

MIRKO Đ. ALEKSIĆ<sup>1</sup>  
VLADA B. VELJKOVIĆ<sup>2</sup>  
IVANA B. BANKOVIĆ-ILIĆ<sup>2</sup>  
MIODRAG L. LAZIĆ<sup>2</sup>  
DEJAN U. SKALA<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Viša poljoprivredno–prehrambena škola, Prokuplje

<sup>2</sup> Tehnološki fakultet, Leskovac

<sup>3</sup> Tehnološko–metalurški fakultet, Beograd

NAUČNI RAD

66.023+621.929.4:536.246

## UTICAJ RAŠIGOVIH PRSTENOVA I REOLOŠKIH OSOBINA TEČNOSTI NA PROMENU PRITISKA NA DNU KOLONE SA VIBRACIONOM MEŠALICOM

*U radu se analiziraju srednja i ukupna promena pritiska na dnu kolone sa vibracionom mešalicom u zavisnosti od intenziteta vibracije i udela čvrste faze, prividne brzine strujanja gasa i reoloških karakteristika tečnosti. Promena pritiska na dnu kolone je posebno analizirana kod nenjutnovskih, odnosno njutnovskih tečnosti pri istim uslovima rada kolone.*

Poslednjih decenija, u cilju smanjenja potrošnje energije i povećanja brzine međufaznog prenosa mase, ispitivani su različiti tipovi višefaznih reaktora kolonskog tipa. Pored barbotажne kolone i "air–lift" reaktora, značajno mesto u ovoj grupi reaktora zauzima kolona sa vibracionom mešalicom (KVM), posebno sa aspekta njene primene u hemijskoj industriji, obradi otpadnih voda, biotehnologiji, farmaceutskoj industriji i hidrometalurgiji.

Istraživanja hidrodinamičkih i maseno–prenosnih karakteristika KVM sa jednofaznim [1–3] i dvofaznim [4–16] sistemima su obimna, dok su istraživanja sa trofaznim sistemima gas–tečnost–čvrsta faza malobrojna [12, 17–23]. Kao čvrste čestice u sprovedenim istraživanjima korišćene su sfere [17–23] ili Rašigovi prstenovi od stakla [12] ili aluminijuma [24].

Hidrodinamičke karakteristike trofaznih sistema su ispitivane u kolonama prečnika 2,54 i 9,2 cm, uz korišćenje sfera od polipropilena (prečnika 8,3 mm) kao čvrste faze. Promena pritiska na dnu kolone, snaga mešanja i sadržaj gasa u trofaznom sistemu veći su nego u dvofaznom sistemu [17–19, 22, 23]. Zapreminski koeficijent prenosa mase i specifična međufazna površina su, takođe, veći u trofaznom sistemu, pri istim ostalim uslovima [20–22]. Empirijske korelacije za promenu pritiska na dnu KVM, koje su date u tabeli 1, pokazuju da ukupna i srednja promena pritiska na dnu kolone zavise od intenziteta vibracije (proizvod amplitude i frekvencije vibracije), sadržaja gasa, broja i geometrije pločica i fizičkih osobina tečnosti.

U prisustvu Rašigovih prstenova (prečnika 10 mm), pri koncentraciji čvrste faze od 2,5 % vol, zapreminski koeficijent prenosa mase i specifična međufazna površina veće su u odnosu na sistem gas–tečnost [12]. Sadržaj gasa u KVM sa vodom povećava se, takođe, u prisustvu Rašigovih prstenova (prečnika 0,8 cm) u opse-

Tabela 1. Empirijske korelacije za promenu pritiska na dnu KVM

Table 1. Empirical correlation for the pressure drop at the column bottom

Sistem	Korelacija	Referen.
Jednofazni ("čista" tečnost)	$\Delta p^* = 0,113 n_p \rho_l (Af)^2$ $\Delta p_{sr} = 0,0317 n_p \rho_l (Af)^2$	[19]
Dvofazni (gas–tečnost)	$\Delta p^* = 0,0647 n_p \rho_l (Af)^2 (1 - \epsilon_g)$ $\Delta p_{sr} = 0,0176 n_p \rho_l (Af)^2 (1 - \epsilon_g)$ $\Delta p_{sr} - \Delta p_{sr,o} = 375,4 u_g^{-0,62} (2Af)$	[19] [6]
Dvofazni (tečnost–čvrsta faza)	$\Delta p^* = 0,279 n_p \rho_l (Af)^2$ $\Delta p_{sr} = 0,066 n_p \rho_l (Af)^2$	[18]

gu udela čvrste faze do 3,2 % vol. [24]. Rašigovi prstenovi su efikasniji u dispergovanju gasne faze od sfera, obezbeđujući veći sadržaj gasa pri istim radnim uslovima [24].

