

LJUBIŠA S. VASIĆ¹
IVANA B. BANKOVIĆ-ILIĆ¹
MIODRAG L. LAZIĆ¹
VLADA B. VELJKOVIĆ¹
DEJAN U. SKALA²

¹Tehnološki fakultet,
Leskovac

²Tehnološko-metalurški
fakultet, Beograd

NAUČNI RAD

621.929.4:542.7:66.040.47

SADRŽAJ GASA U KOLONI SA VIBRACIONOM MEŠALICOM PREČNIKA 16,6 cm

U ovom radu ispitan je uticaj operativnih uslova (intenzitet vibracije i protok gasa) i osobina tečne faze na sadržaj gasa u slučaju dvofaznog (gas-tečnost) sistema u koloni sa vibracionom mešalicom prečnika 16,6 cm. Kao tečna faza korišćeni su destilovana voda i vodení rastvori karboksimetilceluloze različite koncentracije, a kao gasovita faza vazduh. Izvedena je empirijska korelacija za proračun sadržaja gasa koja povezuje sadržaj gasa sa specifičnom ukupnom snagom mešanja i prividnom brzinom strujanja gasa, nezavisno od prečnika kolone.

Kolona sa vibracionom mešalicom (KVM) predstavlja kontaktni uređaj u kome se, predajom relativno male eksterne energije sistemu koji se meša, postiže uniformna raspodela veličine mehura gasa, smanjeno povratno mešanje, kao i velika specifična međufazna površina. Pored promene pritiska na dnu kolone, snage mešanja i veličine mehura gasa, sadržaj gasa je važna hidrodinamička karakteristika KVM. Obimna istraživanja sa dvofaznim i trofaznim sistemima pokazala su da sadržaj gasa zavisi od operativnih uslova (intenzitet vibracije, definisan kao proizvod amplitude i frekvencije vibracije, i prividne brzine strujanja gasa), prisustva i udela čvrste faze, geometrije vibracione mešalice i osobina faza [1–15].

Povećanjem intenziteta vibracije, u oblasti malih intenziteta vibracije, sadržaj gasa u KVM se neznatno smanjuje [1–3] ili ostaje skoro nepromenjen [4–6, 12]. Ovo je posledica koalescencije i zadržavanja mehura gasa u neposrednoj blizini pločice, usled superponiranja brzine mehura gasa i mešalice. Daljim povećanjem intenziteta vibracije, sadržaj gasa se naglo povećava kao posledica sprečene koalescencije mehura smicajnim silama usled intenzivnijeg mešanja i povećanog otpora strujanju gasa kroz otvore pločica [3]. Prividna brzina strujanja gasa ima, takođe, jak uticaj na sadržaj gasa, koji se povećava proporcionalno povećanju prividne brzine strujanja gasa do 3 cm/s [1–3, 5, 7, 12–15].

Ispitivanja trofaznih sistema u KVM pokazala su da prisustvo čvrstih čestica utiče na dispergovanje mehura. Sadržaj gasa je veći u trofaznom nego u dvofaznom sistemu, pri istim operativnim uslovima [10, 12–15]. Kada se u međuprostorima između perforiranih pločica povećava udeo sfernih čestica prečnika 8,3 mm do 6,6 % vol. [12], odnosno, Rašigovih prstenova do 3,2 % vol. [13, 15], sa-

držaj gasa se povećava, zbog doprinosa čvrstih čestica sitnjenju mehura. Pri većem udelu čvrste faze, kretanje kuglica u prostoru između pločica je ograničeno zbog malog slobodnog prostora, zbog čega je, naročito pri većim protocima gasa, onemogućeno sitnjenje mehura, pa se sadržaj gasa smanjuje [12].

Povećanje broja perforiranih pločica vibracione mešalice utiče na povećanje sadržaja gasa, zbog smanjenog prečnika mehura i većeg otpora kretanju mehura [3, 5, 8]. Povećanje slobodne površine pločice doprinosi smanjenju sadržaja gasa, bez obzira na to da li je u međuprostorima prisutna čvrsta faza ili ne zbog favorizovanja koalescencije mehura usled smanjenja snage upotrebljene za mešanje disperzije i otpora strujanju mehura gasa u otvorima pločica [14, 15].

