

Analogija prenosa količine kretanja, toplote i mase pri vertikalnom hidrauličkom transportu inertnih čestica

Darko R. Jaćimovski¹, Radmila V. Garić-Grulović¹, Željko B. Grbavčić², Mihal M. Đuriš¹,
Nevenka M. Bošković-Vragolović²

¹IHTM, Centar za katalizu i hemijsko inženjerstvo, Univerzitet u Beogradu, Njegoševa 12, Beograd, Srbija

²Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, Karnegijeva 4, Beograd, Srbija

Izvod

U ovom radu prikazani su rezultati eksperimentalnih ispitivanja prenosa količine kretanja, toplote i mase zid–fluid u vertikalnom hidrauličkom transportu inertnih čestica i pri strujanju fluida u cevi istog prečnika. Eksperimentalna ispitivanja vršena su istovremenim merenjem potrebnih parametara za definisanje navedenih prenosa. Cilj ovih ispitivanja bio je određivanje koeficijenta prenosa pri vertikalnom hidrauličkom transportu inertnih čestica i uspostavljanje analogije tri prenosa. Eksperimentalni sistem predstavljala je vertikalna transportna cev prečnika 25,4 mm snabdevena omotačem za zagrevanje parom, kao i segmentom transportne cevi prepariranim rastopom benzoeeve kiseline. Kao fluid korišćena je voda, a vršen je transport staklenih sfernih čestica prečnika 1,94 mm. U rezultatima su prikazani dobijeni koeficijenti trenja, prelaza toplote i prelaza mase. Korišćenjem koncepta pseudofluida, pokazano je postojanje analogije prenosa količine kretanja, toplote i mase u transportnoj cevi za paralelni režim strujanja.

Ključne reči: vertikalni dvofazni tok fluid–čestice, prenos količine kretanja, prenos toplote, prenos mase, analogija..

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

Potpuno definisanje vertikalnog dvofaznog toka fluid–čestice podrazumeva poznavanje fluido–dinamike i prenosnih karakteristika ovih sistema. Vertikalni dvofazni tok ne predstavlja samo transport čvrstog materijala već sve više predstavlja sastavni deo različitih faktora fluid–čestice kao što su modifikovani fontanski i fontansko–fluidizovani slojevi sa cevnom umetkom ili cirkulacioni fluidizovani slojevi [1–4].

Gradijent pritiska pri vertikalnom transportu fluida i čestica, sastoji se od gradijenta pritiska usled efektivne težine čestica, F_e , i gradijenta pritiska usled trenja smeše fluida i čestica o zid transportne cevi, F_w [5–7]:

$$-\frac{dp}{dz} = F_e + F_w = (\rho_p - \rho_f)g(1 - \varepsilon) + F_w \quad (1)$$

Za gradijent pritiska usled trenja smeše fluid–čestice (koja se kreće), o zidove transportne cevi (jedn. (1)), pretpostavlja se aditivni karakter, tj. da se može razdvojiti na gradijent pritiska usled trenja fluid–zid i gradijent pritiska usled trenja čestice–zid transportne cevi [8–10]:

$$F_w = F_f + F_p \quad (2)$$

Prepiska: R.V. Garić-Grulović, Institut za hemiju, tehnologiju i metalurgiju – Centar za katalizu i hemijsko inženjerstvo, Njegoševa 12, Beograd Srbija.

E-pošta: garic@tmf.bg.ac.rs

Rad primljen: 7. februar, 2013

Rad prihvaćen: 25. mart, 2013

NAUČNI RAD

UDK 544.4:66.011

Hem. Ind. 68 (1) 15–25 (2014)

doi: 10.2298/HEMIND130207025J

Gradijenti pritiska usled trenja fluid–zid, F_f , i čestice zid, F_p , definišu se jednačinama Fanningovog tipa [5]:

$$F_f = 2 f_f \rho_f \frac{U^2}{D_t} \quad (3)$$

$$F_p = 2 f_p \rho_p \frac{(1 - \varepsilon)v^2}{D_t} \quad (4)$$

u kojima je f_f koeficijent trenja fluid–zid, a f_p koeficijent trenja čestice–zid.

Koeficijent trenja fluid–zid transportne cevi određuje se iz korelacija za strujanje fluida bez prisustva čestica za glatku cev [11]:

$$f_f = \frac{0,0791}{Re^{0.25}} \quad (5)$$

Koeficijent trenja čestice–zid većina autora korelirala je u funkciji brzine čestica [8,12,13], ali postoje i kompleksne korelacije koje uključuju i poroznost i relativnu brzinu između fluida i čestica [9]. Korelacija za koeficijent trenja čestice–zid transportne cevi, koja se najčešće koristi u transportnim sistemima tečnost–čestice je [5]:

$$f_p = 7,33 \times 10^{-3} v^{-2} \quad (6)$$

gde je v u $m \cdot s^{-1}$.

U vertikalnom dvofaznom toku, čestice koje se transportuju svojim prisustvom utiču na karakteristike

ovih sistema. U ovom transportnom toku, pri svim brzinama fluida, koncentracija čestica po zapremini cevi je ravnomerna. U zavisnosti od brzine fluida i osobina samih čestica izgled vertikalnog toka je različit, tako da su, kao i u ranijim ispitivanjima, uočena dva režima transporta [5,6]:

– Turbulentni tok, koji karakteriše kretanje čestica po krivolinijskim putanjama, tj. radijalno se menja pravac kretanja čestica. Ovaj režim je tipičan za manje brzine fluida, manje poroznosti vertikalnog toka i može se okarakterisati i kao „gusti“ tok čestica. Vizuelno podseća na stešneno taloženje suspenzije čestica, samo u suprotnom smeru.

– Paralelan tok, koji karakteriše kretanje čestica uglavnom po pravolinijskim putanjama. Ovaj režim se javlja pri većim brzinama fluida i predstavlja „redak“ tok čestica u transportnoj cevi.

Jedan od najboljih kriterijuma za procenu režima strujanja u vertikalnom toku tečnost–čestice je, po modelu Daya sa sar., parametar γ [14]:

$$\gamma = \rho_p v^2 - \rho_f u^2 \quad (7)$$

gde je granična vrednost promene režima za $\gamma = 0$.

Na osnovu datog kriterijuma definisan je normalizovani parametar γ^* [5]:

$$\gamma^* = \frac{\rho_p v^2 - \rho_f U^2}{\rho_f U_t^2} \quad (8)$$

Za $\gamma^* < 0$ vertikalni tok se nalazi u režimu turbulentnog toka, a ako je $\gamma^* > 0$ u paralelnom režimu transporta čestica.

