

Problem određivanja osnovnih hidrodinamičkih parametara potrebnih za dimenzionisanje podova sa prelivnim uređajem

Dr Branislav Jaćimović, dipl. inž., Mašinski fakultet, Beograd, dr Slobodan Ristić, dipl. inž., Viša mašinska škola, Beograd, Srbislav Genić dipl. inž., Mašinski fakultet, Beograd

U radu je izvršena uporedna analiza rezultata sopstvenih istraživanja i proračunskih postupaka iz literature za definisanje osnovnih hidrodinamičkih parametara (visina sloja čiste tečnosti na podu, visina sloja pene, pad pritiska na podu itd.), potrebnih za dimenzionisanje sitastih podova sa prelivnim uređajem.

U kaskadnim difuzionim kolonama, kontakt između faza se odvija na kontaktnim elementima – podovima – barbotadžom (prođuvavanjem) gasa (pare) kroz sloj tečnosti. Na taj način se formira heterogeni sloj sa površinom kontakta koja razdvaja faze i koji se naziva *dvofazni dinamički sloj* ili *barbotadžni sloj*. Zbog uzajamnog dejstva između faza kod barbotadžnog sloja su forma i priroda strujanja faza drugačiji i složeniji u odnosu na strujanje jednofaznih sistema. Hidrodinamičko stanje dvofaznog sistema u opštem slučaju zavisi od protoka faza koje su u kontaktu, geometrijskih karakteristika kontaktnih elemenata na podu i termofizičkih svojstava faza.

Proračun apsorpcionih i destilacionih kolona sa podovima obuhvata tehnološki proračun (određivanje potrebnog broja podova za ostvarivanje zadatih parametara razdvajanja) i strujni proračun (dimenzionisanje kolone). Ova dva dela proračuna su u uzajamnoj vezi, jer od hidrodinamičkih parametara zavisi efikasnost poda (uticaj podužnog mešanja na efikasnost razmene materija). Strujni proračun, u inženjerskoj praksi, podrazumeva određivanje parametara, kao što su pad pritiska gasa, visina sloja čiste tečnosti i visina sloja pene na podu, od kojih zavisi izbor prečnika kolone i rastojanja između podova.

Zbog složenog hidrodinamičkog stanja koje vlada na podu, strujni proračun nije moguće izvršiti na osnovu izraza koji slede teorijskom analizom, već se do rezultata interesantnih za praktičnu primenu dolazi eksperimentalnim putem.

Po svojoj konstrukciji, podovi se izvode kao sitasti, ventilski, tunelski, sa zvonima itd. Sitasti podovi se od 50-tih godina sve više primenjuju zahvaljujući jednostavnoj konstrukciji i većem kapacitetu aparata za posmatrani prečnik kolone, u odnosu na većinu ostalih kontaktnih elemenata.

U ovom radu su razmatrani osnovni aspekti strujnog proračuna sitastih podova na bazi sopstvenih merenja i relevantnih literaturnih podataka.

Merenja hidrodinamičkih parametara barbotadžnog sloja je izvršeno na eksperimentalnoj instalaciji koja se nalazi na Mašinskom fakultetu u Beogradu [1], u sistemu voda-vazduh.

U staklenu kolonu prečnika \varnothing 314 mm ugrađen je sitasti pod od bakra sledećih geometrijskih karakteristika:

- prečnik otvora \varnothing 6 mm;
- korak otvora 15 mm;

- živi presek poda 7,96%;
- visina prelivnika 35 mm.

Ispitivanja su izvršena u regularnom radnom režim poda, pri protocima vode od 0,82–3 m³/h i brzinama strujanja vazduha (svedenim na pun poprečni presek kolone) od $W_{go} = 0,8 - 1,9$ m/s.