O uticaju osobina tečnosti na sadržaj gasa u KVM ima malo podataka u literaturi. Pokazano je da je u slučaju nenjutnovskih rastvora karboksimetilceluloze (CMC) sadržaj gasa manji kada je rastvor CMC veće koncentracije i molske mase, zbog favorizovanja koalescencije u rastvorima veće pseudoplastičnosti tj. veće viskoznosti [10].

Dosadašnja istraživanja hidrodinamičkih i masenoprenosnih karakteristika KVM na Tehnološkom fakultetu u Leskovcu sprovedena su u reaktorima prečnika 2,54 i 9,2 cm. U ovom radu ispitan je sadržaj gasa u KVM prečnika 16,6 cm ispunjenoj vodom i vodenim rastvorima natrijumove soli karboksimetilceluloze različite koncentracije, pri različitim operativnim uslovima. Vodení rastvori CMC su korišćeni kao modeli fermentacionih tečnosti iz procesa biosinteze ekstraćelijskih polisaharida, u kojima se reološko ponašanje podloge menja u toku vremena.

Cilj rada je sagledavanje uticaja operativnih uslova (intenzitet vibracije i prividna brzina strujanja gasa) na sadržaj gasa dvofaznog sistema gas-tečnost u zavisnosti od reoloških osobina tečne faze. Takođe, izvođenjem empirijske korelacije, kao u slučaju klasičnih sudova sa mešalicom, sadržaj gasa bi bio povezan sa snagom mešanja i prividnom brzinom strujanja gasa. Uporednom analizom podataka u kolonama različitih prečnika, učinjen je korak napred u cilju procene mogućnosti izvođenja postupka povećanja razmere ovog tipa višefaznog reaktora.

*Rad je saopšten na VI Simpozijumu "Savremene tehnologije i privredni razvoj", Leskovac, Oktobar 21–22, 2005

Adresa autora: I. Banković-ilić, Tehnološki fakultet, Leskovac, Univerzitet u Nišu, Bulevar oslobođenja 124, 16000 Leskovac, Srbija i Crna Gora

Rad primljen: Septembar 12, 2005

Rad prihvaćen: Oktobar 3, 2005

EKSPERIMENTALNI DEO

Eksperimentalno postrojenje, čiji se šematski prikaz naveden u radovima [10,13], čini kolona (prečnik 16,6 cm) sa vibracionom mešalicom Karr-ovog tipa (15 pločica sa otvorima prečnika – spoljašnji/unutrašnji 8/8 mm i udelom slobodne površine 46,6%). Rastojanje između pločica vibracione mešalice je 5 cm, radna zapremina kolone 20,87 dm³ i radna visina kolone 97 cm. Amplituda kretanja mešalice od 2,35 cm je bila fiksna u svim eksperimentima, dok je frekvencija menjana u opsegu do 6 Hz pomoću trofaznog frekventnog regulatora (Yaskawa, Model VS-606V7). Kao gasna faza u svim eksperimentima korišćen je vazduh, koji je iz kompresora, preko regulacionog ventila (srednja vrednost pritiska 200 mbar), dispergovan na dnu kolone preko četiri distributora gasa (unutrašnji prečnik 1,5 mm). Protok vazduha meren je rotametrom, a prividne brzine strujanja gasa iznosile su 0,5, 1,0 i 1,5 cm/s. Kao tečna faza, šaržnog uređenja, korišćena je destilovana voda (njutnovski fluid) i vodeni rastvori karboksimetilceluloze (Lucel, Lučane, Srbija), stepena polimerizacije 500, koncentracije 0,5% i 1% (nenjutnovski fluid). Rastvori se odlikuju pseudoplastičnim karakteristikama; reološke osobine su ispitane pomoću rotacionog viskozimetra (Haake Roto-visko RV 20) na 20°C (tabela 1). Sadržaj gasa je određivan posle zaustavljanja protoka gasa i rada mešalice i izračunavan je kao odnos zapremine zadržanog gasa i zapremine disperzije gas-tečnost:

$$\varepsilon_g = \frac{V_g}{V_d} = \frac{kH_g}{V_d} \quad (1)$$

gde su: H_g – visina praznog dela kolone posle zaustavljanja gasa i mešalice i k – konstanta određena eksperimentalno, na osnovu zavisnosti visine praznog dela kolone i ispuštene zapremine tečnosti iz kolone.

