

Određivanje zapreminskog koeficijenta prenosa mase ozona u barbotажnoj koloni sa dvofluidnom mlaznicom

Milica Đeković Šević¹, Nevenka Bošković-Vragolović², Ljiljana Takić³, Radmila Garić-Grulović⁴, Srđan Pejanović²

¹Visoka tehnološka škola strukovnih studija, Aranđelovac, Srbija

²Tehnološko–metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija

³Tehnološki fakultet u Leskovcu, Univerzitet u Nišu, Leskovac, Srbija

⁴Institut za Hemiju, Tehnologiju i Metalurgiju, Centar za Katalizu i Hemijsko inženjerstvo, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija

Izvod

U ovom radu prikazani su rezultati eksperimentalnih ispitivanja prenosa mase gas–tečnost pri ozonizaciji vode u barbotажnoj koloni sa dvofluidnom mlaznicom (BKDM) pod različitim operativnim uslovima. Cilj ovih ispitivanja bio je određivanje vrednosti zapreminskog koeficijenta prenosa mase ozona u vodi, $k_L a$, u mirnoj zoni kolone, pri različitim protocima gasne i tečne faze. U radu je dato i poređenje $k_L a$ u BKDM sa vrednostima $k_L a$ u klasičnoj protivstrujnoj barbotажnoj koloni sa poroznom pločom tj. fritom. Eksperimentalno je određena vrednost kritičnog protoka tečnosti, pri kojem sadržaj gasa u disperziji, u mirnoj zoni kolone, dostiže svoju maksimalnu vrednost. Rezultati su pokazali da se pri kritičnom protoku tečnosti dobija maksimalna vrednost zapreminskog koeficijenta prenosa mase ozona u vodi.

Ključne reči: zapreminski koeficijent prenosa mase, barbotажna kolona sa dvofluidnom mlaznicom, ozon.

Dostupno na Internetu sa adrese časopisa: <http://www.ache.org.rs/HI/>

Danas, po svom izboru, ne živimo na mestima gde je najbolja voda za piće, već u gradovima gde je čiste vode sve manje. Zbog toga gradska postrojenja za dobijanje pijaće vode moraju koristiti čitav niz različitih postupaka prečišćavanja sirove vode, uključujući predozonizaciju i glavnu ozonizaciju. Gasoviti ozon je jako oksidaciono sredstvo i veoma brzo reaguje sa većinom neorganskih i organskih jedinjenja, mikroorganizmima i virusima prisutnim u vodenoj sredini. Ozon je i efikasno dezinfekciono sredstvo u širokom opsegu pH vrednosti i temperature, pri čemu vodi ne daje nikakav miris ili ukus [1,2].

Dezinfekcija vode za piće ozonom je proces koji se uglavnom izvodi u barbotажnim kontaktorima [3–6]. Veliki broj autora je radio na usavršavanju i preciznijem i detaljnijem definisanju klasično korišćenih barbotажnih uređaja [3–11], kao i na istraživanju i razvoju novih tipova reaktora [2,12–15], a sve sa ciljem da se ne upotrebi mehaničko mešanje, a da se intenzitet mešanja i brzina prenosa mase unapredi u odnosu na klasične barbotажne kolone.

1979. godine ukazano je na mogućnost korišćenja različitih tipova dvofluidnih mlaznica pri kontaktu gasa i tečnosti (ejektor, injektor, Venturi mlaznice, mlazni

aeratori) [16]. Korišćenjem ovih mlaznica intenzivira se mešanje i prenos mase u odnosu na klasične barbotажne kolone i to bez mehaničkog mešanja. S obzirom da se gas uvodi kroz jedan otvor nema potrebe za dispergovanjem gasa kroz poroznu ploču. Zajedničko za sve pomenute mlaznice je da se za dispergovanje gasa koristi kinetička energija tečnosti.

Ideja da se intenzivno mešanje, odnosno kinetička energija tečnog mlaza iskoristi za dispergovanje gasnih mehurova, realizovana je kod nas nekoliko godina kasnije, a prvi rezultati saopšteni su 1981. godine [17]. Iste godine tehničko rešenje BKDM je prijavljeno kao patent [18].

Istraživanja obavljena na BKDM specijalne konstrukcije [18], pokazala su da pri određenim operativnim uslovima (dovoljno velikom protoku tečnosti-iznad neke kritične vrednosti L_c , za definisan protok gasa) u koloni obrazuju dve različite zone [19]. Donja, turbulentna zona formira se u blizini dvofluidne mlaznice i okarakterisana je intenzivnim mešanjem i prekidanjem gasnih mehurova, dok se iznad nje pa do vrha kolone nalazi mirna zona. U mirnoj zoni prisutni su sitni mehurovi gasa u disperziji, koji su približno uniformne veličine i vizuelna slika toka u njoj podseća na strujnu sliku u klasičnim barbotажnim kolonama sa poroznom pločom kao raspodeljivačem gasa. Konstatovano je da se mirna zona BKDM u svemu ponaša slično istostrujnoj barbotажnoj koloni sa poroznom pločom kao raspodeljivačem gasa. Nasuprot tome, hidrodinamičko ponašanje turbu-

NAUČNI RAD

UDK 628.166.094.3-926.214:66

Hem. Ind. 69 (5) 553–559 (2015)

doi: 10.2298/HEMIND140716075D

Preписка: M. Đeković Šević, Visoka tehnološka škola strukovnih studija, Aranđelovac, Srbija.