1. Pad pritiska

Ukupni pad pritiska pri strujanju gasa preko okvašenog poda (Δp_t , Pa) se može izračunati pomoću izraza:

$$\Delta p_t = \Delta p_{sp} + \Delta p_l + \Delta p_o \quad (1)$$

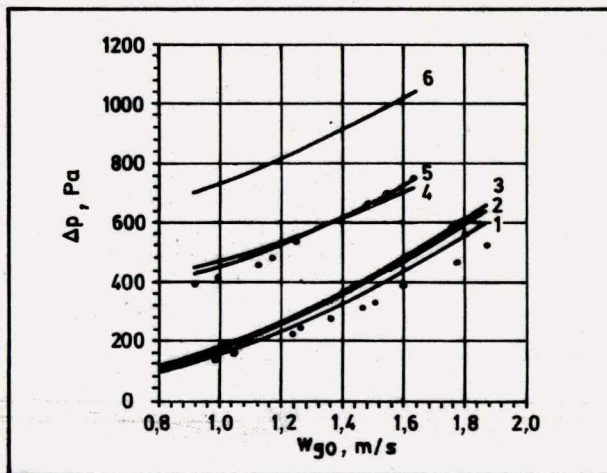
gde su:

- Δp_{sp} , Pa, pad pritiska pri strujanju gasa preko suvog poda,
- Δp_l , Pa, hidrostatički pritisak sloja tečnosti na podu,
- Δp_o , Pa, pad pritiska usled stvaranja mehurova odnosno formiranja barbotadžnog sloja (tzv. ostatak pada pritiska).

Izvedena su ispitivanja pri strujanju gasa preko suvog i preko okvašenog poda. Rezultati eksperimenta su poređani sa literaturnim podacima datim u [2, 3, 4] i prikazani su na sl. 1.

Na osnovu rezultata merenja može se zaključiti sledeće:

- za slučaj strujanja gasa preko suvog poda empirijske formule iz [2], [3] i [4] pokazuju dobro slaganje sa eksperimentalnim rezultatima, pri čemu su izmerene vrednosti nešto manje u odnosu na izračunate;
- za slučaj strujanja gasa preko okvašenog poda metodi izloženi u [2] i [3] pokazuju zadovoljavajuće slaganje sa izmerenim vrednostima, dok se prema [4] dobijaju vrednosti znatno veće od izmerenih za sve radne režime obuhvaćene ovim istraživanjem.



Slika 1. Pad pritiska na suvom (linije 1, 2 i 3) i okvašenom podu pri protoku tečnosti od 1 m³/h (linije 4, 5 i 6); 1 – [3], 2 – [4], 3 – [2], 4 – [2], 5 – [3], 6 – [4], * – izmerene vrednosti

2. Određivanje visine sloja čiste tečnosti na podu

U raspoloživoj literaturi postoje brojne preporuke za procenu visine sloja tečnosti na podu, ali se pokazuje da je rasipanje izračunatih vrednosti na osnovu empirijskih izraza veliko. Analizom empirijskih jednačina iz izvora [5, 6, 7, 8 i 9] može se zaključiti sledeće:

- sa povećanjem visine prelivnika povećava se visina sloja tečnosti;
- visina sloja tečnosti raste sa povećanjem protoka tečnosti;
- sa povećanjem protoka gasa smanjuje se visina sloja tečnosti.

Jednačina predložena u [9] uključuje još neka svojstva gasovite faze osim gustine (viskoznost i površinski napon), što navodi na zaključak da su ispitivani pored sistema voda - vazduh i drugi dvofazni sistemi.

Na slici 2. predstavljena je promena visine sloja čiste tečnosti na podu u funkciji brzine strujanja gasa, pri protoku tečnosti od 2 m³/h. Pri ostalim ispitanim protocima dobijaju se slični dijagrami.

Poređenjem izmerenih i izračunatih vrednosti potvrđeno je da visina sloja čiste tečnosti na podu raste sa povećanjem protoka tečnosti, što se na osnovu jednačina iz literature [5, 6, 7, 8 i 9] moglo i očekivati.

Na osnovu rezultata merenja utvrđeno je da visina sloja tečnosti na podu raste i sa povećanjem protoka gasa, što je u suprotnosti sa izrazima iz literature, a može se uočiti na slici 2.