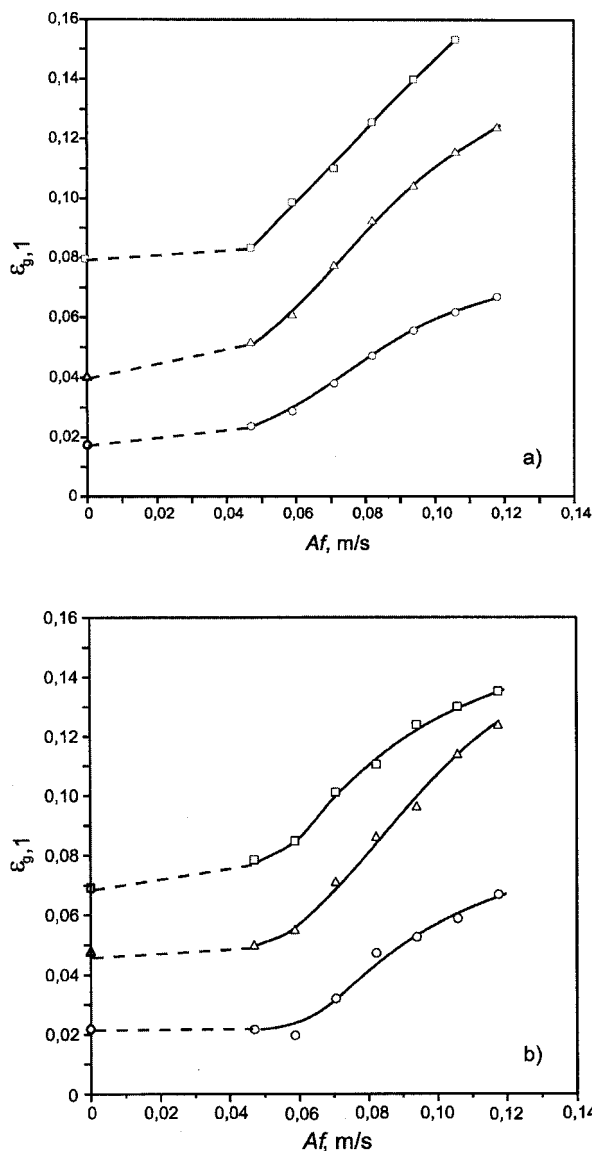
REZULTATI I DISKUSIJA

Uticaj operativnih uslova

Zavisnost sadržaja gasa od intenziteta vibracije i prividne brzine strujanja gasa prikazana je na slikama 1 i 2. Nezavisno od reoloških osobina tečnosti, sa povećanjem intenziteta vibracije iznad 4,5 cm/s, sadržaj gasa se povećava pri određenoj prividnoj brzini strujanja gasa (slika 1a i b), kao posledica uticaja mešanja na dispergovanje gasa smicajnim silama. U ovoj oblasti disperzija mehura je homogena u svim sistemima. U oblasti intenziteta vibracije manjih od 4,5 cm/s nisu vršena merenja

Tabela 1. Fizičke osobine tečne faze
Table 1. Physical properties of liquid phase

Tečnost	Gustina kg/m ³	Indeks toka –	Koeficijent konzistencije mPas
Voda	998	1	1
0,5 % rastvor CMC	1002,7	0,88	0,0313
1 % rastvor CMC	1004,3	0,72	0,2253



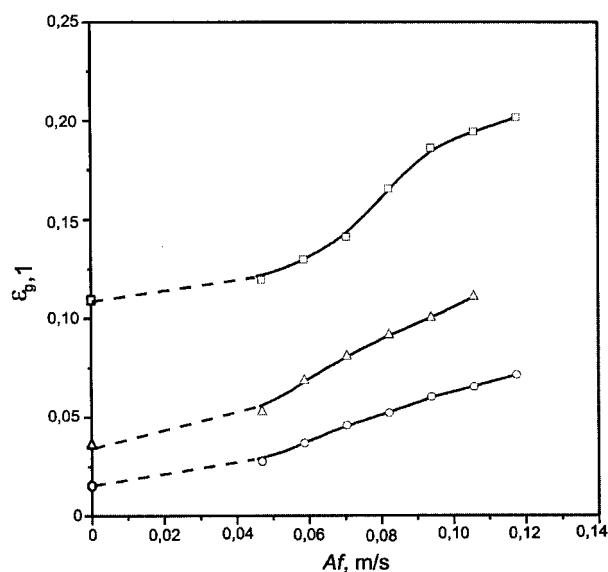
Slika 1. Uticaj intenziteta vibracije i prividne brzine strujanja gasa na sadržaj gasa a) destilovana voda b) 1% rastvor CMC (u_g , cm/s: krug–0,5; trougao–1,0; kvadrat – 1,5)