E-pošta: milicadjekovicsevic@yahoo.com

Rad primljen: 16. jul, 2014

Rad prihvaćen: 2. oktobar, 2014

lentne zone BKDM slično je ponašanju u aeratoru sa mehaničkim mešanjem [17].

Iako su do sada publikovana brojna istraživanja apsorpcije ozona u vodi, najveći broj rezultata se odnosi na ispitivanja u dva osnovna-klasična tipa barbotажnih kontaktora, barbotажnoj koloni i reaktoru sa mehaničkim mešanjem. Apsorpcija ozona u vodi i vodenim rastvorima u BKDM do sada nije opisana u literaturi.

Cilj eksperimenata u ovom radu je da se utvrdi mogućnost primene BKDM za izvođenje procesa gas-tečnost, umesto klasično korišćenih uređaja za ovu svrhu, ukoliko se pokaže da se u njoj mogu ostvariti slične ili veće vrednosti zapreminskih koeficienata prenosa mase.

Teorijski pristup

Da bi se odredila brzina apsorpcije gasa potrebno je poznavati vrednost zapreminskog koeficijenta prenosa mase $k_L a$ ili odvojeno vrednosti koeficijenta prenosa mase i specifične površine kontakta faza. S obzirom na strujne uslove u koloni na koeficijent prenosa mase se ne može bitno uticati, tako da je veličina koja dominantno određuje brzinu prenosa mase upravo specifična međufazna površina.

Specifična površina kontakta u laminarnom toku u mirnoj zoni kolone funkcija je sadržaja gasa u disperziji, ε_G , i srednjeg prečnika mehura, d_{BS} :

$$a = \frac{6\varepsilon_G}{d_{BS}} \quad (1)$$

prema kojoj je jasno zbog čega je potrebno ostvariti formiranje sitnijih mehurova i većeg sadržaja gasa u disperziji.

U literaturi je konstatovana zavisnost sadržaja gasa u disperziji od protoka tečne faze u mirnoj zoni BKDM, pri apsorpciji kiseonika iz vazduha u vodi [19]. Porast sadržaja gasa u disperziji sa povećanjem protoka tečnosti do kritične vrednosti protoka tečnosti L_c pripisuje se usitnjavanju gasnih mehurova zbog intenziviranja turbulencije u turbulentnoj zoni BKDM, pri povećanju protoka tečnosti. Sitniji mehurovi imaju manju brzinu dizanja, što dovodi do povećanja sadržaja gasa u disperziji prema izrazu [20]:

$$\varepsilon_G = \frac{W_G}{W_D} = \frac{W_G}{W_D^0 + \frac{U_L}{1 - \varepsilon_G}} \quad (2)$$

U literaturi je pokazano da mehurovi prečnika 2–5 mm imaju konstantnu brzinu dizanja, W_D , koja iznosi 26,5 cm/s, što se pripisuje „cik-cak“ kretanju mehurova kroz tečnost, a da porast veličine mehurova iznad 5 mm izaziva porast njihove brzine dizanja [21]. Na osnovu prethodnog zapažanja i zabeleženog ponašanja sadržaja gasa u disperziji pri promeni protoka tečne faze u

mirnoj zoni BKDM, može se zaključiti da su primarni mehurovi, koji se formiraju na izlazu iz dovodne cevi za gas, prečnika znatno većeg od 5 mm.

Povećanje protoka tečnosti izaziva njihovo prekidanje i usitnjavanje i smanjenje brzine dizanja, sve do protoka tečnosti koji obezbeđuje da su svi mehurovi prečnika većeg od 5 mm prekinuti. Taj protok odgovara kritičnom protoku tečnosti, L_c , pri kojem se dostiže maksimalna vrednost sadržaja gasa u disperziji. Porast protoka tečnosti iznad L_c nije svrsishodan jer, iako se prekidanje mehurova nastavlja, ne dolazi do smanjenja brzine dizanja, W_D , a raste brzina tečnosti, što dovodi do smanjenja sadržaja gasa u disperziji. Specifična površina kontakta se praktično ne menja, a značajno raste pad pritiska na mlaznici, pa i potrebna snaga za obavljanje procesa.