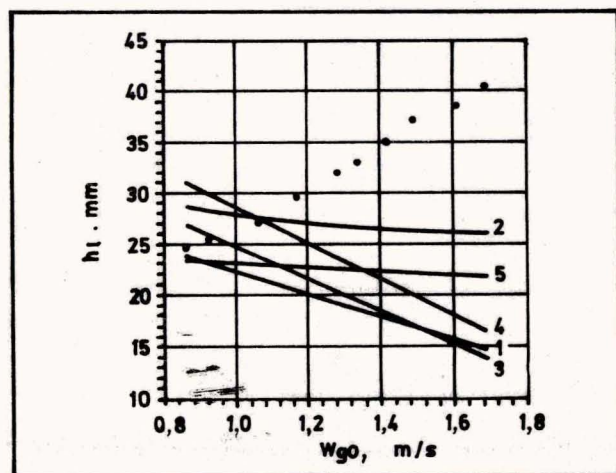
Prema [10] visina sloja čiste tečnosti na podu (h_p , m) se može proceniti na osnovu poznatih padova pritisaka za gasovitu fazu za strujanje preko suvog i okvašenog poda:

$$h_p = \frac{\Delta p_t - \Delta p_{sp}}{\rho_l \cdot g} \quad (2)$$

gde je: q_p , kg/m³, gustina tečnosti, a $g = 9,81$ m/s², ubrzanje Zemljine teže.

Očigledno je da je u [10] zanemaren Δp_o , kao veličina manjeg reda u odnosu na Δp_{sp} i Δp_t .

Na slici 3. prikazano je korelaciono polje izračunatih vrednosti visina sloja tečnosti pomoću jednačine (2) od izmerenih vrednosti. Na apscisi su nanete izmerene, a na ordinatu izračunate vrednosti. Za ceo opseg merenja utvrđeno je da



Slika 2. Visina sloja tečnosti na podu u funkciji brzine strujanja gasa svedene na puni poprečni presek kolone pri protoku tečnosti od 2 m³/h; 1 - [5], 2 - [6], 3 - [7], 4 - [8], 5 - [9], * - izmerene vrednosti

srednje kvadratno odstupanje iznosi $\Delta sr = 9,4\%$, što znači da se pomoću jednačine (2) može sa zadovoljavajućom preciznošću proceniti visina sloja čiste tečnosti na podu [15].

3. Određivanje visine sloja pene

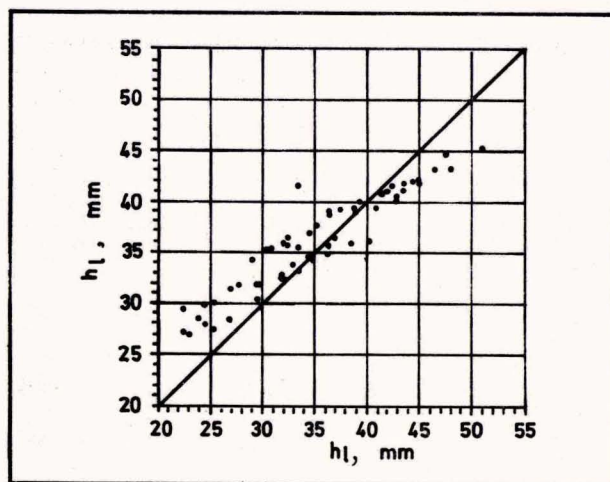
Raspedela tečnosti i gasa u barbotaznom sloju karakteriše se pomoću poroznosti dvofaznog hidrodinamičkog sloja (ρ , m³/m³), pod kojom se podrazumeva zapremina disperzne faze (gas) koja se nalazi u datom momentu u jedinici zapremine barbotaznog sloja. Poroznost karakteriše sposobnost zadržavanja disperzne faze u barbotaznom sloju.

Poroznost dvofaznog hidrodinamičkog sloja se menja u zavisnosti od hidrodinamičkog radnog režima i ima značajan uticaj na intezitet prenosa materije iz razloga što je vrednost ove veličine u razmeri sa veličinom površine faznog kontakta.

Između poroznosti pene, visine sloja čiste tečnosti i visine pene na podu, može se uspostaviti relacija:

$$h_l/h_g = 1 - \rho \quad (3)$$

gde je h_g , m, visina barbotaznog sloja (sloja pene na podu).