U ovom radu izvršena su istraživanja promene pritiska na dnu KVM, ispunjene njutnovskom (destilovana voda) ili nenjutnovskom (vodeni rastvor natrijumove soli karboksimetilceluloze, CMC, koncentracije 1 %) tečnošću, u prisustvu Rašigovih prstenova od aluminijuma (prečnika 0,8 cm), koji su smešteni u međuprostore između pločica (udeo čvrste faze: do 3,2 % vol.). Cilj rada je bio sagledavanje uticaja operativnih uslova (intenzitet vibracije i prividna brzina strujanja gasa) na promenu pritiska na dnu kolone u zavisnosti od udela čvrste faze i reoloških osobina tečne faze. Korišćenjem tečnosti sa pseudo–plastičnim osobinama, kao modela nenjutnovskih fermentacionih tečnosti, učinjen je pomak u razumevanju hidrodinamičkih osobina ovog tipa višefaznog reaktora.

### EKSPERIMENTALNI DEO

Ekperimentalna ispitivanja su izvršena u KVM tipa Karr; šematski prikaz postrojenja se može naći na drugom mestu [23]. Geometrijske karakteristike kolone i

Adresa autora: M. Aleksić, Ul. Laze Lazarevića 3, 18400 Prokuplje  
Rad primljen: Avgust 18, 2002.  
Rad prihvaćen: Oktobar 21, 2002.

Tabela 2. Geometrijske karakteristike eksperimentalnog postrojenja

Table 2. Geometrical characteristics of the experimental set-up

Geometrijska karakteristika	
Unutrašnji prečnik kolone (cm)	9,20
Ukupna visina kolone (cm)	105
Radna zapremina kolone (cm <sup>3</sup> )	56
Broj pločica	15
Prečnik pločice (cm)	9,0
Prečnik otvora pločice (nominalna vrednost) (cm)	0,8
Debljina pločice (cm)	0,1
Udeo slobodne površine pločice (%)	45,4
Odstojanje između susednih pločica (cm)	5
Prečnik i visina Rašigovog prstena (nominalna vrednost) (cm)	0,8
Debljina zida Rašigovog prstena (cm)	0,1

pločica date su u tabeli 2. Set perforiranih pločica (od aluminijuma), fiksiran na zajedničkom nosaču (od nerđajućeg čelika) kreće se, pomoću elektromotora i ekscentra, povratno-periodično kroz kolonu od pleksiglasa. Pločice su međusobno odvojene graničnicima od teflona. U međuprostore između perforiranih pločica umešten je određen broj Rašigovih prstenova (8, 20, 40 ili 74 po međuprostoru, što odgovara zapreminskom udelu čvrste faze od 0,35, 0,87, 1,74 ili 3,2 %, respektivno). Amplituda (polovina rastojanja između krajnjih položaja na putu koji pređe pločica u jednom ciklusu) povratno-periodičnog kretanja vibracione mešalice je 2,35 cm, dok je frekvencija varirana u opsegu do 6 s<sup>-1</sup>. Frekvencija je merena infracrvenim optoelektronskim brojačem (Laser, Leskovac).

Promena pritiska na dnu kolone je merena pomoću relativnog pretvarača pritiska (Model TPr – 100.05, IHTM, Beograd), opsega od –50 do 50 kPa. Pretvarač pritiska je pričvršćen u nivou dna kolone i preko pojačivača i A/D konvertora povezan za kompjuter. Srednja promena pritiska je izračunavana integriranjem trenutne promene pritiska na dnu kolone u jednom ciklusu kretanja vibracione mešalice:

$$\Delta p_{sr} = \frac{1}{t} \int_0^t \Delta p dt \quad (1)$$

dok je ukupna promena pritiska izračunavana kao zbir maksimalnih vrednosti promene pritiska pri kretanju mešalice ka dnu i vrhu kolone:

$$\Delta p^* = \Delta p_d + |\Delta p_v| \quad (2)$$

Kao gasna faza korišćen je vazduh sobne temperature. Konstantan pritisak vazduha (oko 170 kPa) na ulazu u postrojenje postiže se pomoću regulacionog ventila. Protok vazduha je regulisan pomoću igličastog

ventila, a meren rotametrom; statički pritisak gasa neposredno ispred ulaza u rotametar je meren digitalnim manometrom. Elektroventilom, koji se nalazi na ulazu u kolonu, otvara se i zatvara dovod vazduha u kolonu. Prividna brzina strujanja gasa kroz kolonu je 0,5, 1,0 i 1,5 cm/s.