Figure 1. The effect of vibration speed and superficial gas velocity on gas holdup a) distilled water b) 1% CMC solution (u_g , cm/s: circle – 0.5; triangle – 1.0; square – 1.5)

sadržaja gasa, pa se ne može ništa reći da li sadržaj gasa opada ili ostaje nepromenjen sa povećanjem intenziteta vibracije (prikazano isprekidanim linijama). Minimum karakterističan za prelaz iz segregirane u homogenu disperziju je ranije uočen u koloni manjeg prečnika [9,12].

Povećanje protoka gasa, pri nepromenjenom intenzitetu vibracije, utiče na povećanje otpora njegovom proticanju kroz otvore pločica. Kao rezultat boljeg dispergovanja gasa na račun veće energije gasne struje, povećava se sadržaj gasa (slika 1a i b).

Uticaj reoloških osobina tečnosti na sadržaj gasa prikazan je na slici 2. Poznato je da čiste tečnosti pro-

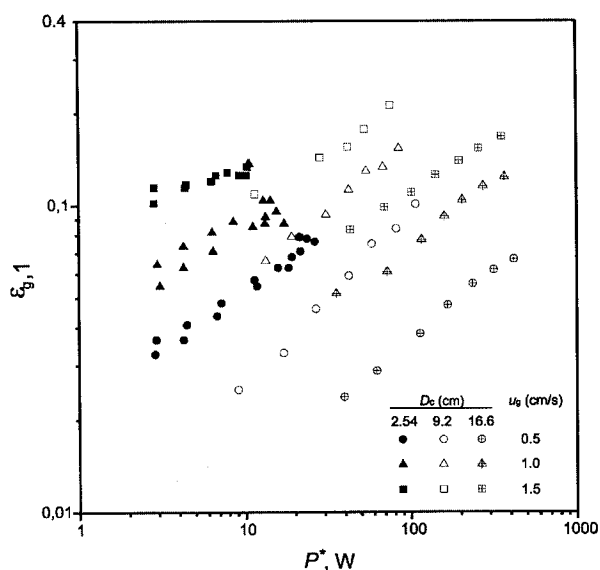


Slika 2. Uticaj reoloških osobina tečnosti na sadržaj gasa (u_g , cm/s: 0,5; krug–destilovana voda; trougao–0,5% CMC; kvadrat – 1% CMC)

Figure 2. The effect of liquid rheological properties on gas holdup (u_g , cm/s: 0.5; circle – distilled water; triangle– 0.5% CMC solution; square – 1% CMC solution)

movišu koalescenciju mehurica, a da prisustvo rastvorenih supstanci inhibira koalescenciju [16]. Pri istim ostalim operativnim uslovima, najmanji sadržaj gasa uočen je u slučaju destilovane vode, a najveći u slučaju 1%-nog rastvora CMC. Takođe, sa povećanjem koncentracije CMC, sadržaj gasa se povećava, što je posledica veće viskoznosti rastvora.

Na slici 3 prikazana je zavisnost sadržaja gasa od ukupne snage mešanja u slučaju KVM različitog prečnika



Slika 3. Zavisnost sadržaja gasa od ukupne snage mešanja (tečnost: destilovana voda)

Figure 3. Dependence of gas holdup on the total power consumption (liquid phase: distilled water)

ka kada je tečna faza voda. Povećanjem snage mešanja povećava se sadržaj gasa, nezavisno od prečnika KVM. Takođe, pri istoj eksternoj snazi i prividnoj brzini strujanja gasa, sadržaj gasa je veći u koloni manjeg prečnika, zbog efikasnijeg dispergovanja mehurica većim brojem pločica.

