chisti-jev model se zasniva na modelu Freedman-a i Davidson-a [9], pa je primenljiv za sve tipove pneumatskih reaktora. Ovde treba pomenuti i model koji su razvili Garcija-Calvo sa saradnicima [10], a koji je jednostavan i pokazuje dosta dobre rezultate.

Ukupno je ispitano 12 jednačina za određivanje brzine tečnosti i njihov pregled je dat je u tabeli 2.

Tabela 2. Korelacije predložene u literaturi za određivanje površinske brzine tečnosti u pneumatskim reaktorima sa recirkulacijom.

Table 2. Correlations proposed in the literature for determining the superficial liquid velocity in air-lift reactors.

Jednačine za određivanje brzine tečnosti
1. Glennon i sar., 1990., [13]
2. Jednačina bilansa količine kretanja, [33]
3. Merchuk i Stein, 1981., [19]
4. Popović i Robinson, 1984., [8]
5. Bello i sar., 1985., [19]
6. Chisty, 1989., [8]
7. Weiland i Onken, 1981., [19]
8. Nichol, 1984., [19]
9. Siegel i sar., 1986., [19]
10. Popović i Robinson, 1987., [19]
11. Lockett i Kirkpatrick, 1975., [19]
12. Joshi i Lali, 1984., [19]

Tabela 3. Pregled podataka o geometrijskim osobinama pneumatskih reaktora ispitivanih pri katedri za hemijsko inženjerstvo na TMF-u u Beogradu.

Table 3. Geometry of the experimental air-lift reactors tested in the Department of Chemical Engineering, of the Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade.

Referenca	v , l	H, m	d_r , m	d_d , m	A_r/A_d	K_f	Tip r. gasa
Bugarski, 1992., [3]	0,3	0,224	0,14	0,14	1	4,98	S.P $d_o = 100-160 \mu\text{m}$
Bugarski, 1992., [3]	1,0	0,3	0,225	0,15	1	5,21	S.P $d_o = 100-160 \mu\text{m}$
Marić, 1996., [20]	0,3	0,224	0,022	0,022	1	4,98	S.P $d_o = 100-160 \mu\text{m}$
Sajc, 1994., [29]	0,25	0,27	0,027	0,017	2,25	3,22	S.P $d_o = 100-160 \mu\text{m}$

Tabela 4. Pregled podataka o hidrauličkim režimima rada pneumatskih reaktora ispitivanih pri katedri za hemijsko inženjerstvo na TMF u Beogradu.

Table 4. Hydrodynamic regimes in air-lift reactors tested in the Department of Chemical Engineering, of the Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade.

Referenca	V_{gs} , m/s	V_{is} , m/s	ϵ_{gr}	$V_{b\infty}$, m/s	d_b , m
Bugarski, 1992., [3]	0,0003–0,006	0,0397–0,1411	0,0025–0,0285	$\approx 0,20$	$\approx 0,001$
Bugarski, 1992., [3]	0,0003–0,006	0,0607–0,2321	0,0027–0,0378	$\approx 0,20$	$\approx 0,001$
Marić, 1996., [20]	0,001–0,007	0,092–0,22	0,0122–0,0278	$\approx 0,20$	$\approx 0,001$
Sajc, 1994., [29]	0,002–0,012	0,0407–0,1052	0,0089–0,034	$\approx 0,23$	$\approx 0,0025$

EKSPERIMENTALNI PODACI

Eksperimentalni podaci obrađeni u ovom radu potiču iz dva izvora. Prvi deo čine podaci do kojih je došla naša grupa istraživača [3, 4, 16, 28 i 29], a drugi veći deo čine literaturno objavljeni podaci od strane raznih autora.

Eksperimentalni podaci do kojih je došla naša grupa istraživača se odnose na pneumatske reaktore sa spoljašnjom recirkulacijom malih zapremina. Ovi reaktori su ispitivani u režimima rada koji odgovaraju laminarnom strujanju. Pregled geometrijskih osobina reaktora i hidrodinamičkih parametara reaktora dat je u tabelama 3 i 4.