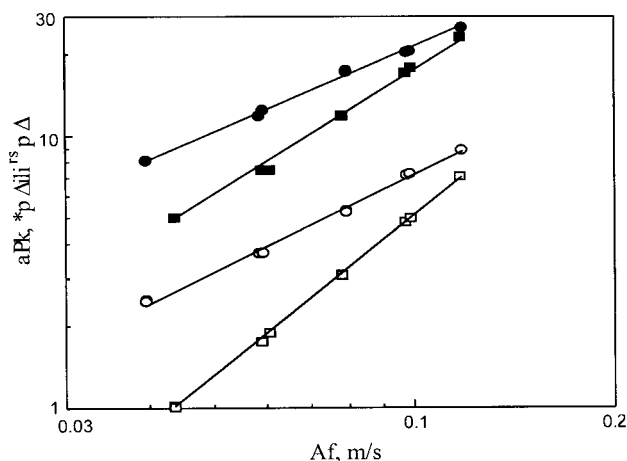
Kao tečna faza korišćene su destilovana voda i vodeni rastvor CMC (PP 1000, "Lucel", Lučani), koncentracije 1%. Reološke osobine rastvora CMC (koeficijent konzistencije: 3,44 Pa.s<sup>n</sup>; indeks toka: 0,46) ispitane su pomoću rotacionog viskozimetra (Haake Rotovisko RV 100) [23].

## REZULTATI I DISKUSIJA

Na slici 1 prikazana je zavisnost srednje i ukupne promene pritiska na dnu kolone od intenziteta vibracije u log-log koordinatnom sistemu, kada je kolona ispunjena "čistom" tečnošću. Promena pritiska na dnu kolone zavisi od reoloških osobina tečne faze. Pri istim radnim uslovima, vrednosti srednje i ukupne promene pritiska na dnu kolone veće su u slučaju viskozne nenjutnovske tečnosti (1% rastvor CMC), kao posledica intenzivnijeg trenja između tečnosti i pločica vibracione mešalice. Eksperimentalni podaci grupišu se oko pravih linija, nezavisno od vrste tečnosti, tako da se zavisnosti između srednje i ukupne promene pritiska na dnu kolone i intenziteta vibracije mogu predstaviti sledećom jednačinom:

$$\Delta p_{sr} \text{ ili } \Delta p^* = k (Af)^n (1 - \varepsilon_g) \quad (3)$$

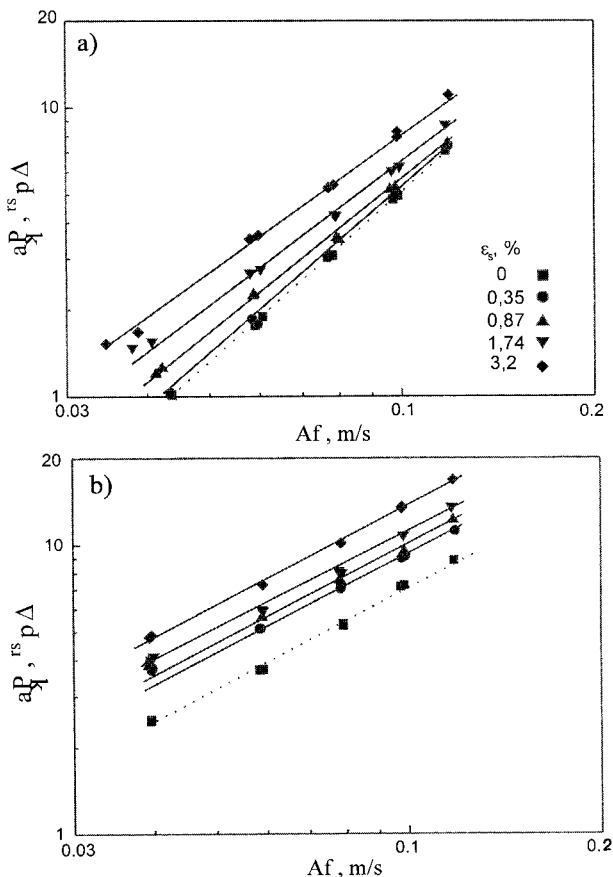
pri čemu je sadržaj gasa u slučaju "čiste" tečnosti jednak nuli ( $\varepsilon_g = 0$ ). Vrednosti parametara jednačine (3), izračunate metodom najmanjih kvadrata, date su u tabeli 3. U slučaju njutnovske tečnosti (destilovana voda) srednja



