

DANICA V. BRZIĆ
NEVENKA M.
BOŠKOVIĆ–VRAGOLOVIĆ
ŽELJKO B. GRBAVČIĆ

Tehnološko–metalurški fakultet,
Univerzitet u Beogradu, Katedra
za hemijsko inženjerstvo,
Beograd, Srbija

NAUČNI RAD

66.021.3+54–138+547.581.2

PRENOS MASE ZID–FLUID U PARTIKULATIVNO FLUIDIZOVANIM SLOJEVIMA

Ispitivan je prenos mase sa zida kolone na fluid u fluidizovanom sloju inertnih sfernih čestica. Eksperimenti su izvršeni u fluidizacionoj koloni prečnika 40 mm, sa sfernim česticama od stakla prečnika 0,8–3 mm i vodom kao fluidizacionim medijumom. Određivan je koeficijent prelaza mase zid kolone–fluidizovani sloj metodom rastvaranja benzoove kiseline. Ispitivan je uticaj brzine strujanja fluida i karakteristika čestica na koeficijent prelaza mase. Opseg ispitivanih Reynoldsovih brojeva bio je za strujanje fluida bez čestica (jednofazni tok) od 100–4000, a u fluidizovanom sloju od 600–4000. Rezultati su prikazani kao zavisnosti bezdimenzionog faktora prenosa mase j_D od Reynoldsovog broja Re i Reynoldsovog broja za česticu Re_p . Na osnovu eksperimentalnih rezultata postavljena je korelacija za određivanje koeficijenta prelaza mase u obliku zavisnosti $j_D = f(Re)$.

Proučavanje prenosa mase u fluidizovanim sistemima je značajno u cilju uspešnog projektovanja uređaja za separacione procese i hemijskih reaktora. Primenom fluidizovanih sistema u procesima prenosa mase postiže se povećanje međufazne kontaktne površine i relativno kretanje između faza, što dovodi do povećanja brzine procesa, a time i do povećanja efikasnosti i smanjenja gabarita uređaja.

Za eksperimentalno ispitivanje prenosa mase u fluidizovanim sistemima u radovima drugih autora korišćene su: metoda praćenja rastvaranja komponente u uslovima niskog fluksa mase [1–4], elektrohemijska metoda [5,6] i adsorpciona metoda [4]. Koeficijenti prenosa mase određivani su najčešće kao prenos čestice–fluid [2,3], a nešto manje kao prenos uronjeni objekat–fluid [4] i zid–fluid [7].

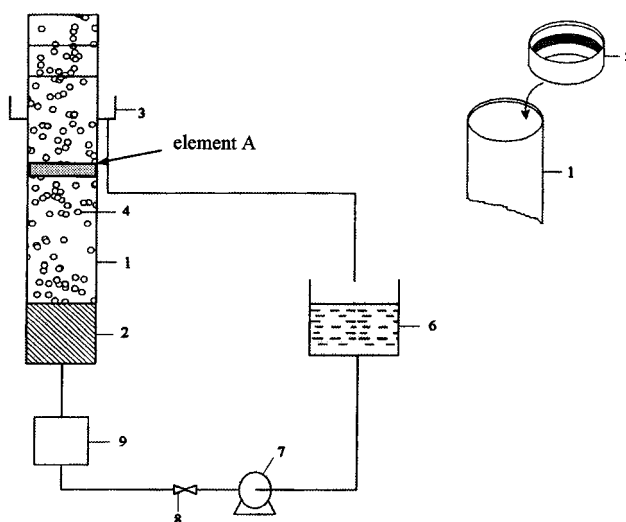
U ovom radu su predstavljeni eksperimentalno dobijeni podaci za koeficijent prelaza mase zid kolone–fluid za strujanje čistog fluida kroz vertikalnu cev i u prisustvu inertnih fluidizovanih čestica. Prikazan je uticaj brzine fluida i prečnika čestica na intenzitet prenosa mase. Na osnovu dobijenih rezultata postavljene su empirijske korelacije za oba ispitivana sistema.