Eksperimentalni podaci objavljeni u literaturi i analizirani u ovom radu su pokrili jednu širu oblast različitih uslova rada, kako sa stanovišta geometrijskih osobina reaktora, tako i sa stanovišta hidrodinamičkih parametara reaktora. Svi ovi eksperimenti su bili urađeni za reaktore sa spoljašnjom recirkulacijom pošto smo se u ovom radu ograničili na njihovu analizu. Pregled ovih osobina i hidrodinamičkih parametara reaktora dat je u tabelama 5 i 6.

Tabela 5. Geometrijske osobine analiziranih pneumatskih reaktora iz literature.

Table 5. Geometry of the experimental air-lift reactors reported in the literature.

Referenca	v , m ³	H, m	d_r	m	d_d , m	A_r/A_d	K_f	Tip r. gasa
Merchuk i Stein, 1981., [21]	0,3	4,05	0,14	0,14	1	11,2	PP	0,025
Glennon i sar., 1993., [14]	0,3	3,13	0,225	0,15	2,25	3,5	–	–
Glennon i sar., 1993., [14]	0,055	4	0,1	0,05	4	4	–	–
Verlaan, 1987., [33]	0,165	3,23	0,2	0,1	4	4,62	–	–
Verlaan, 1987., [33]	0,165	3,23	0,2	0,1	4	1,82	–	–
Verlaan, 1987., [33]	0,6	10,5	0,225	0,1	5,06	4,43	–	–
García-Calvo i Leton, 1991., [11]	0,042	2,1	0,1	0,1	1	17,6	S.P.	175 μm
García-Calvo i Leton, 1991., [11]	0,042	2,1	0,1	0,1	1	32	S.P.	175 μm

REZULTATI PROVERE PRIMENLJIVOSTI PREDLOŽENIH JEDNAČINA NA EKSPERIMENTALNIM PODACIMA

Analiza primenljivosti pojedinih jednačina koje su različiti autori predložili za predviđanje udela gasa i brzine tečnosti u pneumatskim reaktorima izvršena je korišćenjem više serija eksperimetalnih podataka navedenih u eksperimetalnom delu.

Jednačine za predviđanje udela gasa

U tabeli 7 dati su rezultati ispitivanja jednačina predloženih od različitih autora za određivanje udela gasa u reaktoru u različitim hidrodinamičkim oblastima rada, pri čemu su u tabeli navedene samo najtačnije.

Analizom rezultata koji su prikazani u tabeli 7 može se primetiti da postoje četiri jednačine koje se mogu primeniti u široj oblasti brzine gasa. To su jednačina zasnovana na bilansu količine kretanja [33]:

$$\epsilon_r = \frac{K_f \cdot V_{sr}^2}{2 \cdot g \cdot H} \cdot \left(\frac{A_r}{A_d} \right)^2 \quad (8)$$

Tabela 6. Hidrodinamički režimi rada analiziranih pneumatskih reaktora iz literature

Table 6. Hydrodynamic regimes of the experimental air-lift reactors reported in the literature

Referenca	V_{gs} , m/s	V_{ls}	m/s	ε_{gr}	$V_{b\infty}$, m/s
Merchuk i Stein, 1981., [21]	0,02–0,18	0,426–0,957	0,03–0,131	–	–
Glennon i sar., 1993., [14]	0,04–0,1	0,451–0,606	0,0583–0,1021	–	–
Glennon i sar., 1993., [14]	0,04–0,1	0,313–0,402	0,0854–0,1333	–	–
Verlaan, 1987., [33]	0,04–0,16	0,2225–0,35	0,0607–0,1327	0,235	$\approx 0,006$
Verlaan, 1987., [33]	0,02–0,175	0,2825–0,5375	0,075–0,1435	0,235	$\approx 0,006$
Verlaan, 1987., [33]	0,02–0,1	0,2469–0,3793	0,0331–0,0959	0,235	$\approx 0,006$
Garcia-Calvo i Leton, 1991., [11]	0,015–0,045	0,293–0,387	0,0265–0,0387	–	–
Garcia-Calvo i Leton, 1991., [11]	0,015–0,045	0,201–0,280	0,0353–0,0858	–	–