Slika 1. Zavisnost srednje i ukupne promene pritiska na dnu kolone sa "čistom" tečnošću od intenziteta vibracije (destilovana voda – kvadrat; rastvor CMC – krug;  $\Delta p_{sr}$  – "prazni" simboli;  $\Delta p^*$  – "puni" simboli)

Figure 1. Dependence of the average and total pressure drop at the bottom of the column filled with a "pure" liquid on the vibration speed (distilled water – squares; CMC solution – circles;  $\Delta p_{sr}$  – open symbols;  $\Delta p^*$  – black symbols)





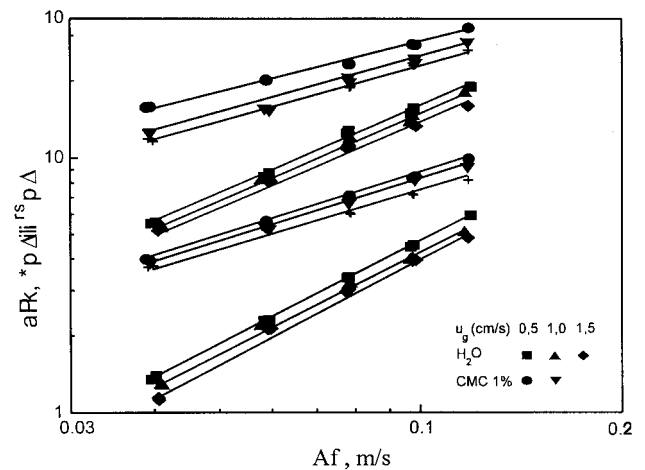
Slika 3. Zavisnost srednje promene pritiska na dnu kolone od intenziteta vibracije za dvofazne (tečnost-čvrsta faza) sisteme pri različitim udelima čvrste faze: a) destilovana voda i b) vodeni rastvor CMC koncentracije 1 % ( $\epsilon_s$ , %: 0 – kvadrat, 0,35 – krug, 0,87 – trougao, 1,74 – obrnuti trougao i 3,2 – romb)

Figure 3. Dependence of the average pressure drop at the column bottom on the vibration speed for the liquid–solid systems at different contents of solid phase: a) distilled water and b) 1% CMC solution ( $\epsilon_s$ , %: 0 – squares, 0.35 – circles, 0.87 – up triangles, 1.74 – down triangles, and 3.2 – diamonds)

% vol. Promena pritiska na dnu kolone se smanjuje sa povećanjem prividne brzine strujanja gasa, zbog smanjene frikционе interakcije u sistemu, što je rezultat povećanog sadržaja gasa. Vrednost eksponenta jednačine (3) smanjuje se sa povećanjem prividne brzine strujanja gasa i udela čvrste faze i manja je nego u sistemima "čista" tečnost, gas–tečnost i tečnost–čvrsta faza.

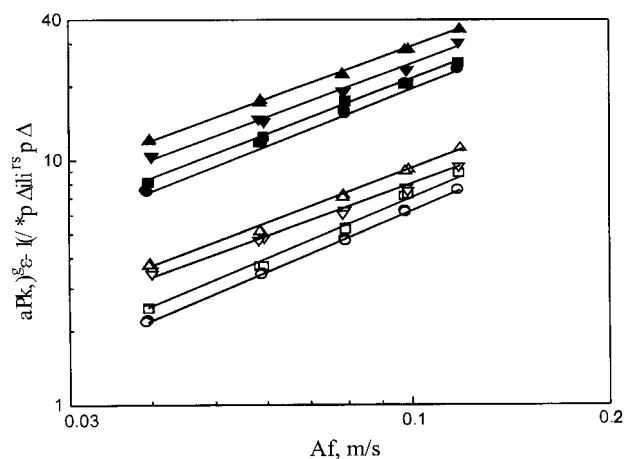
Poređenje promene pritiska u različitim sistemima: "čista" tečnost, gas–tečnost, tečnost–čvrsta faza i gas–tečnost–čvrsta faza u slučaju rastvora CMC izvršeno je na slici 5. Uticajem na frikcionu interakciju u sistemu, čvrsta faza uslovljava povećanje, a gasna faza – smanjenje promene pritiska na dnu kolone.