EKSPERIMENTALNI DEO

Eksperimentalni sistem

Eksperimentalna ispitivanja prenosa mase su izvršena na aparaturi koja je šematski prikazana na slici 1. Kolona za fluidizaciju, prečnika 40 mm, sastoji se od jednog fiksiranog i jednog pokretnog dela (prstena) na čijoj unutrašnjoj površini postoji kružni žleb širine 10 mm i dubine 2 mm ispunjen benzoovom kiselinom – element A (slika 1).

Priprema prstena sa benzoovom kiselinom izvršena je na sledeći način: rastop benzoove kiseline na 130°C ulivan je u žleb na prstenu. Posle hlađenja pov-



Slika 1. Šematski prikaz eksperimentalnog sistema za ispitivanje prenosa mase u fluidizovanom sloju tečnost čestice (1 – kolona, 2 – raspodeljivač, 3 – prelivnik, 4 – staklene sfere, 5 (element A) – prsten sa benzoovom kiselinom; 6 – rezervoar, 7 – pumpa, 8 – ventil, 9 – merač protoka)

Figure 1. Schematic diagram of experimental system for mass transfer data (1 – column, 2 – distributor, 3 – flowmeter, 4 – glass particles, 5 – (element A) ring prepared from the benzoic acid, 6 – tank, 7 – pump, 8 – valve, 9 – flowmeter)

ršina prstena izglacana je tako da je unutrašnji prečnik prstena jednak prečniku kolone.

Eksperimenti su izvedeni tako što je benzoeva kiselina sa prstena rastvarana u struji fluida određeno vreme. Vreme trajanja jednog merenja (za jedan protok fluida) zavisilo je od toga da li su čestice prisutne u koloni. Vreme izlaganja u slučaju jednofaznog toka je bilo 20–25 min. a za fluidizovani sloj 10–15 min. Nakon isteka navedenog vremena prsten je sušen 30 minuta na 50°C. Merena je masa prstena pre i posle svakog eksperimenta, a određena razlika predstavlja masu rastvorene benzoove kiseline.

Fluidizovani sloj činile su sferne čestice od stakla čije su fizičke karakteristike navedene u tabeli 1, a kao fluidizacioni medijum korišćena je voda čija je tempera-

Adresa autora: D. Brzić, Tehnološko–metalurški fakultet, Katedra za hemijsko inženjerstvo, Karnegijeva 4, 11000 Beograd, Srbija
Rad primljen: Januar 27, 2004
Rad prihvaćen: Februar 14, 2004.

Tabela 1. Fizičke karakteristike inertnih čestica
Table 1.

d_p , mm	ρ_p , kg/m ³	U_t , m/s [10]
3,0	2558	0,377
2,0	2505	0,303
1,0	2641	0,166
0,8	2923	0,148

tura merena u svakom eksperimentu. Fizički parametri vode određivani su na srednjoj temperaturi na početku i kraju eksperimenta.

Eksperimentalna metoda

Maseni fluks pri konvektivnom prenosu mase teško rastvornog jedinjenja obezbeđuje njegovu zanemarljivo malu koncentraciju u struji fluida (pogonska sila za prenos mase svodi se na ravnotežnu rastvorljivost komponente) i konstantnu površinu za prenos mase. U tom slučaju koeficijent prelaza mase se izračunava iz izraza:

$$k = \frac{\Delta m}{\Delta t S c_m^*}$$

i predstavlja srednji koeficijent prelaza mase.

Ravnotežna rastvorljivost benzojeve kiseline u vodi izračunata je korišćenjem podataka iz literature kao funkcija temperature [8]:

$$c \sum m^* [g/dm^3] = 10^{0.19+0.01343 \theta}$$

Koeficijent difuzije benzojeve kiseline u vodi definisan je sledećom jednačinom zavisnosti od temperature θ [9]:

$$D_{AB} \cdot 10^{11} [m^2/s] = 40,04 + 1,0663 \cdot \theta + 0,041143 \cdot \theta^2$$