Prenos mase iz gasne u tečnu fazu određen je vrednošću zapreminskog koeficijenta prenosa mase $k_L a$, što znači da je sem specifične međufazne površine kontakta bitna i vrednost koeficijenta prenosa mase, k_L . Predložena su dva izraza za određivanje k_L [22]:

$$k_L = 0,31(gv_L)^{1/3} \left(\frac{D_A}{v_L} \right)^{2/3} \quad (3)$$

$$k_L = 0,42(gv_L)^{1/3} \left(\frac{D_A}{v_L} \right)^{1/2} \quad (4)$$

Jednačina (3) se odnosi na jako sitne mehurove koji se hidrodinamički ponašaju kao krute sfere, a jednačina (4) na veće mehurove sa pokretnim površinama.

Zapreminski koeficijent prenosa mase ozona iz smeše sa kiseonikom određuje se na osnovu opšte diferencijalne jednačine prenosa mase u aksijalnom pravcu:

$$U_L \frac{\partial c_L}{\partial z} + \frac{\partial c_L}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 c_L}{\partial z^2} + k_L a (c_L^* - c_L) \quad (5)$$

Kod protočnog sistema bez recirkulacije tečnosti proticanje je stacionarno ($\partial c / \partial \tau = 0$), a disperzioni član:

$$D \frac{\partial^2 c_L}{\partial z^2} \ll U_L \frac{dc_L}{dz}$$

kod kolona čija je visina znatno veća od prečnika ($Hc > 4Dc$), pa opšta diferencijalna jednačina prenosa mase dobija sledeći oblik:

$$U_L \frac{dc_L}{dz} = k_L a (c_L^* - c_L) \quad (6)$$

odakle je zapreminski koeficijent prenosa mase:

$$k_L a = \frac{U_L \frac{dc_L}{dz}}{(c_L^* - c_L)} \quad (7)$$

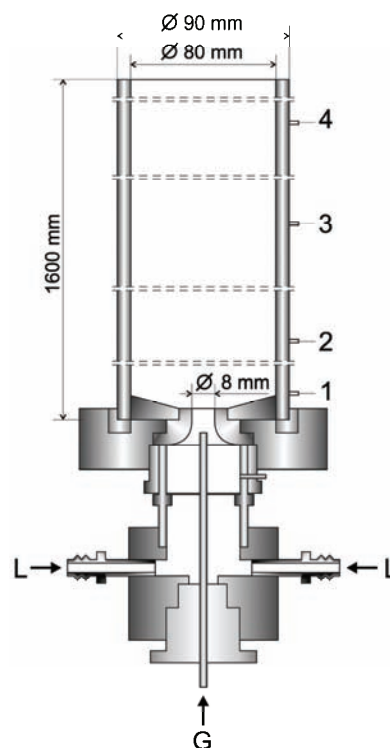
EKSPERIMENTALNI DEO

Šema eksperimentalnog sistema korišćenog u ovom radu prikazana je na slici 1.

Kao ulazni gas korišćen je čist kiseonik tako da dodatna priprema (kompresija, hlađenje, filtracija, sušenje gasa) nije bila neophodna. Za generisanje ozona korišćen je OzoneLab OL100/DS ozonizator, koji radi na principu tihog (korona) električnog pražnjenja. Promenljiva frekvencija pražnjenja (0–10 kHz) omogućila je generisanje ozona u širokom opsegu koncentracija sa velikom preciznošću. Koncentracija nastalog ozona je nezavisno regulisana sa dva („R“ i „L“) desetopoložajna preklopnika, pomoću kojih se menjala frekvencija pražnjenja. Gas je dovođen kroz jedan otvor (cev) unutrašnjeg prečnika 3 mm.

Voda i ozon su uvođeni na dno kolone, pa se protok faza odvijao istostrujno naviše, dok je na vrhu kolone bio postavljen preliv koji je obezbeđivao da kolona radi kao stacionarni protočni sistem. Eksperimenti su vršeni u BKDM unutrašnjeg prečnika 80 mm i visine 1,6 m sa dvofluidnom mlaznicom prečnika 8 mm, u koju se uvode i gasna i tečna faza. Šematski prikaz BKDM prikazan je na slici 2.