Na slici 6 može se analizirati uticaj vrste čvrstih čestica – sfere (prečnika 8,3 mm) [22] i Rašigovi prstenovi (prečnika i visine po 8 mm) – na promenu pritiska na dnu kolone ispunjene vodom, pri približno istom udelu čvrste faze (sfere: 3,8 % vol.; Rašigovi prstenovi: 3,2



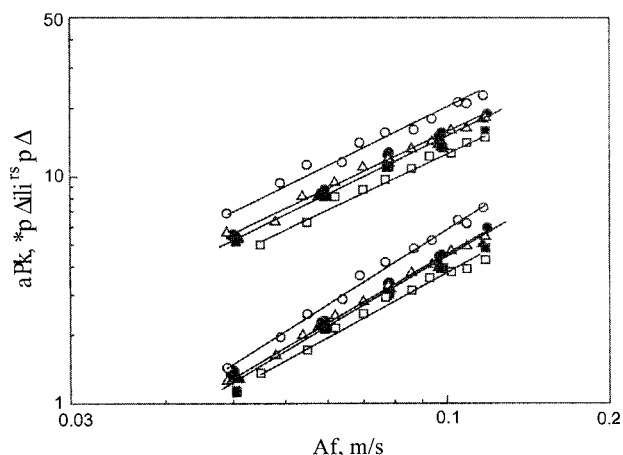
Slika 4. Zavisnost srednje i ukupne promene pritiska na dnu kolone od intenziteta vibracije i prividne brzine strujanja gasa, za trofazne sisteme gas–tečnost–čvrsta faza, pri udelu čvrste faze 3,2 % vol. (destilovana voda:  $u_g = 0,5$  cm/s – kvadrat,  $u_g = 1,0$  cm/s – trougao, i  $u_g = 1,5$  cm/s – romb; vodeni rastvor CMC:  $u_g = 0,5$  cm/s – krug,  $u_g = 1,0$  cm/s – obrnuti trougao i  $u_g = 1,5$  cm/s – krst;  $\Delta p_{sr}$  – "prazni" simboli;  $\Delta p^*$  – "punni" simboli)

Figure 4. Dependence of the average and total pressure drop at the column bottom on the vibration speed for the gas–liquid–solid systems at a solid phase content of 3.2 % by volume (distilled water:  $u_g = 0.5$  cm/s – squares,  $u_g = 1.0$  cm/s – triangles, and  $u_g = 1.5$  cm/s – diamonds; CMC solution:  $u_g = 0.5$  cm/s – circles,  $u_g = 1.0$  cm/s – down triangles, and  $u_g = 1.5$  cm/s – crosses;  $\Delta p_{sr}$  – open symbols;  $\Delta p^*$  – black symbols)



Slika 5. Poređenje promene pritiska na dnu kolone sa različitim sistemima (tečnost: vodeni rastvor CMC, 1 %; čista tečnost: kvadrat; gas–tečnost,  $u_g = 0,5$  cm/s: krug; tečnost–čvrsta faza,  $\epsilon_s = 0,35$  % vol.: trougao; gas–tečnost–čvrsta faza,  $u_g = 0,5$  cm/s i  $\epsilon_s = 0,35$  % vol.: obrnuti trougao;  $\Delta p_{sr}$  – "prazni" simboli;  $\Delta p^*$  – "punni" simboli)

Figure 5. Comparison of the pressure drop at the column bottom for different systems (liquid phase: 1% CMC solution; pure liquid: squares; gas–liquid,  $u_g = 0.5$  cm/s: – circles; liquid–solid,  $\epsilon_s = 0.35$  % by volume: – up triangles; gas–liquid–solid,  $u_g = 0.5$  cm/s and  $\epsilon_s = 0.35$  % by volume: – down triangles;  $\Delta p_{sr}$  – open symbols;  $\Delta p^*$  – black symbols)