Tabela 7. Analiza primenljivosti predloženih jednačina za određivanje udela gasa

Table 7. Analysis of the proposed correlations for gas hold up predictions

Režim rada	Najtačnije jednačine	Srednja greška (%)
$V_{gs} < 0,01$ m/s	1) jednačina bil. količine kretanja, [33] 2) Heijnen i van't Riet, [32] 3) Bello i sar., [1]	6,2 32,9 37,5
$0,01$ m/s $< V_{gs} < 0,05$ m/s	1) jednačina bil. količine kretanja, [33] 2) van der Lans, [32] 3) van der Lans, [32] 4) Bello i sar., [1] 5) Heijnen i van't Riet, [32] 6) Merchuk i Stein, [21] 7) Nicol, [19]	12,3 14,5 15,1 18,0 18,3 18,4 19,3

jednačina Bello-a i saradnika [1]:

$$\varepsilon_r = 0,16 \cdot \left(\frac{V_{gsr}}{V_{lsr}} \right)^{0,57} \cdot \left(1 + \frac{A_d}{A_r} \right) \quad (9)$$

jednačina Merchuka i Steina [21]:

$$\varepsilon_r = \frac{V_{gsr}}{1,03 \cdot (V_{lsr} + V_{gsr}) + 0,33} \quad (10)$$

i jednačina koju je predložio u svom radu van der Lans [32]:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2} \cdot \left\{ 1 + \frac{V_M}{V_S} - \left[\left(1 - \frac{V_M}{V_S} \right)^2 - 4 \cdot \frac{V_{gsr}}{V_S} \right]^{0,5} \right\} \quad (11)$$

gde je:

$$V_M = V_{lsr} + V_{gsr} \quad (12)$$

Jednačine za predviđanje brzine tečnosti

U tabeli 8 dati su rezultati ispitivanja jednačina predloženih od različitih autori za određivanje brzine tečnosti u reaktoru u različitim hidrodinamičkim režimima rada.

Ono što se uopšteno može reći za jednačine koje se mogu naći u literaturi za predviđanje brzine tečnosti u pneumatskim reaktorima jeste da one pokazuju nešto

Tabela 8. Analiza primenljivosti izraza predloženih za određivanje brzine tečnosti

Table 8. Analysis of the proposed correlations for liquid velocity predictions

Režim rada	Najtačnije jednačine	Srednja greška (%)
$V_{gs} < 0,01$ m/s	Glennon i sar., [13] 2) Bello i sar., (za ILR), [1]	15,1 25,0
$0,01$ m/s $< V_{gs} < 0,05$ m/s	1) Bello i sar., (za ELR), [1] 2) Glennon i sar., [13] 3) jednačina bil. količine kretanja, [33] 4) Weiland i Onken, [19] 5) Chisty, (za ILR), [8]	34,1 34,6 35,3 38,2 39,6
$0,05$ m/s $< V_{gs} < 0,10$ m/s	1) jednačina bil. količine kretanja [33] 2) Glennon i sar., [13] 3) Nicol, [19] 4) Merchuk i Stein, [21] 5) Weiland i Onken, [19] 6) Chisty, (za ILR), [8] 7) Bello i sar., (za ELR), [1]	18,8 24,2 25,5 25,6 37,2 39,2 39,9
$V_{gs} > 0,10$ m/s	1) Bello i sar., (za ELR), [1] 2) jednačina bil. količine kretanja, [33] 3) Chisty, (za ILR), [8]	25,5 26,9 38,4