U literaturi su malobrojni podaci o prenosu toplote u vertikalnom toku tečnost–čvrste relativno teške čestice. Većina objavljenih radova bavi se prenosom toplote u vertikalnom toku tečnih suspenzija sitnih čestica ili krupnih čestica voća i povrća u prehrambenoj industriji [6,15–17]. Jedna od objavljenih eksperimentalnih korelacija za sisteme sa teškim česticama je [6]:

$$j_H = \frac{6565}{Re_m^{1,5}} \text{ za } 2800 < Re_m < 15000 \quad (9)$$

$$j_H = \frac{0,0395}{Re_m^{0,25}} \text{ za } 15000 < Re_m < 32000 \quad (10)$$

gde je Re_m Reynoldsov broj za smešu fluid–čestice.

Kao i u slučaju prenosa toplote i za prenos mase u vertikalnom toku tečnost–krupne čestice u literaturi ima vrlo malo podataka. Korelacija koja važi za transportni sistem krupne čestice–tečnost je [18]:

$$j_D = \frac{0,0395}{Re_m^{0,25}} \text{ za } 15000 < Re_m < 32000 \quad (11)$$

koja je takođe data za Reynoldsov broj za smešu fluid–čestice.

Kod jednofaznih tokova, posebno pri turbulentnom režimu strujanja, postoji nekoliko analogija, od kojih su najpoznatije: Reynoldsova, Chilton–Colburnova, Von Karmanova i Prantlova [19]. U vertikalnom toku fluida i čestica, prisustvo druge faze posebno utiče na prenos količine kretanja odnosno ukupni koeficijent trenja, pa samim tim i na uspostavljanje analogije [13,18,20]. Jedna od definisanih analogija, koja je koncipirana u formi Chilton–Colburnove analogije [21], data je za f_w , koeficijent trenja smeše „fluid–čestice“–zid transportne cevi u paralelnom režimu dvofaznog toka kao [6,18]:

$$j_H = j_D = \frac{f_w}{2} \quad (12)$$

U ovom radu biće dati rezultati eksperimentalnih merenja prenosa količine kretanja, toplote i mase. Prvi put u ovom radu, svi potrebni parametri za definisanje navedenih prenosa, mereni su istovremeno u cilju uspostavljanja analogije prenosa pri vertikalnom hidrauličkom transportu.

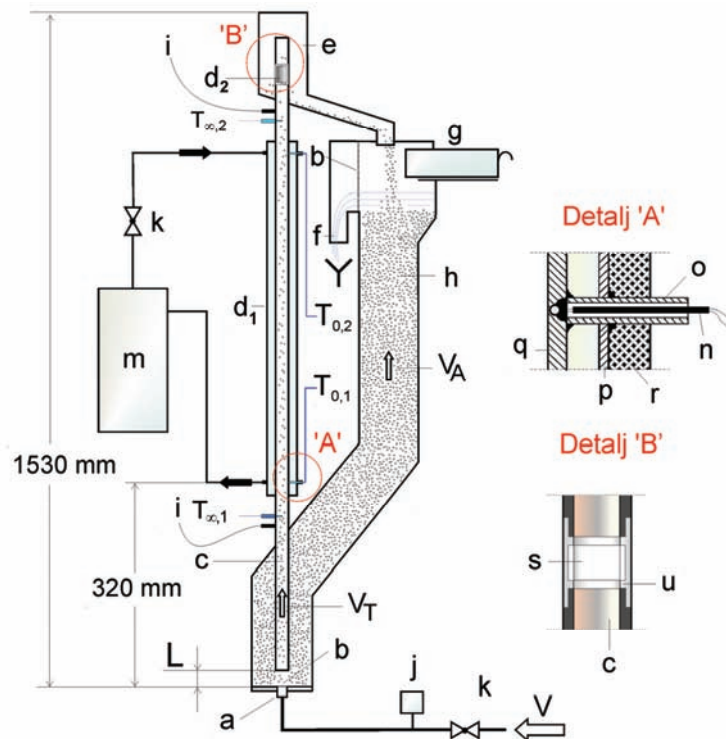
EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

Osnovni deo eksperimentalnog sistema bila je transportna bakarna cev (c) prečnika 25,4 mm i dužine 1320 mm (Slika 1). Oko cevi se nalazio omotač (d_1) sa spoljnom termičkom izolacijom, dužine 700 mm. Kroz omotač je strujala zasićena vodena para iz generatora pare (m) na atmosferskom pritisku. Na dnu i vrhu transportne cevi ugrađena su po dva termopara koja su merila temperaturu zida cevi i unutrašnjeg radnog fluida.

Za merenje pritiska na vrhu i dnu transportne cevi ugrađene su piezometarske cevi (i). Na vrhu transportne cevi nalazio se ugradni prsten (d_2) sa unutrašnjim žljebom visine 18,5 mm. Unutar prstena u žljeb nanošena je benzeova kiselina tako da je unutrašnji prečnik prstena bio jednak unutrašnjem prečniku kolone, da se ne bi ometala hidrodinamika. Benzeova kiselina je slabo rastvorna supstanca tako da u vremenu trajanja eksperimenta nije bilo bitne promene geometrije sistema. Masa prstena sa benzeovom kiselinom merena je na početku i kraju eksperimenta posle sušenja prstena.

Smeša fluida i čestica preivala se na vrhu u sistem za razdvajanje faza. Čestice su se spuštale naniže kroz dozer čvrstih čestica (h) opet ka ulazu u transportnu cev (c), gde su dolazile u kontakt sa fluidom na dnu kolone. Na taj način formiran je vertikalni dvofazni tok suspenzije voda–čestice. Na mestu odvajanja faza nalazio se merač protoka čestica i vode (g).

Karakteristike čestica korišćenih u eksperimentima date su u tabeli 1.



Slika 1. Eksperimentalna aparatura za ispitivanje prenosa količine kretanja, toplote i mase: a - mlaznica, b - raspodjelivač (mreža), c - transportna cev, d_1 - omotač za paru (grejanje), d_2 - prsten ispunjen benzojeve kiselinom, e - preliv čestica i vode, f - preliv vode, g - kutija za merenje protoka čestica, h - dozer čvrstih čestica, i - piezometri, j - merači protoka, k - ventili, L - rastojanje transportne cevi od mlaznice, m - generator pare 30 kW, n - termopar (termoparovi $T_{0,1}$, $T_{0,2}$), o - bakarna cev 8/6 mm, p - omotač oko transportne cevi, q - zid transportne cevi, r - izolacija, s - rastop benzojeve kiseline, u - prsten.

Figure. 1. Schematic diagram of experimental systems: a - inlet nozzle, b - distributor (screen), c - transport tube, d_1 - heating section, d_2 - segment prepared with benzoic acid, e - overflow, f - water overflow, g - box for water and particle flowrate measurements, h - particle dozer, i - piezometers, j - flowmeters, k - valves, L - transport tube to nozzle distance, m - steam generator, 30 kW, n - thermocouples ($T_{0,1}$, $T_{0,2}$), o - copper tube 8/6 mm, p - jacket wall, q - transport tube wall, r - thermoinsulation, s - melt of benzoic acid, u - tube segment.

U eksperimentima, kao transportni medijum korišćena je voda, čija se temperatura menjala u opsegu od 18–47 °C. Fizički parametri vode određivani su na srednjoj temperaturi fluida [22].