Slika 6. Zavisnost srednje i ukupne promene pritiska na dnu kolone sa trofaznim sistemima od intenziteta vibracije pri različitim prividnim brzinama strujanja gasa (tečnost: destilovana voda;  $u_g$ , cm/s: 0,5 – krug; 1,0 – trougao i 1,5 – kvadrat; sfere – "prazni" simboli; Rašigovi prstenovi – "pun")

Figure 6. Dependence of the average and total pressure drop at the column bottom on the vibration speed for the gas-liquid-solid systems at different superficial gas velocities (liquid phase: distilled water;  $u_g$ , cm/s: 0.5 – circles; 1.0 – up triangles; 1.5 – squares; spheres – open symbols; Rashig rings – black symbols)

% vol.) i istoj prividnoj brzini strujanja gasa. Zapaža se da se promena pritiska smanjuje sa povećanjem prividne brzine strujanja gasa, pri nepromenjenom intenzitetu vibracije. Ovaj uticaj protoka gasa očigledan je u slučaju prisustva polipropilenskih sfera, dok su u prisustvu Rašigovih prstenova u koloni razlike u promeni pritiska male. Interesantno je da je pri najmanjoj prividnoj brzini strujanja gasa promena pritiska na dnu kolone veća u prisustvu sfera nego Rašigovih prstenova, dok je obrnuto pri najvećoj prividnoj brzini strujanja gasa. Uticaj različite vrste čvrstih čestica na promenu pritiska na dnu KVM u slučaju rastvora CMC nije bilo moguće porediti, jer su u dva istraživanja korišćeni rastvori CMC različitih proizvođača i različitih reoloških osobina.

## ZAKLJUČAK

Srednja i ukupna promena pritiska na dnu kolone se povećavaju sa povećanjem intenziteta vibracije i udele čvrste faze, dok se smanjuju sa povećanjem prividne brzine strujanja gasa, nezavisno od vrste tečnosti. Promena pritiska na dnu kolone veća je u slučaju nenjutnovske nego u slučaju njutnovske tečnosti, pri ostalim istim operativnim uslovima, kao rezultat intenzivnije frikcione interakcije. U slučaju trofaznog sistema, promena pritiska na dnu kolone se povećava sa povećanjem intenziteta vibracije i udele čvrste faze (tj. broja prstenova po međuprostoru između pločica), a smanjuje sa povećanjem prividne brzine strujanja gasa.

## SPISAK OZNAKA

A – amplituda vibracije

Af – intenzitet vibracije, m/s

f – frekvencija, Hz

$n_p$  – broj pločica mešalice

p – trenutni pritisak na dnu kolone, Pa

$\Delta p$  – trenutna promena pritiska na dnu kolone, Pa

$\Delta p_{sr}$  – srednja promena pritiska na dnu kolone, Pa

$\Delta p_d$  – promena pritiska pri kretanju vibracione mešalice ka dnu kolone, Pa

$\Delta p_v$  – promena pritiska pri kretanju vibracione mešalice ka vrhu kolone, Pa

$\Delta p^*$  – ukupna promena pritiska na dnu kolone, Pa

$\Delta p_{sr,o}$  – srednja promena pritiska dvofaznog (gas-tečnost) sistema pri stacionarnim uslovima, Pa