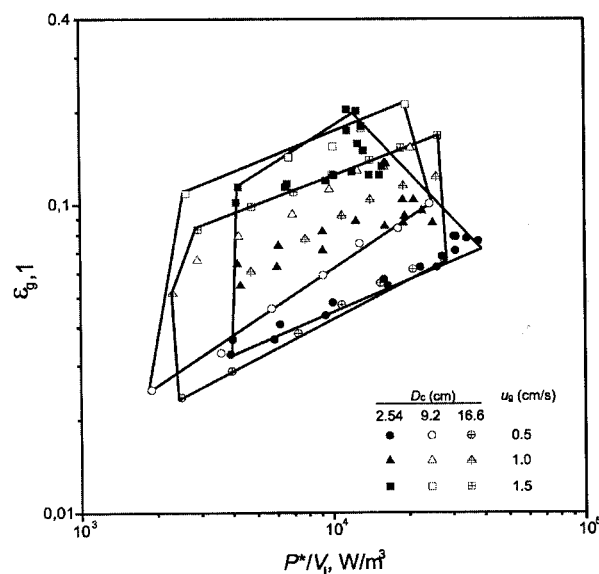
Korelacije za sadržaj gasa

Za izračunavanje sadržaja gasa u višefaznim reaktorima se obično koriste korelacije sa snagom mešanja i prividnom brzinom strujanja gasa, kao što je uobičajeno za sudove sa mešalicom. U slučaju KVM, to je već pokazano u slučaju dvofaznog [9,17] i trofaznog sistema [10,11,13,15], korišćenjem ukupne ili srednje snage mešanja. Međutim, da bi se podaci dobijeni u KVM različitog prečnika mogli porediti, neophodno je koristiti specifičnu snagu mešanja kao parametar proračuna. Ranije je pokazano da se u KVM prečnika 2,54 i 9,2 cm postiže približno isti sadržaj gasa pri konstantnoj prividnoj brzini strujanja gasa [9,11]. Poređenjem sadržaja gasa za KVM prečnika 16,6 cm sa podacima za KVM manjih prečnika (slika 4) pokazano je da se, pri istoj specifičnoj snazi mešanja i prividnoj brzini strujanja gasa u tri KVM sličnih geometrijskih karakteristika postiže približno isti sadržaj gasa.

Sadržaj gasa u dvofaznom sistemu vazduh–voda može se korelisati jednačinom (2), nezavisno od prečnika KVM:

$$\varepsilon_g = 0.267 \cdot \left(\frac{P^*}{V_t} \right)^{0.353} \cdot (u_g)^{0.939} \quad (2)$$

(relativno odstupanje između izračunatih i eksperimentalnih podataka $\pm 13\%$, 58 podataka). Vrednost ukupne snage mešanja izračunata je na osnovu empirijske kore-



Slika 4. Zavisnost sadržaja gasa od specifične ukupne snage mešanja (tečnost: destilovana voda)

Figure 4. Dependence of gas holdup on the specific total power consumption (liquid phase: distilled water)

lacije, koja povezuje snagu mešanja sa trećim stepenom intenziteta vibracije [9]. Na osnovu eksponenata jednačine (2) zaključuje se da energija koju vibraciona mešalica sa velikom slobodnom površinom predaje disperziji manje utiče na dispergovanje gasnih mehura od energije toka gasa, kao što je i ranije sugerisano [11]. Ova empirijska korelacija od praktičnog je značaja, zbog olakšanog postupka povećanja razmera ovog tipa uređaja.

ZAKLJUČAK

Sa povećanjem intenziteta vibracije i prividne brzine strujanja gasa sadržaj gasa dvofaznog sistema se povećava, nezavisno od osobina tečne faze. Nenjutnovski rastvori pokazuju veći sadržaj gasa u odnosu na tečnost njutnovskog ponašanja. Povećanje koncentracije rastvora dovodi do povećanja sadržaja gasa. Sadržaj gasa u vodi približno je isti u KVM različitog prečnika, pri istoj specifičnoj snazi mešanja. Izvedena empirijska korelacija za proračun sadržaja gasa povezuje sadržaj gasa sa snagom mešanja i prividnom brzinom strujanja gasa i pokazuje da na sadržaj gasa veći uticaj ima aeracija nego mešanje.

Napomena

Rad je realizovan u okviru projekta ev. br. MNT 101456, koji finansira Ministarstvo za nauku i zaštitu životne sredine Republike Srbije.