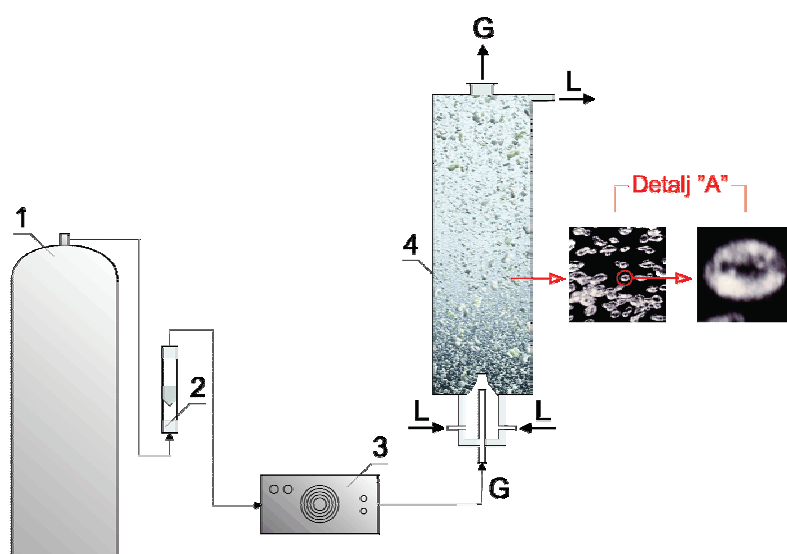
Uzorci vode sa ozonom su uzimani sa četiri merna mesta na visinama 30, 50, 90, 139 cm (slika 2 pozicije 1–4) od dna kolone. Za određivanje zapreminskog koeficijenta prenosa mase korišćena su dva protoka tečne faze i to 180 i 360 L/h. Prva vrednost je daleko ispod kritičnog protoka i pri njoj prekidanje i dispergovanje primarnih mehurova gasa tek počinje, a druga je nešto iznad kritičnog protoka tečnosti, čime se obezbeđuje da su svi mehurovi prečnika većeg od 5 mm sigurno prekinuti. Izabrani protoci gasne faze iznosili su



Slika 2. Barbotazna kolona sa dvofluidnom mlaznicom (BKDM).

Figure 2. Bubble column with two-fluid nozzle gas distributor.

45, 60 i 120 L/h. Korišćenje većih protoka gasa nije bilo moguće zbog ograničenog opsega merenja instrumenta za merenje koncentracije rastvorenog ozona. Svaka od šest mogućih kombinacija protoka tečnosti i gasa urađena je pri dve vrednosti položaja preklopnika R i L na generatoru ozona, dakle pri dve različite vrednosti koncentracije ozona u ulaznom gasu. Sadržaj gasa u disper-



Slika 1. Šema eksperimentalnog sistema (1 – boca sa kiseonikom, 2 – rotametar, 3 – generator ozona i 4 – barbotazna kolona sa dvofluidnom mlaznicom).

Figure 1. Experimental apparatus (1 – oxygen bomb, 2 – rotameter, 3 – ozone generator and 4 – column).

ziji i srednji prečnik mehurova gasa određeni su samo pri protoku gasa od 120 L/h. Eksperimenti su izvođeni na temperaturi vode od 15,5 °C kojoj odgovara vrednost koeficijenta rastvorljivosti ozona od 0,285 [7]. Sve vrednosti izmerenih protoka vazduha preračunate su na normalne uslove pritiska i temperature (101,32 kPa, 0 °C).

Sadržaj gasa u disperziji određivan je manometarskom metodom. Na mernim mestima BKDM postavljene su piezometarske cevi, a sadržaj gasa u disperziji u pojedinim segmentima kolone između mernih mesta određivana je preko razlike visine nivoa disperzije u koloni i visine nivoa vode u piezometarskim cevima (H_G):

$$\varepsilon_G = \frac{H_G}{z} \quad (8)$$

Sauterov srednji prečnik mehura određivan je fotografskom metodom. Disperzija gas-tečnost fotografisana je kroz providne zidove kolone pri različitim operativnim uslovima. Konstatovano je da su mehurovi oblika spljoštene sfere, a da je projekcija na fotografijama oblika elipse (slika 1, detalj A). Dobijeni snimci analizirani su merenjem osa projekcije mehura sa fotografije, za najmanje 50 mehurova. Iz izmerenih vrednosti određene su stvarne dužine velike i male poluose elipse, a i b , deljenjem izmerenih vrednosti osa sa faktorom uveličanja fotografije i sa dva jer su u pitanju poluose. Sauterov srednji prečnik mehura određivan je zatim preko izraza:

$$d_{BS} = \frac{\sum_{i=1}^n d_{B3i}^3}{\sum_{i=1}^n d_{B2i}^2} \quad (9)$$

pri čemu se d_{B3i}^3 i d_{B2i}^2 računaju po izrazima:

$$d_{B3i}^3 = 2b_i(3a_i^2 + b_i^2) \quad (10)$$

$$d_{B2i}^2 = 2(a_i^2 + b_i^2) \quad (11)$$

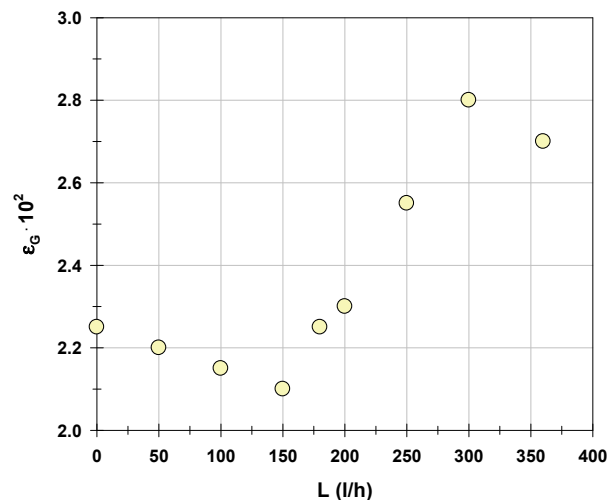
Specifična površina kontakta određivana je iz izraza (1).