Tabela 1. Karakteristike čestica [5]

d_p / mm	ρ_p / kg m ⁻³	U_t / m s ⁻¹
1,94	2507	0,2878

Na osnovu izmerenih parametara izračunate su vrednosti:

– Koeficijenta prelaza toplote [11,19]:

$$\alpha = \frac{(G_f c_{pf} + G_p c_{pp})(T_{\infty,2} - T_{\infty,1})}{D_t \pi L_H \Delta T_{ln}} \quad (13)$$

gde je srednja logaritamska razlika temperatura:

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_{0,2} - T_{\infty,2}) - (T_{0,1} - T_{\infty,1})}{\ln \frac{(T_{0,2} - T_{\infty,2})}{(T_{0,1} - T_{\infty,1})}} \quad (14)$$

– Koeficijenta prelaza mase:

$$k = \frac{\Delta m}{t S \Delta c} = \frac{\Delta m}{t D_t \pi L_D \Delta c} \quad (15)$$

korišćenjem metode rastvaranja benzojeve kiseline u struji vode. Pogonska sila za prenos mase je razlika koncentracija benzojeve kiseline na površini (ravnotežna koncentracija) i u fluidu:

$$\Delta c = c^* - c_f \quad (16)$$

S obzirom na to da je benzojeva kiselina slabo rastvorna supstanca, da je eksperiment vršen stalno sa svežom strujom vode i da je površina sa koje se vršio prenos mala, pokazalo se praktično da je $c_f \approx 0$, tj. da je pogonska sila jednaka ravnotežnoj koncentraciji benzojeve kiseline. Korelacije za određivanje ravnotežne koncentracije benzojeve kiseline i koeficijenta difuzije benzojeve kiseline u vodi preuzete su iz literature [23].

REZULTATI I DISKUSIJA

Režimi strujanja pri vertikalnom dvofaznom toku

Na slici 2 prikazana je zavisnost normalizovanog parametra γ^* od poroznosti, ε . Parametar γ^* izračunat je iz eksperimentalno izmerenih vrednosti brzina čestica i fluida po jednačini (8). Poroznost vertikalnog dvofaznog toka određivana je iz eksperimentalnih vrednosti za pad pritiska i brzinu fluida u vertikalnom toku fluida i čestica, kao i parametara sistema, a na osnovu jednačina (1)–(6), na sledeći način:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\left(-\frac{dp}{dz}\right) - F_f - F_p}{(\rho_p - \rho_f)g} \quad (17)$$

Poređenja radi, na slici 2 je prikazana i zavisnost $\gamma^*-\varepsilon$, gde je poroznost direktno eksperimentalno određivana u transportnoj cevi prečnika, $D_t = 24$ mm [5]. Očigledno je da su dobijene iste zavisnosti, bez obzira na način eksperimentalnog određivanja poroznosti transportnog toka, a mala razlika u prečniku transportne cevi nije uticala na dobro slaganje rezultata.

Na slici 2 se uočava promena nagiba zavisnosti $\gamma^* = f(\varepsilon)$ oko vrednosti poroznosti 0,85. Posle ove vrednosti poroznosti, vertikalni tok ulazi u oblast paralelnog režima, jer je posle te vrednosti i $\gamma^* > 0$. Interesantno je pomenuti da se vrednost poroznosti od 0,85 pojavljuje kao karakteristična vrednost u partikulativnoj fluidizaciji, pri kojoj dolazi do promene u ekspanziji fluidizovanog sloja, što je okarakterisano kao promena u

mehanizmu prenosa količine kretanja [5,14,24,25]. S obzirom na pojavu vrednosti poroznosti od 0,85 i u hidrauličkom transportu, može se smatrati da pri toj vrednosti dolazi do promene u mehanizmu prenosa količine kretanja što za rezultat ima promenu režima transporta.

Prenos količine kretanja

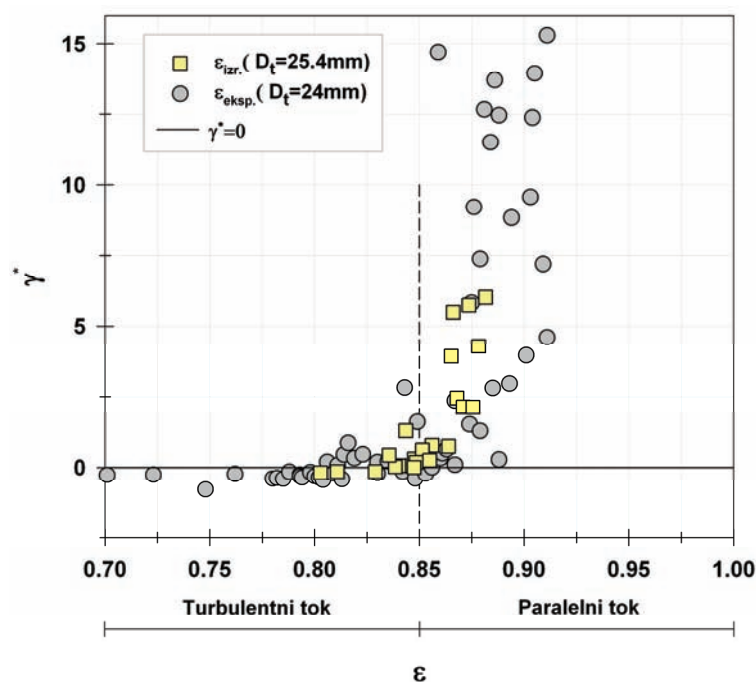
Ukupni gradijent pritiska u vertikalnom toku smeše tečnost–čvrste čestice, sastoji se od tri komponente: gradijenta pritiska usled efektivne težine čestica, F_e , gradijenta pritiska usled trenja fluid–zid transportne cevi, F_f , i gradijenta pritiska usled trenja čestice–zid transportne cevi, F_p , tj. na osnovu jednačina (1) i (2):

$$-\frac{dp}{dz} = F_e + F_f + F_p \quad (18)$$

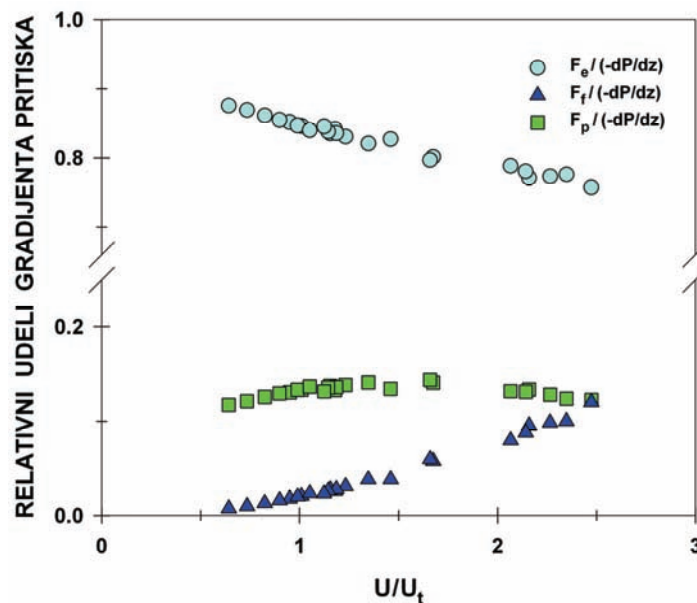
Na osnovu eksperimentalnih podataka za ukupni gradijent pritiska ($-dp/dz$) i poroznost (ε), kao i izračunatih vrednosti za gradijent pritiska usled trenja fluid–zid (jedn. (3) i (5)), određen je gradijent pritiska usled trenja čestice–zid:

$$F_p = -\frac{dp}{dz} - F_e - F_f \quad (19)$$

Na slici 3 su prikazani udeli gradijenata pritiska, efektivne težine čestica, trenja fluid–zid cevi i čestice–zid cevi u ukupnom gradijentu pritiska u zavisnosti od brzine fluida. Pri malim brzinama fluida, kada je koncentracija čestica visoka, dominantni udeo u ukupnom gradijentu pritiska ima efektivna težina čestica. Sa po-



Slika 2. Zavisnost parametra γ^* od poroznosti vertikalnog dvofaznog toka ($d_p = 1,94$ mm).
Figure 2. Relationship of γ^* vs. ε for vertical two-phase liquid-solids flow ($d_p = 1,94$ mm).



Slika 3. Relativni udeli gradijenta pritiska u zavisnosti od brzine fluida u vertikalnom toku smeše tečnost-čestice ($d_p = 1,94$ mm).
Figure 3. Variation of pressure drop ratios with superficial fluid velocity ($d_p = 1,94$ mm).

rastom brzine tečnosti raste i trenje fluid–zid kao i njegov udeo u ukupnom gubitku pritiska, sve do vrednosti oko 12%, pri brzini fluida $U/U_t \approx 2,5$.

Pri manjim brzinama fluida (do $U/U_t \approx 1,5$) gradijent pritiska usled trenja čestice–zid je veći od gradijenta pritiska usled trenja fluid–zid. Takođe, interesantno je napomenuti da je udeo trenja čestice–zid u ukupnom padu pritiska približno 14%, u celom opsegu ispitivanih brzina fluida ($0,6 < U/U_t < 2,5$). Takođe, na osnovu iznetog, može se zaključiti da se trenje čestice–zid transportne cevi u vertikalnom dvofaznom toku tečnost-čestice ne može zanemariti, što je u literaturi česta pretpostavka [26].

Koncept pseudofluida

S obzirom na to da pri transportu fluida kroz cev „struji“ smeša čestica i fluida, vertikalni tok čestica i fluida može se tretirati kao jednofazni tok fluida [27,28], okarakterisan svojom prividnom gustinom:

$$\rho_m = \varepsilon \rho_f + (1 - \varepsilon) \rho_p \quad (20)$$

i viskoznošću [29]:

$$\mu_m = \mu \exp\left(\frac{5(1 - \varepsilon)}{3\varepsilon}\right) \quad (21)$$

Po analogiji sa jednačinom (3) definiše se gradijent pritiska usled trenja smeše (pseudofluida) na zid transportne cevi:

$$F_w = 2 f_w \rho_f \frac{U_m^2}{D_t} \quad (22)$$

gde je f_w koeficijent trenja pseudofluid–zid transportne cevi, odnosno:

$$f_w = \frac{F_w D_t}{2 \rho_m U_m^2} \quad (23)$$

Srednja površinska brzina pseudofluida, U_m , predstavlja ukupni zapreminski protok čestica i fluida po jedinici površine transportne cevi [28]:

$$U_m = \frac{G_f}{\rho_f A_t} + \frac{G_p}{\rho_p A_t} \quad (24)$$

Modifikovani Reynoldsov broj za smešu fluid–čestice (pseudofluid) je:

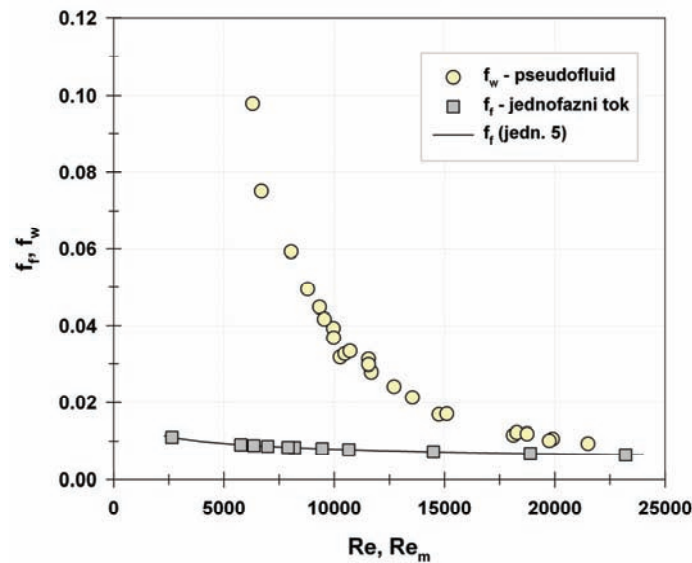
$$Re_m = \frac{D_t \rho_m U_m}{\mu_m} \quad (25)$$

U našim prethodnim ispitivanjima [28], za oblast paralelnog strujanja pseudofluida, koeficijent trenja pseudofluid–zid transportne cevi (f_w), u zavisnosti od modifikovanog Reynoldsovog broja za pseudofluid (Re_m), korelisan je jednačinom:

$$\frac{f_w}{2} = \frac{0,0395}{Re_m^{0,25}}, \quad 15000 < Re_m < 32000 \quad (26)$$

Na slici 4 je prikazana zavisnost eksperimentano dobijenih vrednosti koeficijenta trenja pseudofluid–zid transportne cevi (f_w), od Reynoldsovog broja pseudofluida (Re_m), kao i vrednosti koeficijenta trenja fluid–zid pri jednofaznom strujanju fluida (f_f).

Razlika u vrednostima koeficijenata trenja fluida i pseudofluida, posledica je prisustva čestica u toku



Slika 4. Zavisnost koeficijenta trenja fluida i pseudofluida o zid transportne cevi od Reynoldsovog broja fluida i pseudofluida.
Figure 4. Variation of f_f and f_w with Re number for the fluid and pseudofluid.