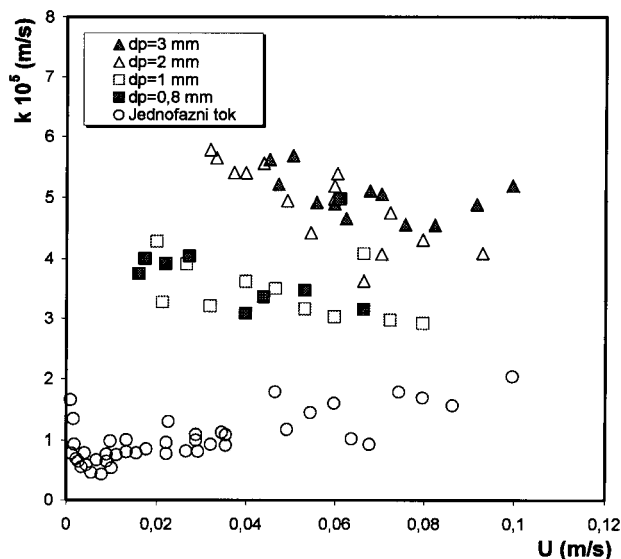
REZULTATI I DISKUSIJA

Na slici 2 prikazana je zavisnost koeficijenta prelaza mase zid-fluid od površinske brzine fluida kroz praznu kolonu i u partikulativno fluidizovanom sloju (za sve ispitivane prečnike fluidizovanih čestica). Prenos mase je intenzivniji u prisustvu staklenih čestica u koloni tj. u fluidizovanom sloju nego u jednofaznom toku, što je posledica intenzivnog mešanja tečne faze, čime se postiže smanjenje debljine graničnog sloja uz zid kolone.

U jednofaznom toku se relativno malo uvećava prelaz mase sa povećanjem brzine strujanja fluida (slika 2).

U fluidizovanom sloju prelaz mase je najveći pri minimalnoj brzini fluidizacije za dati prečnik čestica. Sa povećanjem brzine fluida malo se smanjuje prelaz mase što se objašnjava smanjenjem intenziteta mešanja. Takođe, sa porastom brzine fluida opada koncentracija čestica u sloju, strujna slika se približava jednofaznom toku pa i vrednosti koeficijenta prelaza mase teže vrednostima za jednofazni tok.

Na slici 3 prikazana je zavisnost faktora prenosa mase od Reynoldsovog broja za jednofazni tok i za fluidizovani sloj u log-log sistemu. Ona je linearna u oba sistema, pri čemu se jasno uočava da prisustvo fluidizovanih čestica intenzivira prenos mase u odnosu na jednofazni tok. Faktor prenosa mase:



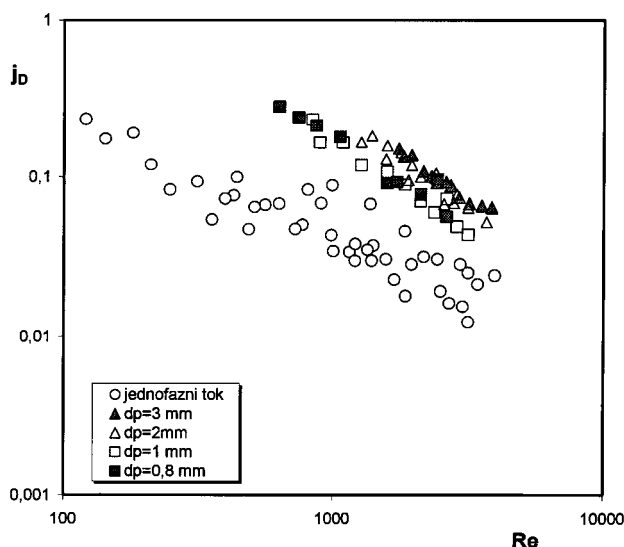
Slika 2. Zavisnost koeficijenta prelaza mase od površinske brzine fluida