Aktuelna koncentracija ozona u vodi merena je pomoću Pocket ColorimeterTMII, proizvodnje Hach korišćenjem indigo metode [23,24], na mernim mestima po visini kolone. Fitovanjem dobijenih krivih polinomom drugog stepena, određeno je dc_i/dz u svakom od eksperimentalnih položaja u koloni.

Zapreminski koeficijent prenosa mase određivan je iz izraza (7).

REZULTATI I DISKUSIJA

U mirnoj zoni BKDM, pri protoku gasa od 120 L/h, sadržaj gasa u disperziji se menja sa promenom protoka tečne faze, što je pokazano na slici 3.



Slika 3. Sadržaj gasa u disperziji u funkciji protoka tečnosti, pri protoku gasa od 120 L/h.

Figure 3. Gas hold up vs. liquid flow rate (gas flow rate 120 L/h).

Sa slike 3 se može zaključiti da pri malim protocima tečnosti (<150 l/h) dolazi do smanjenja sadržaja gasa u disperziji, jer povećanje istostrujnog toka tečnosti u BKDM dovodi do porasta brzine kojom mehurovi napuštaju kolonu, a značajnijeg prekidanja gasnih mehurova još uvek nema. Dalje povećanje protoka tečnosti izaziva intenzivnu turbulenciju u turbulentnoj zoni kolone, koja utiče na prekidanje mehurova i smanjenje njihovog prečnika u mirnoj zoni kolone, smanjenje brzine dizanja mehurova, pa stoga i porast sadržaja gasa u disperziji. Po dostizanju kritičnog protoka tečnosti od 300 l/h svi mehurovi prečnika većeg od 5 mm su prekinuti, ne menja im se više brzina dizanja, pa sadržaj gasa u disperziji počinje da opada sa porastom protoka tečnosti zbog porasta brzine tečnosti.

Sauterov srednji prečnik mehura u mirnoj zoni kolone opada kontinualno pri porastu protoka tečnosti što je pokazano u tabeli 1.

Tabela 1. Sauterov srednji prečnik mehura u funkciji protoka tečnosti, pri protoku gasa od 120 L/h

Table 1. Sauter mean bubble diameter vs liquid flow rate (gas flow rate 120 L/h)

L / L h ⁻¹	180	360	700	1800
d_{BS} / mm	3,50	3,15	2,90	2,40

Sve do dostizanja kritičnog protoka tečnosti u sistemu dolazi do vrlo značajnog povećanja specifične međufazne površine kontakta, kao posledice stalnog

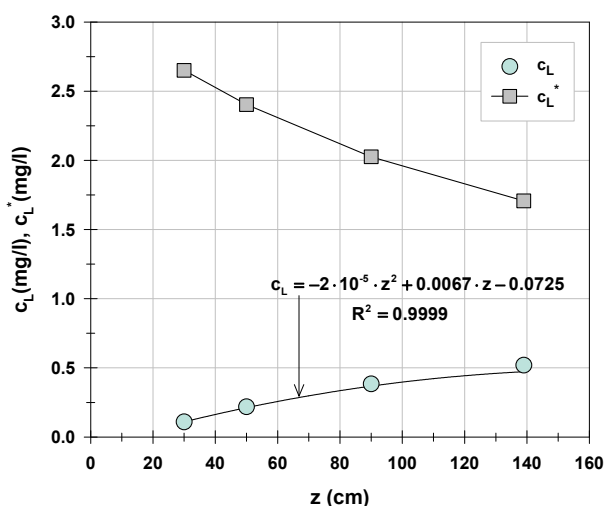
povećanja sadržaja gasa u disperziji, u mirnoj zoni kolone, i istovremeno stalnog smanjenja Sauterovog srednjeg prečnika mehura, što se vidi iz tabele 2.