veća odstupanja od eksperimentalnih vrednosti nego što je to slučaj sa jednačinama za udeo gasa. Razlog većeg odstupanja brzina tečnosti određenih preko predloženih jednačina i eksperimentalnih vrednosti je to što je brzina tečnosti u pneumatskim reaktorima uslovljena odnosom pogonske sile (razlika udela gasa u silaznoj i uzlaznoj sekciji) i sile otpora (pad pritiska dvofaznog toka). Od tačnosti sa kojom ove dve sile mogu biti određene zavisi i tačnost modela za određivanje brzine tečnosti. Zato je pri određivanju brzine tečnosti potrebno što je moguće tačnije odrediti vrednosti udela gasa i faktora trenja dvofaznog toka. Naravno da su u praksi ova odstupanja manje ili više izražena, ali kako ona uvek postoje, to je ova dvostruka greška koja se unosi u proračun brzine tečnosti razlog njenog većeg odstupanja

od stvarne vrednosti nego što je to slučaj sa udelom gasa.

Iz tabele 8 može se zaključiti da, kao što je to bio slučaj kod jednačina za udeo gasa, i ovde postoje neke jednačine za koje se može reći da imaju opštu primenljivost u širem opsegu hidrodinamičkih uslova rada. Tako u oblasti homogenog i preobražajnog strujanja pri brzinama gasa koje su manje od 0,1 m/s vidi se da je jednačina predložena od strane Glennon-a i saradnika [13] najprihvatljivije rešenje:

$$V_{sr} = 1,017 \cdot k^{-0,409} \cdot V_{gsr}^{0,42} \text{ za } V_{gsr} < 0,05 \text{ m/s} \quad (12)$$

$$V_{sr} = 0,375 \cdot k^{-0,427} \cdot V_{gsr}^{0,315} \text{ za } V_{gsr} \geq 0,05 \text{ m/s} \quad (13)$$

gde je:

$$k = \frac{K_f}{2 \cdot g \cdot H} \cdot \left(\frac{A_r}{A_d} \right)^2 \quad (14)$$

Takođe je i ovde vrlo primenljiva jednačina zasnovana na bilansu količine kretanja u reaktoru [33] i njena tačnost je pre svega uslovljena tačnošću određivanja koeficijenta ukupnih gubitaka K_f :

$$V_{sr} = \left(\frac{2 \cdot g \cdot H \cdot \epsilon_r}{K_f} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{A_d}{A_r} \right) \quad (15)$$

Zatim je tu i jednačina predložena od strane Weiland-a i Onken-a (1981) [19]:

$$\frac{V_{gsr}}{\epsilon_g} - \frac{V_{sr}}{(1 - \epsilon_g)} = V_{b\infty} \cdot (1 - \epsilon_g)^{1,39} \quad (16)$$

kao i izraz koji je predložio Nicol (1984) [19]:

$$\frac{V_{gsr}}{\epsilon_g} = 1,13 \cdot V_M + 0,28 \text{ za uzlazni deo reaktora} \quad (17)$$

$$\frac{V_{gsr}}{\epsilon_g} = V_M + 0,21 \text{ za silazni deo reaktora} \quad (18)$$

Interesantno je primetiti da su za predviđanje brzine tečnosti u reaktoru posebno pri malim brzinama gasa pogodne jednačine koje su inače predviđene za reaktore sa unutrašnjom recirkulacijom [1, 8], dok su ovde ispitivani reaktori sa spoljašnjom. Moguće objašnjenje ove pojave dato je u radu [24].

Jednačine za predviđanje "slip" brzine

U tabeli 9 dati su rezultati ispitivanja jednačina predloženih od različitih autora za određivanje "slip" brzine u pneumatskim reaktorima.