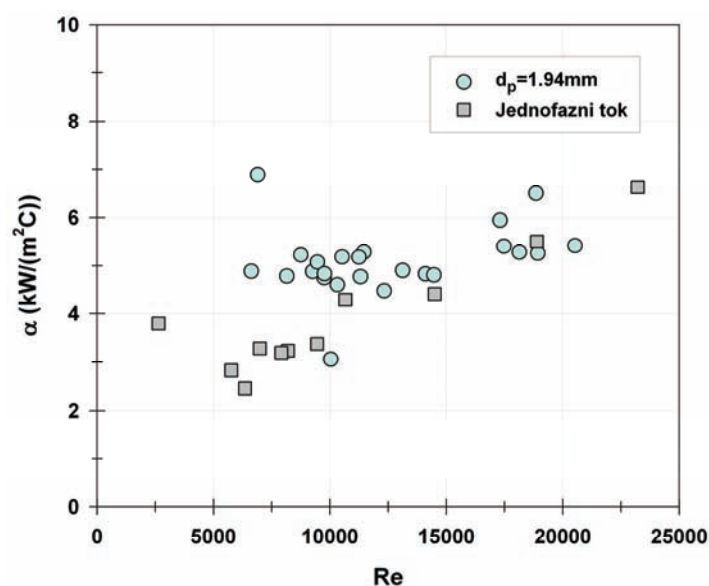
pseudofluida, koje svojim kretanjem, naročito u turbulentnom režimu transportnog toka, remete uniformnost pseudofluida.

Prenos toplote

Eksperimentalni podaci za koeficijent prelaza toplote u vertikalnom toku fluida i čestica u zavisnosti od površinske brzine fluida, prikazani na slici 5, pokazuju da vrednosti koeficijenta prelaza toplote rastu sa porastom brzine transporta. U opsegu Reynoldsovog broja 6000–15000 koeficijent prelaza toplote ima vrednosti oko $5 \text{ kW/m}^2\text{K}$. Ova vrednost koeficijenta prelaza toplote pripada turbulentnom režimu vertikalnog toka za

koji je karakteristično nepravilno kretanje čestica čime one u izvesnoj meri mešaju fluid i stvaraju slične uslove prenosa toplote sa zida cevi. U ovoj oblasti je očigledno da presudan uticaj na prenos imaju prisutne čestice a ne brzina fluida. Na slici 5 su prikazani i eksperimentalni podaci za koeficijent prelaza toplote dobijeni u jednofaznom toku fluida. Primetno je intenziviranje prenosa toplote u režimu turbulentnog transportnog toka upravo zbog prisustva čestica koje se kreću i radijalno čime značajno smanjuju debljinu termičkog graničnog sloja i intenziviraju prenos.

Pri vrednostima $Re > 15000$ dolazi do porasta koeficijenta prelaza toplote sa porastom brzine fluida. Ovo



Slika 5. Zavisnost koeficijenta prelaza toplote od Reynoldsovog broja.
Figure 5. Relationship of α vs. Re.

predstavlja oblast paralelnog režima vertikalnog toka [6], gde čestice zbog pravolinijskog kretanja ne utiču značajno na prenos toplote već je od presudnog značaja brzina fluida. U ovom režimu i koncentracija čestica je značajno smanjena tako da se pri velikim brzinama približava jednofaznom toku.

Prenos mase

Na osnovu dosadašnjih ispitivanja o uticaju brzine strujanja na koeficijent prelaza mase u vertikalnom toku fluida i čestica, generalni zaključak je da koeficijent prelaza mase neznatno zavisi od promene brzine fluida [18].

Zavisnost koeficijenta prelaza mase od Reynoldsovog broja prikazana je na slici 6. Koeficijent prelaza mase u ispitivanom opsegu Reynoldsovih brojeva, približno je konstantan. Eksperimentani podaci pokazuju, da režimi strujanja vertikalnog toka čestica i fluida, ne utiču značajnije na prenos mase.

Na slici 6, takođe su prikazani podaci za prenos mase u jednofaznom toku. Poređenjem rezultata dobijenih u jednofaznom toku fluida i pri transportu čvrstih čestica očigledno je intenziviranje prenosa u turbulentnom režimu transportnog toka čestica. Ulaskom sistema u režim paralelnog toka, kao i kod prenosa toplote, postaje zanemarljivo prisustvo čestica na intenzitet prenosa.

Analogija prenosa

Dobijeni rezultati eksperimentalnih ispitivanja upoređeni su u cilju uspostavljanja analogije prenosa. S obzirom da se radi o sistemu sa prisutnim česticama, prvo je napravljeno poredjenje prenosa mase i toplote. Dobijeni podaci za prenos preračunati su na veličine: prenosa toplote (j_H) i prenosa mase ($j_{D, \text{eksp.}}$) – slika 7.

Primetna je razlika u dobijenom rezultatu za prenos mase, tj. primetno su veće vrednosti faktora prenosa mase od vrednosti faktora prenosa toplote.

Eksperimentalna merenja prenosa toplote i mase vršena su na bitno različitim dužinama transportne cevi ($L_H/D_t = 27,56$, $L_D/D_t = 0,73$), tj. pri ovim merenjima termički granični sloj je bio formiran, dok su merenja prenosa mase vršena u zoni formiranja difuzionog graničnog sloja. Kao rezultat navedenih eksperimentalnih uslova dobijeni su veći koeficijenti prenosa mase.

Koristeći literaturnu korelaciju, za strujanje fluida u kratkim cevima [18]:

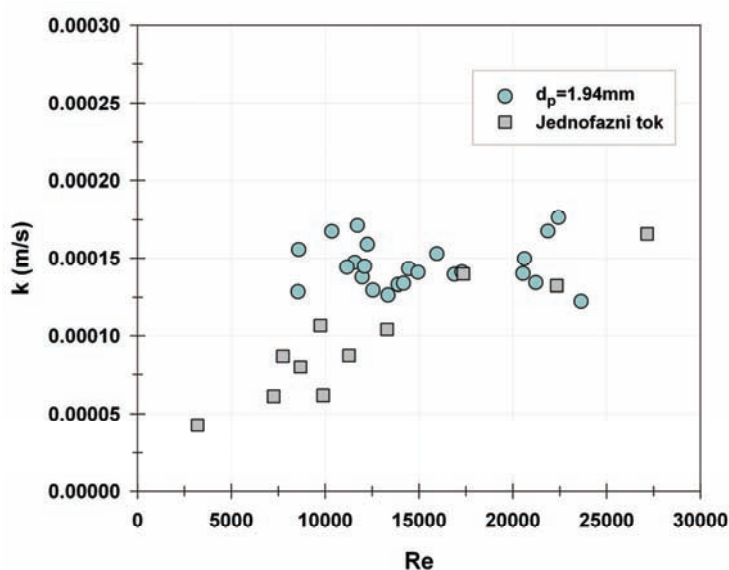
$$j_D = \frac{j_{D, \text{eksp.}}}{1 + 0,144 \text{Re}^{0,25} (D_t / L_D)} \quad \text{za } L_D / D_t \leq 10 \quad (27)$$

korigovane vrednosti eksperimentalno dobijenog faktora prenosa mase, pokazuju bolje slaganje sa eksperimentalnim vrednostima faktora prenosa toplote (slika 7).