Tabela 2. Specifična površina kontakta u funkciji protoka tečnosti, pri protoku gasa od 120 L/h

Table 2. Intefacial area vs liquid flow rate (gas flow rate 120 L/h)

$L / L h^{-1}$	180	360
a / cm^{-1}	0,386	0,514

Pri proračunu vrednosti zapreminskog koeficijenta prenosa mase prema izrazu 7, potrebno je poznavanje promene koncentracije rastvorenog ozona u vodi, c_L , po visini kolone, što se određuje merenjem pomoću kolorimetra. Po visini kolone dolazi i do stalnog opadanja ravnotežne koncentracije ozona u vodi, idući u smeru od dna ka vrhu, što je posledica apsorpcije ozona i smanjenja koncentracije ozona u gasnim mehurovima, u istom smeru, kao i smanjenja pritiska u mehurovima. Zbog obimnosti proračuna za određivanje zapreminskog koeficijenta prenosa mase, u daljem tekstu će biti prikazan samo primer proračuna za eksperiment pri protoku gasa od 60 L/h i tečnosti od 360 L/h i položaje preklopnika $R = 0$ i $L = 8$. Promena izmerenih vrednosti koncentracija rastvorenog ozona i izračunatih vrednosti ravnotežnih koncentracija ozona, po visini kolone, za ovaj eksperiment prikazana je na slici 4.

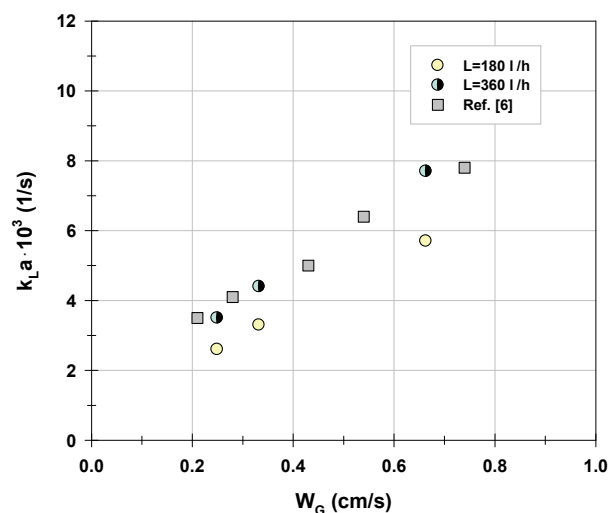


Slika 4. Zavisnost aktuelne i ravnotežne koncentracije ozona u vodi od položaja u koloni pri $G = 60 L/h$, $L = 360 L/h$, " R " = 0 i " L " = 8.

Figure 4. Dissolved and equilibrium ozone concentration vs. the distance from the nozzle ($G = 60 L/h$; $L = 360 L/h$; " R " = 0 and " L " = 8).

Fitovanjem dobijene krive polinomom drugog stepena, određena je vrednost dc_L/dz na svim visinama gde je izvršeno merenje. Na taj način može se odrediti vrednost zapreminskog koeficijenta prenosa mase

ozona na različitim položajima po visini kolone. Rezultati su pokazali da se ova vrednost ne menja sa položajem u koloni, kao ni pri promeni koncentracije ozona u ulaznom gasu. Eksperimentalno određene vrednosti zapreminskog koeficijenta prenosa mase ozona, pri svim operativnim uslovima protoka gasa i tečnosti, prikazani su na slici 5.



Slika 5. Zavisnost zapreminskog koeficijenta prenosa mase ozona od prividne brzine gasa i protoka tečnosti.
Figure 5. Ozone volumetric mass transfer coefficient vs. superficial gas velocity and liquid flow rate.

Na istoj slici prikazane su, radi poređenja, i vrednosti zapreminskog koeficijenta prenosa mase ozona ostvarene u protivstrujnoj barbotажnoj koloni sa fritom kao raspodeljivačem gasa [6]. Rezultati pokazuju da povećanje prividne brzine gasa, utiče na povećanje zapreminskog koeficijenta prenosa mase u mirnoj zoni BKDM, na sličan način kao i kod klasične protivstrujne barbotажne kolone. Za sistem ozon-voda u barbotажnoj koloni nedvosmisleno je pokazano da zapreminski koeficijent prenosa mase ozona u vodi raste sa porastom prividne brzine gasa na eksponent čija se vrednost kreće od 0,54 do 1,02 [7,8]. Konstatovano je da je zapreminski koeficijent prenosa mase kiseonika iz vazduha u mirnoj zoni kolone proporcionalan promeni prividne brzine gasa na eksponent 0,7 [10].

Pri promeni protoka tečnosti od 180 do 360 L/h dolazi do značajnog porasta vrednosti zapreminskog koeficijenta prenosa mase, nezavisno od protoka gasa. Pri protoku gasa od 120 L/h, ovaj porast iznosi 1,35 puta. S druge strane, pri istoj promeni protoka tečnosti, prema podacima iz tabele 2, specifična međufazna površina poraste 1,33 puta, što znači da pri porastu protoka tečnosti promena $k_L a$ potiče samo od promene specifične međufazne površine, a da koeficijent prenosa mase ostaje praktično nepromenjen i iznosi $1,5 \times 10^{-2} cm/s$.