Ono što se uopšteno može reći za jednačine koje se mogu naći po literaturi za predviđanje "slip" brzine u pneumatskim reaktorima jeste da većina njih predviđa vrednosti koje su oko 0,25 m/s i to je vrednost koja je kod nekih autora preporučena za korišćenje pri proračunima [11]. Ovo je vrednost koja ne odstupa u znatnijoj meri od one koja je određena na osnovu eksperimentalnih rezultata kod većine posmatranih reaktora.

Tabela 9. Analiza primenljivosti izraza predloženih za određivanje "slip" brzine

Table 9. Analysis of the proposed correlations for "slip" velocity predictions

Režim rada	Najtačnije jednačine	Srednja greška (%)
$V_{gs} < 0,01 \text{ m/s}$	1) Towell i sar., [32]	0,6
	2) van der Lans (a), [32]	6,2
	3) van der Lans (b), [32]	6,3
	4) Joshi i sar., [19]	11,6
	5) Wallis, [32]	13,8
	6) Lockett i Kirkpatric, [19]	14,6
	7)* Gomezplata i sar., [32]	32,3
$0,01 \text{ m/s} < V_{gs} < 0,05 \text{ m/s}$	1) Lockett i Kirkpatric, [19]	33,0
	2) Wallis, [32]	33,3
	3) Joshi i sar., [19]	35,1
	4) Garcia-Calvo i sar., [10]	36,4
$0,05 \text{ m/s} < V_{gs} < 0,10 \text{ m/s}$	1) Garcia-Calvo i sar., [10]	30,6
	2) Joshi i sar., [19]	32,3
	3) Zuber i Findlay, ("slug flow"), [34]	37,8
	4) Wallis, [32]	37,9
$V_{gs} > 0,10 \text{ m/s}$	1) Zuber i Findlay, ("slug flow"), [34]	34,4
	2) Joshi i sar., [19]	44,1
	3) Garcia-Calvo i sar., [10]	44,9
* (najbolja jedn. za rezultate Bugarskog, [3])		

Na osnovu analize podataka utvrđeno je da odnos površina silaznog i uzlaznog dela reaktora ima presudan značaj na povećanje vrednosti "slip" brzine [24]. Takođe je utvrđeno da se "slip" brzina znatnije povećava samo kod reaktora čiji je prečnik veći od 0,14 m i koji rade u heterogenom režimu rada kao što su i utvrdili Zuber i Findlay [34].

Ono što se može zaključiti iz rezultata datih u tabeli 9 jeste da je u homogenom režimu rada moguće koristiti veći broj jednačina. Osnovni razlog ovome je to što u homogenom režimu rada vrednost "slip" brzine iznosi oko 0,25 m/s ($\pm 20\%$). Takođe i u heterogenom režimu rada reaktora sa prečnicima manjim od 0,14 m ova brzina se ne menja znatnije. Veća odstupanja od ove vrednosti javljaju se samo kod reaktora većih prečnika od 0,14 m, i kada je odnos površina uzlaznog i silaznog dela reaktora veći od 2,5.

Iz rezultata datih u tabeli 9 se mogu preporučiti kao pogodne za određivanje "slip" brzine sledeće jednačine:

– jednačine predložene od strane van der Lansa, u homogenom režimu rada reaktora [32]:

$$V_s = V_{b\infty} + 0,2 \cdot \frac{V_{sr}}{1 - \epsilon_r} + \frac{V_{gsr}}{2} \quad (a) \quad (19)$$

$$V_s = V_{b\infty} \cdot \left[1 + \frac{\epsilon_r}{1 - \epsilon_r} \right] + 0,2 \cdot \frac{V_M}{1 - \epsilon_r} \quad (b) \quad (20)$$

kao i jednačine preporučene od strane Towella i sar. [32]:

$$V_s = V_{b\infty} + 2 \cdot V_{gsr} \quad (21)$$

i Lockett-a i Kirkpatric-a [19]:

$$V_S = V_{b\infty} \cdot (1 - \varepsilon_g)^{1,39} \cdot (1 + 2,55 \cdot \varepsilon_g^3) \quad (22)$$

– u oblasti homogenog rada reaktora ($V_{gs} < 0,05$ m/s) kao i prelaznog režima ($0,05 < V_{gs} < 0,1$ m/s) i gde odnos površina uzlaznog i silaznog dela reaktora nije veći od 2,5 može se koristiti vrednost za "slip" brzinu od 0,25 m/s.