Figure 2. Mass transfer coefficient vs. superficial fluid velocity

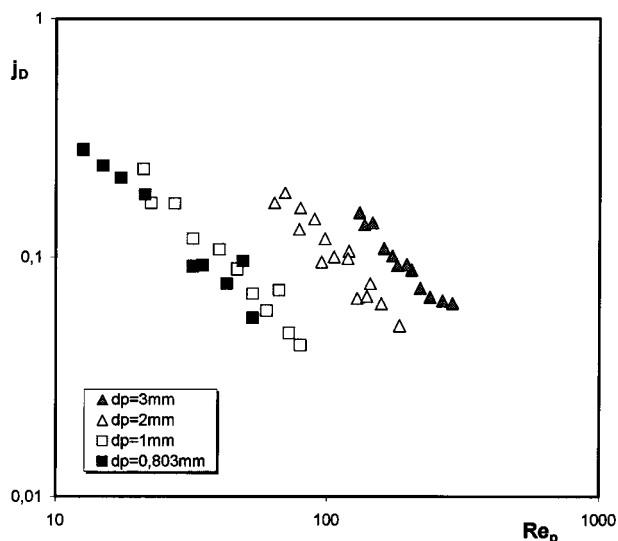
$$j_D = \frac{Sh}{ReSc^{1/3}} = \frac{k}{U} Sc^{2/3}$$

je u razvijenoj formi direktno proporcionalan koeficijentu prelaza a obrnuto proporcionalan površinskoj brzini. S obzirom da se j_D -faktor smanjuje sa povećanjem Re_p -kriterijuma moguće je zaključiti da je uticaj povećanja površinske brzine u jednofaznom toku veće od povećanja koeficijenta prelaza mase. Povećanje površinske brzine i odgovarajuće smanjenje koeficijenta prelaza mase (slika 2) na isti način doprinose smanjenju faktora prenosa mase u fluidizovanom sloju.

Moguće je uočiti i na osnovu podataka prikazanih na slici 3 da veličina čestica ne utiče značajnije u fluidizovanom sloju na intenzitet prenosa mase.



Slika 3. Zavisnost j_D -Re u jednofaznom toku i u fluidizovanom sloju
Figure 3. Relationship between j_D and Re for single-phase flow and for fluidised beds

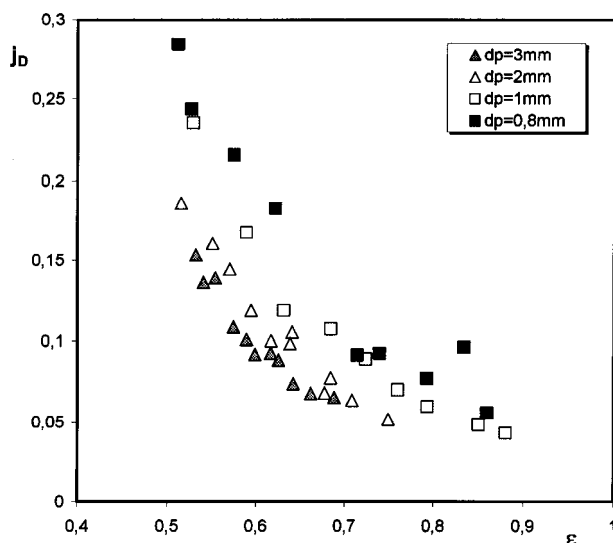


Slika 4. Zavisnost j_D od Re_p
Figure 4. Relationship between j_D and Re_p

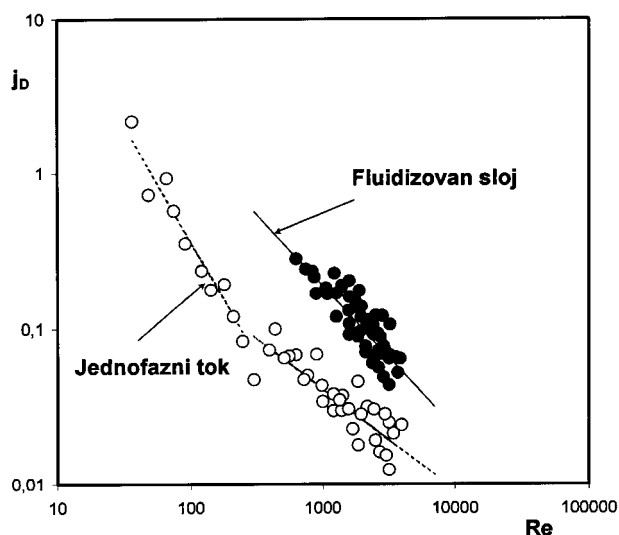
Slika 4 prikazuje zavisnost j_D -faktora od Reynoldsovog broja za česticu gde se vidi jasno izraženo razdvajanje pravolinijskih zavisnosti približno istog nagiba za različite prečnike inertnih čestica, a j_D -faktor opada sa porastom Re_p broja.