r – koeficijent linearne korelacije

t – vreme, s

$u_g$  – prividna brzina strujanja gasa, m/s

## GRČKA SLOVA

$\epsilon_g$  – sadržaj gasa

$\epsilon_s$  – udeo čvrste faze

$\rho_t$  – gustina tečne faze

## LITERATURA

- [1] M.M. Hafez, J. Prochazka, Chem. Eng. Sci. **29** (1974) 1745.
- [2] M.M. Hafez, J. Prochazka, Chem. Eng. Sci. **29** (1974) 1755
- [3] M. M. Hafez, M.H.I. Baird, Trans. Chem. Eng. **56** (1978) 229.
- [4] N.V. Rama Rao, M.H.I. Baird, Can. J. Chem. Eng. **64** (1986) 42.
- [5] V.B. Veljković, D.U. Skala, Can. J. Chem. Eng. **64** (1986) 906.
- [6] N.S. Yang, Z.Q. Shen, B.H. Chen, A.F. McMillan, Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev. **25** (1986) 660.
- [7] N.V. Rama Rao, M.H.I. Baird, Can. J. Chem. Eng. **66** (1988) 211.
- [8] M.H.I. Baird, N.V. Rama Rao, Can. J. Chem. Eng. **66** (1988) 222.
- [9] D. Skala, V. Veljković, Can. J. Chem. Eng. **66** (1988) 192.
- [10] V. Veljković, D. Skala, Can. J. Chem. Eng. **66** (1988) 200.
- [11] A. Sundaresan, Y.B.G. Varma, Can. J. Chem. Eng. **68** (1990) 560.
- [12] A. Sundaresan, Y.B.G. Varma, Can. J. Chem. Eng. **68** (1990) 951.
- [13] H.G. Gomma, J. Landau, A.M. Al Tawel, Can. J. Chem. Eng. **69** (1991) 228.
- [14] M. Lounes, J. Thibault, Can. J. Chem. Eng. **71** (1993) 497.
- [15] M. Lounes, J. Thibault, Chem. Eng. Comm. **127** (1994) 169.
- [16] I.B. Banković-Ilić, V.B. Veljković, M.L. Lazić, D.U. Skala, Chem. Eng. Comm. **134** (1995) 17.
- [17] D.U. Skala, V.B. Veljković, V. Janjić, M.L. Lazić, I.B. Banković-Ilić, Can. J. Chem. Eng. **71** (1993) 817.
- [18] I. Banković-Ilić, V. Veljković, M. Lazić, D. Skala, 12th Congres CHISA, Prague, (1996), paper E4.27.
- [19] I. Banković-Ilić, V. Veljković, M. Lazić, D. Skala, 12th Congres CHISA, Prague, (1996), paper P3.89.
- [20] I.B. Banković-Ilić, V.B. Veljković, M.L. Lazić, D.U. Skala, Hem. ind. **55** (2001) 376.

- [21] I.B. Banković-Ilić, V.B. Veljković, M.L. Lazić, D.U. Skala, Hem. ind. **55** (2001) 383.
- [22] I. Banković-Ilić, doktorska disertacija, Tehnološki fakultet, Leskovac, 1999.
- [23] O.S. Naseva, I.S. Stamenković, I.B. Banković-Ilić, M.L. Lazić, V.B. Veljković, D.U. Skala, Hem. ind. **56** (2002) 198.
- [24] M. Aleksić, V.B. Veljković, I.B. Banković-Ilić, M.L. Lazić, D.U. Skala, Can. J. Chem. Eng. **80** (2002), u štampi

## SUMMARY

### THE INFLUENCE OF RASHIG RINGS AND THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF THE LIQUID PHASE ON THE PRESSURE DROP AT THE BOTTOM OF A RECIPROCATING PLATE COLUMN

(Scientific paper)

Mirko Dj. Aleksić<sup>1</sup>, Vlada B. Veljković<sup>2</sup>, Ivana B. Banković-Ilić<sup>2</sup>, Miodrag L. Lazić<sup>2</sup>, Dejan U. Skala<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Junior College of Agriculture and Food Engineering, Prokuplje

<sup>2</sup>Faculty of Technology, Leskovac

<sup>3</sup>Faculty of Technology and Metallurgy, Belgrade

The pressure drop at the column bottom, filled with a Newtonian (distilled water) or non-Newtonian (aqueous solution of carboxymethylcellulose, sodium salt, CMC, 1 %) liquid, in the presence of Rashig rings, made of aluminum (0.8 cm in diameter), regularly distributed in the interplate spaces (volume content of the solid phase: up to 3.2 %) was studied. The average and total pressure drop at the column bottom increased with increasing vibration speed and content of the solid particles, but decreased with increasing superficial gas velocity, independently of the rheological properties of the liquid phase. The pressure drop at the column bottom filled with the non-Newtonian liquid was found to be higher than that in the case of distilled water.

Key words: Reciprocating plate column • Pressure drop at the column bottom • Rashig rings • Non-Newtonian liquid •

Ključne reči: Kolona sa vibracionom mešalicom • Vibraciona kolona • Promena pritiska na dnu • Rašigovi prsteni • Nenjutnoske tečnosti •