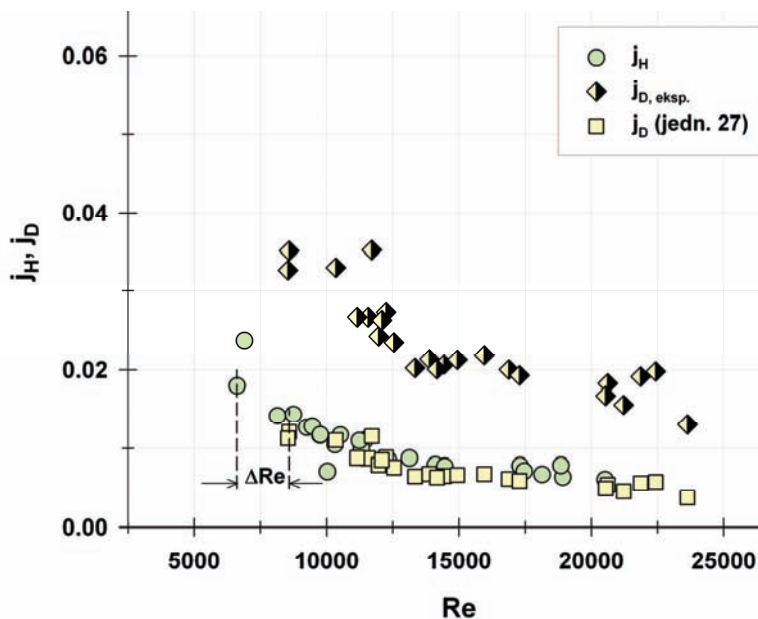
Na slici 7 je primećeno i da postoje različite vrednosti Reynoldsovog broja (ΔRe), za isti eksperiment, što je posledica pozicija zona merenja toplote i mase (slika 1), odnosno vrednosti srednjih temperatura u zonama merenja prenosa toplote ($T_{sr,f}$) i prenosa mase ($T_{\infty,2}$). Uticaj fizičkih parametara fluida na različitim temperaturama doveo je do različite vrednosti Re broja. Da bi se uporedili, dobijeni eksperimentalni rezultati su svedeni na iste uslove [22,30], korišćenjem zavisnosti (11):

$$(j_D)_{T_{sr,f}} = (j_D)_{T_{\infty,2}} \frac{(\text{Re}_m^{0,25})_{T_{\infty,2}}}{(\text{Re}_m^{0,25})_{T_{sr,f}}} \quad (28)$$

Uvođenjem koncepta pseudofluida, čime se vertikalni tok tretira kao jednofazni, izvršeno je poredjenje



Slika 6. Zavisnost koeficijenta prenosa mase od Reynoldsovog broja.
Figure 6. Relationship of k vs. Re .



Slika 7. Prenos toplote i prenos mase, u vertikalnom dvofaznom toku fluid–čestice.
Figure 7. Heat and mass transfer in vertical two-phase fluid–particle flow.

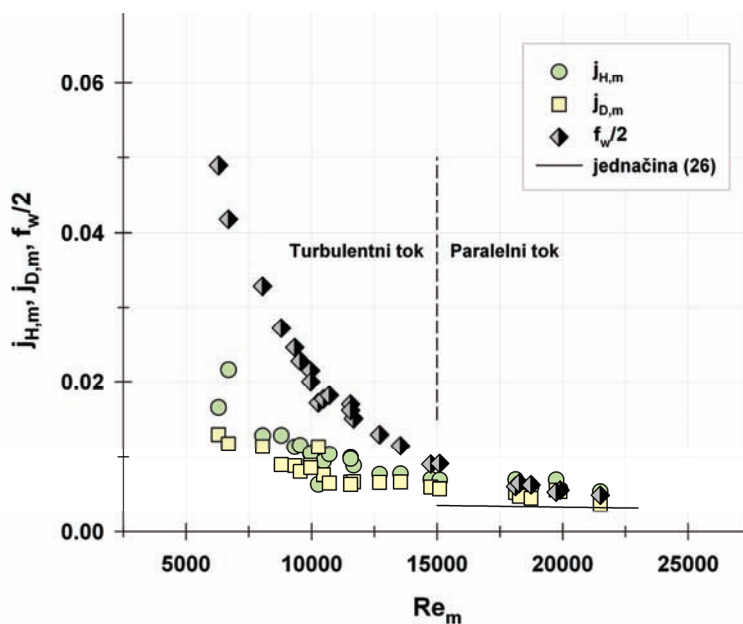
parametara prenosa količine kretanja, toplote i mase, u formi Cilton-Colburnove analogije. Na slici 8 su prikazane zavisnosti koeficijenta trenja pseudofluida o zid transportne cevi, faktora prenosa toplote i faktora prenosa mase od Reynoldsovog broja pseudofluida.

Analogije prenosa količine kretanja, toplote i mase, postoji pri većim vrednostima Reynoldsovog broja pseudofluida, odnosno u oblasti paralelnog režima strujanja pseudofluida ($Re_m > 15000$). Analogija prenosa toplote i mase postoji u celom opsegu ispitivanja.

Srednje apsolutno odstupanje podataka za prenos toplote ($j_{H,m}$) od podataka za koeficijent trenja pseudofluida o zid transportne cevi ($f_w/2$), je 12,74%, dok je srednje apsolutno odstupanje podataka za prenos mase ($j_{D,m}$) od trenja pseudofluida ($f_w/2$), 25,38% ($Re_m > 15000$).

ZAKLJUČAK

Izvršena su eksperimentalna ispitivanja istovremenim merenjem potrebnih parametara za definisanje



Slika 8. Analogija prenosa količine kretanja, toplote i mase u vertikalnom toku pseudofluida.
Figure 8. Analogy among momentum, heat and mass transfer, in vertical flow of pseudofluid.

prenosa količine kretanja, toplote i mase u vertikalnom transportnom sistemu tečnost–čestice.

Pri vertikalnom dvofaznom toku utvrđena su dva režima strujanja, turbulentni režim pri manjim brzinama i paralelni režim pri većim brzinama čestica i fluida. Promena režima strujanja definisana je parametrom γ^* . Karakteristična vrednost poroznosti za $\gamma^* = 0$ je $\varepsilon \cong 0,85$.

Rezultati ispitivanja prenosa toplote i mase su pokazali intenziviranje prenosa u režimu turbulentnog transportnog toka, u kome je evidentan uticaj čestica na termički i difuzioni granični sloj. U režimu paralelnog toka, čestice zbog manje koncentracije i pravolinijskog kretanja, ne utiču značajno na prenos toplote i mase, tako da se vrednosti koeficijentata prelaza približavaju vrednostima za jednofazni tok fluida.

U analizi rezultata korišćen je koncept pseudofluida, u cilju uspostavljanja analogije prenosa, u kome je vertikalni transportni tok tretiran kao jednofazni tok pseudofluida.

Eksperimentalno je dokazano da postoji analogija prenosa toplote i mase u celom opsegu ispitivanja, dok je analogija prenosa količine kretanja, toplote i mase utvrđena samo u paralelnom režimu transportnog toka.