Na slici 5 prikazana je zavisnost j_D -faktora od poroznosti fluidizovanog sloja. Sa porastom poroznosti smanjuje se faktor prenosa mase j_D . Vidi se da krive za različite prečnike inertnih čestica teže istoj vrednosti j_D -faktora prenosa mase u koloni bez čestica kad poroznost teži vrednosti 1 tj. pri brzini odnošenja tih čestica.

Poroznost sloja ϵ za različite prečnike čestica izračunavana je prema empirijskim korelacijama Richardson-Zaki-jevog tipa dobijenim u prethodnim ispitivanjima u datoj koloni [11]:



Slika 5. Zavisnost j_D -faktora od poroznosti fluidizovanog sloja
Figure 5. Relationship between j_D and voidage for fluidized beds



Slika 6. Korelisanje eksperimentalnih podataka za jednofazni tok i fluidizovani sloj

Figure 6. Correlation of experimental data for single phase flow and fluidized beds

$$\frac{U}{U_t} = 0,679 \epsilon^{2,75} \text{ za } \epsilon < 0,89$$

$$\frac{U}{U_t} = \epsilon^{6,07} \text{ za } \epsilon > 0,89$$

Na osnovu eksperimentalnih rezultata (ispitivanja prenosa mase u fluidizovanom sloju) postavljena je sledeća korelacija u obliku zavisnosti j_D -faktora od Reynoldsovog broja (slika 6):

$$j_D = 109 Re^{-0,92}$$

Kvalitet postavljene korelacije izražen je preko vrednosti apsolutne devijacije σ_A od 19% i relativne devijacije σ_R od 3%.

Uobičajeno je da se za prenos mase u fluidizovanom sloju postavljaju korelacije oblika j_D - Re_p [2,4]. Međutim, pošto je u ovom radu ispitan prenos mase sa zida kolone data je korelacija oblika j_D - Re jer se može smatrati da je prečnik kolone karakteristična geometrija.

Empirijske korelacije postavljene su i za jednofazni tok. Pošto je uočeno da postoji promena nagiba pri vrednosti $Re \approx 300$ određene su dve odvojene korelacije:

$$j_D = 315 Re^{-1,47} \text{ za } Re < 300$$

(sa apsolutnom devijacijom od 19% i relativnom devijacijom od -4%)

$$j_D = 3,67 Re^{-0,65} \text{ za } Re > 300$$

(sa apsolutnom devijacijom od 21% i relativnom devijacijom od -2,1%)

ZAKLJUČAK

Prenos mase je intenzivniji u fluidizovanom sloju nego u jednofaznom toku. Čestice svojim kretanjem vrše eroziju graničnog sloja uz zid kolone čime se postiže povećanje vrednosti koeficijenta prenosa mase zid-fluid u fluidizovanom sloju tečnost-čestice.

Najbolji hidrodinamički uslovi za prenos mase su ostvareni u stanju minimalne fluidizacije jer je tada postignut najveći stepen mešanja tečne faze. Sa povećanjem brzine fluida iznad minimalno potrebne za fluidizaciju opada stepen mešanja pa koeficijent prelaza mase blago opada.

Prečnik čestica koje fluidizuju ne utiče bitno na faktor prenosa mase.

Na osnovu eksperimentalnih rezultata postavljene su korelacije za određivanje koeficijenta prelaza mase u jednofaznom toku i fluidizovanom sloju u obliku zavisnosti faktora prenosa mase od Reynoldsovog broja.