Dobijene vrednosti $k_L a$ u mirnoj zoni BKDM, pri protocima tečnosti oko L_c se neznatno razlikuju od vrednosti $k_L a$ u klasičnoj protivstrujnoj barbotажnoj koloni sa fritom [6], što znači da se dvofluidna mlaznica može koristiti kao raspodeljivač gasa umesto frite. Ovo je posebno značajno kod tretmana otpadnih voda ozonom, jer je korišćenjem dvofluidne mlaznice isključena mogućnost začepljivanja suspendovanim česticama, što se može desiti korišćenjem frite.

ZAKLJUČAK

U ovom radu je ispitivan uticaj protoka faza (gasne i tečne) na zapreminski koeficijent prenosa mase ozona u vodi, $k_L a$ u mirnoj zoni BKDM.

Rezultati eksperimentalnih ispitivanja pokazuju da povećanje prividne brzine gasa, utiče na povećanje zapreminskog koeficijenta prenosa mase ozona, na sličan način kao i kod klasične protivstrujne barbotажne kolone.

Porast protoka tečnosti do njegove kritične vrednosti, utiče značajno na povećanje zapreminskog koeficijenta prenosa mase ozona, što je posledica povećanja specifične međufazne površine kontakta, dok se vrednost koeficijenta prenosa mase ozona praktično ne menja.

Dobijene vrednosti $k_L a$ u mirnoj zoni BKDM, pri protocima tečnosti oko L_c , se neznatno razlikuju od vrednosti $k_L a$ u klasičnoj protivstrujnoj barbotажnoj koloni sa fritom, što znači da se dvofluidna mlaznica može koristiti kao raspodeljivač gasa umesto frite.

Simboli

$k_L a$	zapreminski koeficijent prenosa mase, s^{-1}
a	specifična međufazna površina kontakta, cm^{-1}
ε_G	sadržaj gasa u disperziji
d_{BS}	Sauterov srednji prečnik mehura, mm
L_c	kritični protok tečnosti, L/h
W_G	prividna brzina gasa, $cm s^{-1}$
W_D	brzina dizanja mehurova, $cm s^{-1}$
W_D^0	brzina dizanja mehurova kroz tečnost koja miruje, $cm s^{-1}$
U_L	prividna brzina tečnosti koja istostrujno protiče za gasom, $cm s^{-1}$
k_L	koeficijent prenosa mase sa strane tečnosti, $cm s^{-1}$
g	gravitaciona konstanta, $9,81 m s^{-2}$
ν_L	kinematska viskoznost, $m^2 s^{-1}$
D_A	koeficijent difuzije, $cm^2 s^{-1}$
C_{i*}	aktuelna koncentracija ozona u tečnoj fazi, g/m^3
C_L	ravnotežna koncentracija ozona u vodi, g/m^3
τ	vreme, s
z	rastojanje od ulaza u kolonu, cm
H_G	razlika visine nivoa disperzije i visine nivoa vode u piezometarskoj cevi, cm
d_{B3i}	zapreminski ekvivalentni prečnik i-tog mehura, mm

d_{B2i}	površinski ekvivalentni prečnik i-tog mehura, mm
a_i	velika poluosa elipse kao projekcija i-tog mehura, mm
b_i	mala poluosa elipse kao projekcija i-tog mehura, mm

Zahvalnica

Ovaj rad je urađen uz finansijsku pomoć Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (projekat br.172022).

LITERATURA

- [1] J. Egleton, Ozone in drinking water treatment, DRAFT-JGE 2 (1999) 1–29.
- [2] B. Langlais, D. Reckhow, B. Deborah, Ozone in Water Treatment, Application and Engineering, Cooperative Research Report, Lewis Publishers, USA, 1991.
- [3] I. Stanković, Analiza barbotажnih sistema za ozonizaciju pri prečišćavanju voda, Doktorska disertacija, Tehnološko–metalurški fakultet, Beograd, 1983.
- [4] Lj. Takić, Prenos mase i dekompozicija ozona pri ozonizaciji vode različitog kvaliteta u barbotажnim reaktorima, Doktorska disertacija, Tehnološki fakultet, Leskovac, 2008.
- [5] Lj. Takić, M. Lazić, V. Veljković, S. Pejanović, Ozone absorption in mechanically stirred reactor, J. Serb. Chem. Soc. **72** (2007) 847–855.
- [6] I. Stanković, Comparison of ozone and oxygen mass transfer in a laboratory and pilot plant operation, Ozone Sci. Eng. **10** (1988) 321–338.
- [7] A. Bin, M. Roustan, Basic chemical engineering concepts for the design of ozone gas-liquid reactors, IOA 17-GLS 7, Strasbourg, 2005.
- [8] A. Bin, M. Roustan, Mass transfer in ozone reactors, International Specialized Symposium, IOA, Toulouse, France, 2000, pp. 99–131.
- [9] A. Bin, M. Roustan, Mass transfer in ozone reactors, in Proceedings of the International Specialized Symposium IOA 2000, Fundamental and Engineering Concepts for Ozone Reactor Design, Toulouse, France, 2000, pp. 89–131.
- [10] S. Pejanović, I. Stanković, D. Simonović, Prenos mase u protivstrujnim barbotажnim kolonama, Hem. Ind. **46** (1992) 188–192.
- [11] S. Pejanović, Usporedna analiza hidrodinamičkog ponašanja i karakteristika prenosa mase barbotажnih sistema, Doktorska disertacija, Tehnološko–metalurški fakultet, Beograd, 1992.
- [12] S. Kawamura, Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2000.
- [13] V. Farines, J. Baig, J. Albet, J. Molinier, C. Legay, Ozone transfer from gas to water in a co/current upflow packed bed reactor containing silica gel, Chem. Eng. J. **91** (2003) 67–73.