– i u oblasti heterogenog režima rada pneumatskih reaktora ako reaktor nije većeg prečnika od 0,14 m i kada odnos površina uzlaznog i silaznog dela reaktora nije veći od 2,5 može se koristiti vrednost za "slip" brzinu od 0,25 m/s.

ZAKLJUČAK

U ovom radu je najpre data pregledna analiza uticaja pojedinih parametara pneumatskih reaktora sa recirkulacijom na njihove hidrodinamičke osobine i opisan je uticaj svakog od njih. Ovakav pristup analizi podataka koji su objavljeni po literaturi se pokazao kao neophodan pošto su osim u jednom revijalnom radu [19] oni uglavnom nesređeni ili usmereni samo na pojedine aspekte rada reaktora.

Proverena je tačnost i oblast primenljivosti izabranih, literaturno dostupnih jednačina za predviđanje udela gasa u reaktoru, određivanje brzine tečnosti, kao i "slip" brzine, na većem broju setova eksperimentalnih podataka, radi njihove eventualne primene u projektovanju ovih uređaja.

U svakoj od oblasti rada pneumatskih reaktora su utvrđene jednačine koje daju najtačnije rezultate za određivanje udela gasa, brzine tečnosti i "slip" brzine.

Ovakav analitički pristup objavljenim eksperimentalnim rezultatima i predloženim korelacijama omogućava precizno definisanje uticaja pojedinih parametara u cilju razvoja opštih modela pneumatskih reaktora neophodnih za predviđanje rada reaktora, regulaciju procesa i uvećanje razmera.

SPISAK UPOTREBLJENIH OZNAKA

- A – površina poprečnog preseka (m^2)
- C – konstanta u jednačini (1, m/s)
- d – prečnik (m)
- D – prečnik kolone (m)
- f – faktor trenja (1)
- g – gravitaciona konstanta (m/s^2)
- H – visina reaktora (m)
- k – konstanta reaktora (s^2/m^2)
- K – koeficijent gubitka (1)
- V – brzina kretanja (m/s)

GRČKA SLOVA

- Δ – razlika
- Σ – ukupni zbir, suma
- ε – udeo odgovarajuće faze u ukupnoj zapremini reaktora (1)
- v – konstanta u jednačini (1)
- ρ – gustina odgovarajuće faze (kg/m^3)
- υ – ukupna zapremina reaktora (m^3)
- ω – konstanta u jednačini (1)

INDEKSI

- b – mehura
- d – silazni deo reaktora
- d → r – prelaz iz silaznog u uzlazni deo reaktora
- f – trenja
- g – gasovite faze
- k – za koleno
- l – tečne faze
- M – smeše gas-tečnost
- o – otvora na raspodeljivaču faza
- r – uzlazni deo reaktora
- r → d – prelaz iz uzlaznog u silazni deo reaktora
- s – površinska
- S – "slip" ili međufazna
- 0,1,... – redni broj
- ∞ – u beskonačnom medijumu