SPISAK OZNAKA

c_m^*	– ravnotežna koncentracija, kg/m ³
d_p	– prečnik čestice, m
D_c	– prečnik kolone, m
j_D	– bezdimenzioni faktor prenosa mase
k	– koeficijent prelaza mase, m/s
Re	– Reynoldsov broj,
Re_p	– Reynoldsov broj za česticu,
S	– površina za prenos mase, m ²
Δt	– vreme kontakta prstena sa fluidom (vodom) u koloni, s
Δm	– masa rastvorene benzojeve kiseline, kg
U	– površinska brzina fluida, m/s
U_t	– brzina odnošenja (taloženja) čestica, m/s
\dot{V}	– zapreminski protok fluida, m ³ /s
ε	– poroznost fluidizovanog sloja
μ	– koeficijent dinamičkog viskoziteta, Pa·s

ρ_f	– gustina fluida, kg/m ³
ρ_p	– gustina čestica, kg/m ³
D_{AB}	– koeficijent difuzije benzojeve kiseline u vodi, m/s
Sh	– Šervudov kriterijum, kD_c/D_{AB}
Sc	– Šmitov kriterijum, $\mu/\rho D_{AB}$
θ	– temperatura, °C
σ_A	– apsolutna devijacija
σ_R	– relativna devijacija

LITERATURA

- [1] V. Vanadurongwan, C. Laguerie and J.P. Couderc, Chem. Eng. J., **12** (1976) 29–31
- [2] S. Damronglerd, J.P. Couderc and H. Angelino, Trans. Inst. Chem. Engrs. **53**(3) (1975) 175–180
- [3] G.C. Evans and C.F. Gerald, Chem. Eng. Prog., **49** (1953) 135
- [4] N. Bošković, Ž.B. Grbavčić, V.D. Vuković and M. Marković–Grbavčić, Powder Technol. **79** (1994) 217–225
- [5] J.P. Riba and J.P. Couderc, Int. J. Heat mass transfer, **23** (1980) 909
- [6] J.P. Riba, R. Routie and J.P. Couderc, in J.F. Davidson and D.L. Keairns (eds.), Fluidization, Cambridge University Press, UK, 1979, p. 159
- [7] S. Schmidt, J. Buchs, C. Born and M. Biselli, Chem. Eng. Sci., **54** (1999) 829–839
- [8] S. Kumar, S.N. Upadhyay and V.K. Mathur, J. Chem. Eng. Data, **23**(2) (1978) 139–141
- [9] S. Kumar and S.N. Upadhyay, Ind. Eng. Chem. Fundam., **19**(1) (1980) 75–79
- [10] D. Kunii and O. Levenspiel, Fluidization Engineering, Wiley, New York, 1969.
- [11] Ž. Grbavčić, Doktorska teza, Tehnološko–metalurški fakultet, Beograd (1987)

SUMMARY

MASS TRANSFER FROM THE WALL OF A COLUMN TO THE FLUID IN A FLUIDIZED BED OF INERT SPHERICAL PARTICLES

(Scientific paper)

Danica V. Brzić, Nevenka M. Bošković–Vragolović, Željko B. Grbavčić
Faculty of Technology and Metallurgy, University of Belgrade, Department of Chemical Engineering, Belgrade, Serbia

Mass transfer in fluidized beds is an important operation for separation processes. Two effects can be achieved by using fluidized beds in mass transfer processes increasing interface area and relative movement between the phases. These effects are both desirable because they lead to greater process rates. This paper presents an experimental investigation regarding mass transfer from the wall of a column to the fluid in a fluidized bed of inert spherical particles. The experiments were conducted in column 40 mm in diameter with spherical particles 0,8–3 mm in diameter and water as one fluidizing fluid. The method of dissolution of benzoic acid was used to provide very low mass flux. The average wall-to-fluid mass transfer coefficients were determined for two systems:

- 1) single-phase fluid flow and
- 2) a fluidized bed of inert particles

The measurements encompassed a Reynolds number range from 100–4000 for single-phase flow and 600–4000 in fluidized beds.

The mass transfer coefficients for both systems were calculated from weight loss of benzoic acid. The effects of superficial liquid velocity and particle diameter on the mass transfer coefficient were investigated.

It was found that mass transfer was more intensive in the fluidized bed in comparison with single phase flow.

The best conditions for mass transfer were reached at a minimum fluidization velocity, when the mass transfer coefficient had the greatest value.

The experimental data were correlated in the form: $j_D = f(Re)$, where j_D is the dimensionless mass transfer factor and Re the Reynolds number.

Key words: Mass transfer • Dissolution method • Particulate fluidized bed • Experimental correlations •
Ključne reči: Prenos mase • Metoda rastvaranja • Partikulativno fluidizovan sloj • Eksperimentalne korelacije •