- [14] J.C. Crittenden, R.R. Trusell, D.W. Hand, K.J. Howe, G. Tchobanoglous, *Water Treatment: Principles and Design*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2005.
- [15] D.J. Henry, E.M. Freeman, Finite element analysis and TO optimization of ozone contactors, *Ozone Sci. Eng.* **17** (1996) 587–606.
- [16] M. Zlokarnik, Sorption characteristics of slot injectors and their dependence on the coalescence behavior of the sistem, *Chem.Eng.Sci.* **34** (1979) 1265.
- [17] S. Pejanović, D. Vuković, Ž. Grbavčić, A. Soufi, Fluid mechanical behaviour in a cocurrent gas-liquid spouted bed reactor, 7th International CHISA'81 Congress, Prague, Czechoslovakia, P.No.J.3.29., 1981.
- [18] D. Vuković, Ž. Grbavčić, S. Pejanović, Barbotažna kolona sa dvofluidnom mlaznicom i istostrujnim kretanjem fluida ili istostrujnim trofaznim fontanskim slojem, za izvođenje kontakta gas-tečnost i/ili gas-tečnost-čvrste čestice, Jugoslovenska patentna prijava, P-3134/81, 1981.
- [19] S. Pejanović, V. Vuković, On the efficiency of an upflow bubble column with a two-fluid nozzle gas distributor, *J. Serb. Chem. Soc.* **58** (1993) 973–982.
- [20] G.A. Hughmark, Holdup and Mass Transfer in Bubble Columns, *Ind. Eng. Chem.Proc. Des. Dev.* **6** (1967) 218.
- [21] P.V. Dankwerts, *Gas-Liquid Reactions*, McGraw – Hill Book Company, London, 1970.
- [22] P.H. Calderbank, M.B. Moo-Young, The continuous phase heat and mass-transfer properties of dispersions, *Chem. Eng. Sci.* **16** (1961) 39.
- [23] H.Bader, J.Hoigne, Determination of ozone in water by the indigo method, *Water Res.* **15** (1981) 449–456.
- [24] A.D. Eaton, L.S. Clesceri, A.E. Greenberg (Eds.), *Standard methods for the examination of water and wastewater*, American Public Health Association-American Water Works Association-Water Pollution Control Federation, Washington DC, 1998, pp. 5–35.

SUMMARY

DETERMINATION OF THE OZONE VOLUMETRIC MASS TRANSFER COEFFICIENT IN BUBBLE COLUMN WITH TWO-FLUID NOZZLE GAS DISTRIBUTOR

Milica Đeković Šević¹, Nevenka Bošković-Vragolović², Ljiljana Takić³, Radmila Garić-Grulović⁴, Srđan Pejanović²

¹High Vocational School of Technology – Arandjelovac, Serbia

²Faculty of Technology and Metallurgy, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

³Faculty of Technology, University of Nis, Leskovac, Serbia

⁴Institute for Chemistry, Technology and Metallurgy, Department of Catalysis and Chemical Engineering, Belgrade, Serbia

(Scientific paper)

Experimental investigation of gas-liquid mass transfer of ozone in water, in bubble column with two-fluid nozzle gas distributor (BKDM), under different operating conditions, is presented in this work. The main objective was to determine the ozone volumetric mass transfer coefficient, $k_L a$, in calm uniform section of the column, under different values of gas and liquid flow rates. Obtained values of these coefficients were compared with the values in countercurrent bubble column. The critical liquid flowrate, when gas hold up reaches its maximum, was experimentally determined. It was shown that the maximum value of the ozone volumetric mass transfer coefficient is obtained just when liquid flowrate is at its critical value.

Keywords: Ozone volumetric mass transfer coefficient • Bubble column with two-fluid nozzle gas distributor