Lista simbola

A_t	površina poprečnog preseka transportne cevi, m^2
c_{pf}	specifični toplotni kapacitet fluida, $J/kg^\circ C$
c_{pp}	specifični toplotni kapacitet čestica, $J/kg^\circ C$
c^*	rastvorljivost benzeove kiseline na granici faza, kg/m^3
c_f	masena koncentracija benzeove kiseline u fluidu, kg/m^3
d_p	prečnik čestica, m
D_t	prečnik transportne cevi, m
D_{AB}	koeficijent difuzije, m^2/s
f_f	koeficijent trenja fluid–zid transportne cevi
f_p	koeficijent trenja čestice–zid transportne cevi
f_w	koeficijent trenja smeše "fluid–čestice"–zid transportne cevi
F_e	gradijent pritiska usled efektivne težine čestica, Pa/m
F_f	gradijent pritiska usled trenja fluid–zid transportne cevi, Pa/m
F_p	gradijent pritiska usled trenja čestice–zid transportne cevi, Pa/m
F_w	gradijent pritiska usled trenja smeše "fluid–čestice"–zid transportne cevi, Pa/m
g	ubrzanje zemljine teže, m/s^2
G_f	maseni protok fluida kroz transportnu cev, kg/s
G_p	maseni protok čestica kroz transportnu cev, kg/s
j_D	faktor prenosa mase, $Sh/ReSc^{1/3}$
$j_{D,m}$	faktor prenosa mase zid–pseudofluid, $Sh/(Re_m Sc_m^{1/3})$
j_H	faktor prenosa toplote, $Nu/RePr^{1/3}$

$j_{H,m}$	faktor prenosa toplote zid–pseudofluid, $Nu/(Re_m Sh_m^{1/3})$
k	koeficijent prelaza mase, m/s
L_H	dužina zone zagrevanja, m
L_D	dužina zone prenosa mase, m
m	masa benzeove kiseline, kg
Nu	Nuselt-ov broj ($= \alpha D_t / \lambda_f$)
P	dinamički pritisak fluida u transportnoj cevi, Pa
Pr	Prandtl-ov broj, ($= \mu c_{pf} / \lambda_f$)
Pr_m	Prandtl-ov broj pseudofluida ($= \mu_m c_{pf} / \lambda_f$)
Re	Reynoldsov broj ($= D_t \rho_f U / \mu$)
Re_m	modifikovani Reynoldsov broj smeše fluid–čestice ($= D_t \rho_m U_m / \mu_m$)
S	unutrašnja površina zida kolone sa koje se vrši prenos mase, m^2
Sc	Schmidt-ov broj ($= \mu / \rho_f D_{AB}$)
Sc_m	Schmidt-ov broj pseudofluida ($= \mu_m / \rho_m D_{AB}$)
Sh	Sherwood-ov broj ($= k D_t / D_{AB}$)
t	vreme, s
T	temperatura, $^\circ C$
T_0	temperatura površine, $^\circ C$
T_∞	temperatura fluida, $^\circ C$
$T_{\infty,1}$	temperature fluida u ulaznoj zoni zagrevanja, $^\circ C$
$T_{\infty,2}$	temperature fluida u izlaznoj zoni zagrevanja, $^\circ C$
$T_{0,1}$	temperatura zida transportne cevi na ulazu pare u omotač, $^\circ C$
$T_{0,2}$	temperatura zida transportne cevi na izlazu pare iz omotača, $^\circ C$
$T_{sr,f}$	srednja temperatura fluida ($= (T_{\infty,1} + T_{\infty,2})/2$), $^\circ C$
U	površinska brzina fluida u transportnoj cevi, m/s
U_m	površinska brzina smeše fluid–čestice, m/s
U_t	brzina slobodnog taloženja, odnosno odnošenja usamljene čestice, m/s
v	brzina čestica u transportnoj cevi, m/s
V	protok vode kroz mlaznicu (sl. 1)
V_A	protok vode kroz dozer čvrstih čestica (sl. 1)
V_T	protok vode kroz transportnu cev (sl. 1)
z	vertikalna koordinata, m

Grčka slova

α	koeficijent prelaza toplote, $W/m^2 \cdot ^\circ C$
Δ	promena neke veličine
ε	poroznost u transportnoj cevi
γ	parametar režima strujanja smeše fluid–čestice, definisan jedn.(7)
γ^*	bezdimezioni parametar režima strujanja smeše fluid–čestice, definisan jedn.(8)
λ_f	koeficijent toplotne provodljivosti fluida, $W/m^\circ C$
μ	dinamička viskoznost fluida, Pa·s
μ_m	dinamička viskoznost smeše fluid–čestice, Pa·s
ρ_f	gustina fluida, kg/m^3
ρ_p	gustina čestica, kg/m^3
ρ_m	gustina smeše "fluid–čestice" ($= \varepsilon \rho_f + (1 - \varepsilon) \rho_p$), kg/m^3
δ_{sr}	srednje apsolutno odstupanje:

$$= 100 \frac{1}{n} \sum_1^n \frac{|j_{H,m} - (f_w / 2)|}{j_{H,m}},$$

$$= 100 \frac{1}{n} \sum_1^n \frac{|j_{D,m} - (f_w / 2)|}{j_{D,m}}, \%$$

Zahvalnica

Ovaj rad je urađen uz finasijsku pomoć Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije (projekat br.172022).