Spisak oznaka

A_f	– intenzitet vibracije, m/s
D_c	– prečnik kolone, cm
ε_g	– sadržaj gasa, l
H_g	– visina praznog dela kolone posle zaustavljanja protoka gasa, cm
P^*	– ukupna snaga mešanja, W
u_g	– prividna brzina strujanja gasa, m/s
V_g	– zapremina gasa, m ³

V_l	– zapremina tečnosti, m ³
V_d	– zapremina disperzije, m ³

LITERATURA

- [1] M. Lounes, J. Thibault, Can. J. Chem. Eng. **71** (1993) 497–506
- [2] I. Banković-Ilić, V. Veljković, M. Lazić, D. Skala, Chem. Eng. Comm. **134** (1995) 17–32
- [3] V.B. Veljković, D.U. Skala, Can. J. Chem. Eng. **64** (1986) 906–914
- [4] J. Boyle, doktorska disertacija, Univ. New Brunswick, Canada (1975)
- [5] N.V. Rama Rao, M.H.I. Baird, Can. J. Chem. Eng. **66** (1988) 211–221
- [6] N.S. Yang, Z.Q. Shen, B.H. Chen, A.F. Mc Millan, Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev. **25** (1986) 660–664
- [7] A. Sundaresan, Y.B.G. Varma, Can. J. Chem. Eng. **68** (1990) 560–568
- [8] H.G. Gomaa, J. Landau, A.M. Al Taweel, Can. J. Chem. Eng. **69** (1991) 228–239
- [9] I.B. Banković-Ilić, doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Tehnološki fakultet, Leskovac (1999)
- [10] O.S. Naseva, I.S. Stamenković, I.B. Banković-Ilić, M. Lazić, V.B. Veljković, D.U. Skala, Procesna tehnika, **18** (1) (2002) 179–182
- [11] I.B. Banković-Ilić, M.L. Lazić, V.B. Veljković, D.U. Skala, Procesna tehnika, **16** (2–3) (2000) 21–24
- [12] D.U. Skala, V.B. Veljković, M. Janjić, M.L. Lazić, I.B. Banković-Ilić, Can. J. Chem. Eng. **71** (1993) 817
- [13] M.Đ. Aleksić, V.B. Veljković, I.B. Banković-Ilić, M.L. Lazić, D.U. Skala, Can. J. Chem. Eng. **80** (2002) 485–490
- [14] I.B. Banković-Ilić, I.S. Stamenković, O.S. Stamenković, M.L. Lazić, V.B. Veljković, D.U. Skala, 18th congress of Chemists and Technologists of Macedonia, Ohrid (2004)
- [15] M.Đ. Aleksić, I.B. Banković-Ilić, M.L. Lazić, V.B. Veljković, D.U. Skala, 16th International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA, Prague, Czech Republic CD ROM of Full Text 0755.pdf (2004)
- [16] D. Petrović, doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet, Novi Sad (1989)
- [17] D.U. Skala i V.B. Veljković, 9th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA, Prague (1987)

SUMMARY

GAS-HOLDUP in a 16.6 cm i.d. RECIPROCATING PLATE COLUMN

(Scientific paper)

Ljubiša S. Vasić¹, Ivana B. Banković-Ilić¹, Miodrag L. Lazić¹, Vlada B. Veljković¹, Dejan U. Skala²

¹Faculty of Technology, Leskovac

²Faculty of Technology and Metallurgy, Beograd

The effects of operation conditions (the vibration intensity and gas flow rate) on the gas holdup in a 16.6 cm i.d. two-phase reciprocating plate column (RPC) were studied. Distilled water and aqueous solutions of carboxymethylcellulose of different concentration were used as the liquid phase and air as the gas phase in this investigation. The gas holdup was measured after the gas flow and the reciprocating action had been stopped. An empirical correlation which correlates the gas holdup with the specific power consumption and the superficial gas velocity showed that the aeration intensity had a greater influence on the gas holdup than the intensity of agitation. Because the gas holdup was approximately the same in RPC's of different diameters, an equation relating the gas holdup with the specific power consumption and the superficial gas velocity was derived. The correlation could be used in the scaling up of reciprocating plate columns.

Key words: Reciprocating plate column • Gas holdup • Carboxymethylcellulose •

Ključne reči: Kolona s vibracionom mešalicom • Sadržaj gasa • Karboksimetilceluloza •