LITERATURA

- [1] Bello, R.A., Robinson, C.W., Moo-Young, M., Liquid Circulation and Mixing Characteristics of Airlift Contactors, *Can. J. Chem. Eng.*, **62**, (1984) 573–577
- [2] Bly, M.J., Worden, R.M., Gas Holdup in a Three-Phase Fluidized-Bed Bioreactor, *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **24/25** (1990) 553–564.
- [3] Bugarski, B., Fenomeni prenosa u biorektoru sa imobilisanim biokatalizatorom: eksperiment i teorija, Doktorska disertacija, TMF, Beograd (1992)
- [4] Bugarski, B., King, G.A., Jovanović, G., Daugulis, A.J., Gosen, M.F.A., Performance of an external loop air-lift bioreactor for the production of monoclonal antibodies by immobilized hybridoma cells, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **30** (1989) 264–269.
- [5] Chakravarty, M., Singh, H.D., Baruah, J.N., Iyengar, M.S., Liquid Velocity in Gas – Lift Column, *Indian Chemical Engineer*, **16(3)** (1974) 17–22.
- [6] Chisty, M.Y., Halard, B., Moo-Young, M., Liquid Circulation in Airlift Reactors, *Chem. Eng. Sci.*, **43(3)** (1988) 451–457.
- [7] Chisty, M.Y., and Moo-Young, M., Gas Holdup in Pneumatic Reactors, *Chem. Eng. J.*, **38** (1988) 149–152
- [8] Chisty, M.Y., *Airlift Bioreactors*, Elsevier Applied Science, London–New York (1989)
- [9] Freedman, W., Davidson J.F., Hold-up and Liquid Circulation in Bubble Columns, *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **47** (1969) 251–262.
- [10] Garcia Calvo, E., A Fluid Dynamic Model for Airlift Loop Reactors, *Chem. Eng. Sci.*, **44(11)** (1989) 321–323.
- [11] Garcia Calvo, E., Leton, P., A fluid dynamic model for bubble columns and airlift reactors, *Chem. Eng. Sci.*, **46(11)** (1991) 2947–2951.
- [12] Garcia Calvo, E., Leton, P., Arrany M.A., Prediction of gas holdup and liquid velocity in airlift loop reactors containing highly viscous Newtonian liquids, *Chem. Eng. Sci.*, **46(11)** (1991) 2951–2954.
- [13] Glennon, B., MacLaughlin, P.F., Malone, D.M., Mixing and dispersion studies in an air-lift reactor, *Bioreactor Fluid Dynamics*, 2nd Int. Conf. BHRA R. King, Ed., Elsevier Appl. Sci. Publ., London–New York, N.Y. (1988)
- [14] Glennon, B., Al-Masry, W., MacLaughlin, P.F., Malone, D.M., Hydrodynamic modelling in an air-lift loop reactor, *Chem. Eng. Comm.*, **121** (1993) 183–192.
- [15] Hsu, Y.C., Dudukovic, M.P., Gas Holdup and Liquid Recirculation in Gas-Lift Reactors, *Chem. Eng. Sci.*, **35** (1980) 415–429.
- [16] Ivanović, D., Aksijalna disperzija tečnosti u trofaznom pneumatskom reaktoru sa spoljašnjom recirkulacijom, Diplomski rad, TMF, Beograd (1997)
- [17] Joshi, J.B., Sharma, M.M., A Circulation Cell Model for Bubble Columns, *Trans IChemE*, **57** (1979) 244–251.