LITERATURA

- [1] J. Yerushalmi, A. Avidan, High-Velocity Fluidization, in Fluidization, Academic Press, London, 1985, pp. 225–291.
- [2] J.R. Grace, High-Velocity Fluidized Bed Reactors, Chem. Eng. Sci. **45** (1990) 1953–1966.
- [3] Y. Zheng, J.X. Zhu, J. Wen, S.A. Martin, A.S. Bassi, A. Margaritis, The Axial Hydrodynamic Behavior in Liquid-Solid Circulating Fluidized Bed, Can. J. Chem. Eng. **77** (1999) 284–290.
- [4] A. Cecen-Erbil, Annulus leakage and distribution of the fluid flow in a liquid spout–fluid bed with a draft tube. Chem. Eng. Sci. **58** (2003) 4739–4745.
- [5] Ž.B. Grbavčić, R.V. Garić, D.V. Vuković, Dž.E. Hadžismajlović, H. Littman, M.H. Morgan III., S.Đ. Jovanović, Hydrodynamic Modeling of Vertical Liquid-Solids Flow, Powder Technol. **72** (1992) 183–191.
- [6] R.V. Garić-Grulović, Ž.B. Grbavčić, Z.Lj. Arsenijević, Heat Transfer and Flow Pattern in Vertical Liquid-Solids Flow, Powder Technol. **145** (2004) 163–171.
- [7] K. Nakamura, C.E. Capes, Vertical Pneumatic Conveying: A Theoretical Study of Uniform and Annular Flow Models, Can. J. Chem. Eng. **51** (1973) 39–46.
- [8] C.E. Capes, K. Nakamura, Vertical Pneumatic Conveying: An Experimental Study with Particles in the Intermediate and Turbulent Flow Regimes, Can. J. Chem. Eng. **51** (1973) 31–38.
- [9] W.C. Yang, A Correlation for Solids Friction Factor in Vertical Pneumatic Conveying Lines, AIChE J. **24** (1978) 548–552.
- [10] L.S. Leung, The Ups and Down of Gas-Solids Flow – A Review, in Fluidization, 3rd Eng. Found. Conf., Proc., N.H. Henniker, J. Matsen, J.H. Grace, Eds., Plenum Press, New York, 1980, pp. 25–68.
- [11] R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, Transport Phenomena, Wiley, New York, 1960.
- [12] H. Konno, S.J. Saito, Pneumatic Conveying of Solids Through Straight Pipes, J. Chem. Eng. Japan **2** (1969) 211–217.
- [13] R. Garić, Ž. Grbavčić, Lj. Rožić, Indirect determination of the particle-wall friction coefficient in the vertical pneumatic and hydraulic conveying of coarse particles, J. Serb. Chem. Soc. **61** (1996) 391–400.
- [14] J.Y. Day, H. Littman, M. H. Morgan III, A New Choking Velocity Correlation for Vertical Pneumatic Conveying, Chem. Eng. Sci. **45** (1990) 355–360.
- [15] N.J. Heppel, Measurement of the liquid-solid heat transfer coefficient during continuous sterilization of liquids containing particles, in Proceedings of 4th Int. Cong. on engineering and food, Edmonton, Alberta, Canada, 1985.
- [16] S. Mankad, K.M. Nixon, P.J. Fryer, Measurements of particle-liquid heat transfer in systems of varied solids fraction, J. Food Eng. **31** (1997) 9–33.
- [17] M. Barigou, S. Mankad, P.J. Fryer, Heat transfer in two-phase solid-liquid food flows: a review, Food Bioprod. Process. **76** (1998) 3–29.
- [18] R.V. Garić-Grulović, Ž.B. Grbavčić, N.M. Bošković-Vragolović, Z. Lj. Arsenijević, Mass transfer in vertical liquid–solids flow of coarse particles, Powder Technol. **189** (2009) 130–136.
- [19] J. Welty, C.E. Wicks, G.L. Rorrer, R.E. Wilson, Fundamentals of Momentum, Heat and Mass transfer, 5th ed., John Wiley and Sons, New York, 2008.
- [20] M. Kuriyama, E. Harada, H. Konno, Analogy between heat and momentum transfer for the flow of solid-liquid suspension in a cylindrical pipe, Int. Chem. Eng. **30** (1990) 703–711.
- [21] T.H. Chilton, A.P. Colburn, Mass transfer (absorption) coefficients: Prediction from Data on Heat Transfer and Fluid Friction, Ind. Eng. Chem. **26** (1934) 1183–1187.
- [22] H.J. Perry, Chemical Engineer's Handbook, 6th ed., McGraw-Hill, New York, 1987.
- [23] S. Kumar, S.N. Upadhyay, V.K. Mathur, On the Solubility of Benzoic Acid in Aqueous Carboxymethylcellulose Solutions, J.Chem. Eng. Data **23** (1978) 139–141.
- [24] J.P. Couderc, in J. F. Davidson, R. Clift, D. Harrison (Eds.), Fluidization, Academic Press, London, 2nd ed., (1985), Ch. I. p. 1.
- [25] Ž.B. Grbavčić, R.V. Garić, Dž.E. Hadžismajlović, S.Dj. Jovanović, D. V. Vuković, H. Littman, H. M. Morgan III, Variational Model for Prediction of the Fluid-Particle Interphase Drag Coefficient and Particulate Expansion of Fluidized and Sedimenting Beds, Powder Technol. **68** (1991) 199–211.
- [26] P.A. Shamlou, Hydraulic Transport of Particulate Solids, Chem. Eng. Comm. **62** (1987) 233–249.
- [27] R. Di Felice, P.U. Foscolo, L.G. Gibilaro, S. Rapagna, The interaction of particles with a fluid-particle pseudo-fluid, Chem. Eng. Sci. Short Commun. **46** (1991) 1873–1877.
- [28] R.V. Garić-Grulović, Ž.B. Grbavčić, Z.Lj. Arsenijević, A pseudo-fluid representation of vertical liquid-coarse solids flow, J. Serb. Chem. Soc. **70** (2005) 775–784.
- [29] E. Barnea, J. Mizrahi, A generalized approach to the fluid dynamics of particulate systems: Part 1. General correlation for fluidization and sedimentation in solid multi-particle systems, Chem. Eng. J. **5** (1973) 171–189.
- [30] A.P. Duduković, Proučavanje uticaja koaksijalno postavljenih objekata na prenos mase po zidovima cilindričnih cevi i na otpore strujanju adsorpcionom metodom, magistarski rad, TMF, Beograd, 1977.

SUMMARY**MOMENTUM, HEAT, AND MASS TRANSFER ANALOGY FOR VERTICAL HYDRAULIC TRANSPORT OF INERT PARTICLES**

Darko R. Jačimovski¹, Radmila V. Garić-Grulović¹, Željko B. Grbavčić², Mihal M. Đuriš¹,
Nevenka M. Bošković-Vragolović²

¹*ICH_{TM} - Department for Catalysis and Chemical Engineering, Njegoseva 12, Belgrade, Republic of Serbia*

²*Faculty of Technology and Metallurgy, Karnegijeva 4, Belgrade, Republic of Serbia*

(Scientific paper)

Wall-to-bed momentum, heat and mass transfer in the vertical liquid-solids flow, as well as in the single phase flow, were studied. The aim of this investigation was to establish the analogy among those phenomena. Also, effect of particle concentration on momentum, heat and mass transfer was studied. The experiments in hydraulic transport were performed in 25.4 mm I.D. cooper tube equipped with a steam jacket, using spherical glass particles of 1.94 mm in diameter and water as a transport fluid. The segment of the transport tube used for mass transfer measurements had internal coating made of benzoic acid. In the hydraulic transport two characteristic flow regimes were observed: turbulent and parallel particle flow regime. The transition between two characteristic regimes ($\gamma^* = 0$), occurs at a critical voidage $\varepsilon \approx 0.85$. The vertical two-phase flow was considered as the pseudofluid, and modified mixture-wall friction coefficient (f_w) and modified mixture Reynolds number (Re_m) were introduced for system characterization. Experimental data show that the wall-to-bed momentum, heat and mass transfer coefficients, in vertical flow of pseudofluid, for the turbulent regime are significantly higher than in parallel regime. Wall-to-bed, mass and heat transfer coefficients in hydraulic transport of particles were much higher than in single-phase flow for lower Reynolds numbers ($Re < 15000$), while for high Reynolds numbers ($Re > 15000$), there was not significant difference. The experimental data for wall-to-bed momentum, heat and mass transfer in vertical flow of pseudofluid in parallel particle flow regime, verify analogy among these three phenomena.

Keywords: Vertical flow liquid-particles •
Flow regime • Momentum transfer •
Heat transfer • Mass transfer • Analogy