- [18] Joshi, J.B., A Mixing in Multiphase Contactors – A Unified Correlation, *Trans IChemE*, **58** (1980) 155–165.
- [19] Joshi, J.B., Ranade, V.V., Gharat, S.D., Lele, S.S., Sparged Loop Reactors, *Can. J. Chem. Eng.*, **68** (1990) 705–741.
- [20] Marić V., Ispitivanje disperzije tečnosti i zapreminskih udelela gasa u trofaznom pneumatskom bioreaktoru, Diplomski rad, TMF, Beograd (1996)
- [21] Merchuk, J.C., Stein, Y., Local Hold-Up and Liquid Velocity in Air-Lift Reactors, *AIChE J.*, **27**(3) (1981) 377–388.
- [22] Merchuk, J.C., Siegel, M.H., Air-Lift Reactors in Chemical and Biological Technology, *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, **41** (1988) 105–120.
- [23] Merchuk, J.C., Why use air-lift bioreactors?, *TIBTECH*, **8** (1990) 66–71.
- [24] Milivojević M., Uticaj hidrodinamičkih parametara na režim rada pneumatskih bioreaktorskih sistema, Magistarski rad, TMF, Beograd (2003)
- [25] Miron, A.S., Camacho, F.G., Gomez, A.C., Grima, E.M., Chisty, Y., Bubble-Column and Airlift Photobioreactors for Algal Culture, *AIChE J.*, **46**(9) (2000) 1872–1887.
- [26] Noreen, A.S., Andrew, J.D., Goosen, M.F.A., Hydrodynamic and Mass Transfer Studies in an External-Loop Air-Lift Bioreactor for Immobilized Animal Cell Culture, *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **73** (1998) 59–77.
- [27] Philip, J., Proctor, J.M., Niranjana, K., Davidson, J.F., Gas Hold-Up and Liquid Circulation in Internal Loop Reactors Containing Highly Viscous Newtonian and Non-Newtonian Liquids, *Chem. Eng. Sci.*, **45**(3) (1990)
- [28] Pržić, D., Određivanje koeficijenta radialne disperzije tečnosti u pneumatskom bioreaktoru sa spoljašnjom recirkulacijom, Diplomski rad, Beograd (1997)
- [29] Sajc, L., Bugarski, B., Vuković, D., Vunjak-Novaković, G., A Four-phase Air Lift Bioreactor with Immobilized Plant Cells, I. Hydrodynamics and Mass Transfer Characteristics, *Biotehnologija* (in Russian), **N8** (1994) 30–41.
- [30] Shah, Y.T., Kelkar, B.G., Godbole, S.P., Deckwer, W.-D., Design Parameters Estimation for Bubble Column Reactor, *AIChE J.*, **28**(3) (1982) 353–379.
- [31] Valentin, F.H.H., Absorption in Gas-Liquid Dispersions: Some Aspects of Bubble Technology, E.&F.N. SPON LTD, London (1967)
- [32] van der Lans, R., Hydrodynamics of a Bubble Column Loop Reactor, Ph. D. Thesis, Delft University (1985)
- [33] Verlaan, P., Modelling and Characterization of an Airlift-Loop Bioreactor, Wageningen (1987)
- [34] Zuber, N., Findlay, J.A., Average Volumetric Concentration in Two Phase Flow Systems, *ASME J. Heat Trans.*, **87** (1965) 453–468.

SUMMARY

ANALYSIS OF THE HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF EXTERNAL LOOP AIR LIFT BIOREACTORS

(Review paper)

Milan M. Milivojević, Aleksandar P. Duduković, Bojana M. Obradović, Aleksandar M. Spasić, Branko M. Bugarski
Faculty of Technology and Metallurgy, Karnegijeva 4, Belgrade

In this study we analyzed the effects of the hydrodynamic conditions and properties of the working fluid on the operation of external loop air lift bioreactors. In particular, the effects of design and operating parameters (e.g. reactor geometry, design of the gas sparger, superficial gas velocity, flow regime) as well as the fluid properties (liquid viscosity and addition of surfactants) on the liquid superficial velocity and gas hold-up were defined. Several correlations found in the literature based on theoretical models of fluid flow, as well as several semi-empirical and empirical correlations were tested and the applicability of all the proposed correlations was verified on the available experimental data. The most accurate correlations for the prediction of the gas hold up, liquid circulation velocity and slip velocity in each bioreactor operating regime were identified.

Key words: Air lift reactors • Hydrodynamic • Gas hold up correlations • Liquid velocity correlations • Slip velocity correlations • Ključne reči: Pneumatski bioreaktori • Hidrodinamika • Jednačine za zadržavanje gasa • Jednačine za brzinu tečnosti • Jednačine za "slip" brzinu •