Slika 3. Korelaciono polje prema izrazu (2)

Na osnovu dimenzione analize izložene u [11] utvrđeno je da poroznost pene zavisi u opštem slučaju od tri bezdimenziona kriterijuma i tri simpleksa:

$$\text{Fr} = \frac{2}{g \cdot l}$$

Frudov broj:

$$\text{Re} = \frac{w_g l \rho_l}{\mu_l}$$

Rejnoldsov broj:

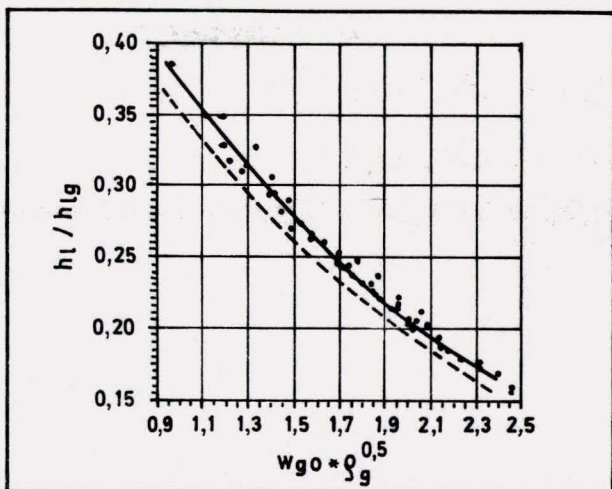
$$\text{We} = \frac{\rho}{g \rho_l l^2}$$

Veberov broj:

- U/w_g
- r_l/r_g
- m_l/m_g

gde su:

- w_g , m/s, brzina gasa svedena na površinu barbotaznog sloja,
- U , m³/(m²s), gustina orošavanja (zapreminski protok tečnosti sveden na površinu barbotaznog sloja),
- l , m, karakteristična geometrijska veličina,



Slika 4. Promena h_1/h_{1g} u funkciji proizvoda $w_{go} \rho_g^{0,5}$ (* – izmerene vrednosti)

- μ_l , N s/m² – koeficijent dinamičke viskoznosti tečnosti,
- μ_g , N s/m² – koeficijent dinamičke viskoznosti gasa,
- σ , J/m² – koeficijent površinskog napona.

U opštem slučaju u funkcionalnu zavisnost mogu biti uključeni karakteristični geometrijski simpleksi $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots$, pa se poroznost barbotažnog sloja može iskazati relacijom:

$$\varphi = f(Re, Fr, We, U/w_g, \rho_l/\rho_g, \Gamma_1, \Gamma_2, \dots)$$

Posebnu teškoću pri analizi predstavlja izbor karakteristične geometrijske veličine l . Predloženo je da to bude visina sloja čiste tečnosti na podu, ili ekvivalentni prečnik otvora na podu.

Provera visine sloja pene u odnosu na izmerene vrednosti je izvršena prema izrazima iz [12, 13 i 14]. Prema [12] visina sloja pene direktno zavisi od brzine strujanja gasa, dok se u [13] i [14] smatra da ona zavisi samo od Frudovog broja.

Na slici 4. prikazana je promena h_1/h_{1g} u funkciji proizvoda $w_{go} \rho_g^{0,5}$. Karakter ove promene potvrđuje eksponencijalnu zavisnost prema [12] (isprekidana linija). Na osnovu izmerenih vrednosti dobijena je regresiona zavisnost [15]:

$$h_1/h_{1g} = 0,673 \exp(-0,586 w_{go} \rho_g^{0,5}) \quad (4)$$

pri čemu je korelacioni odnos $\theta = 0,994$ i srednje kvadratno odstupanje $\Delta_\rho = 2,1\%$, (puna linija).

Ukoliko se usvoji da poroznost pene zavisi samo od Frudovog broja, u kome je karakteristična geometrijska veličina visina sloja čiste tečnosti, kao što je preporučeno u [13, 14], onda se na osnovu izmerenih vrednosti dobija kriterijalna jednačina:

$$h_1/h_{1g} = 0,521 \exp(-97,1 Fr) \quad (5)$$

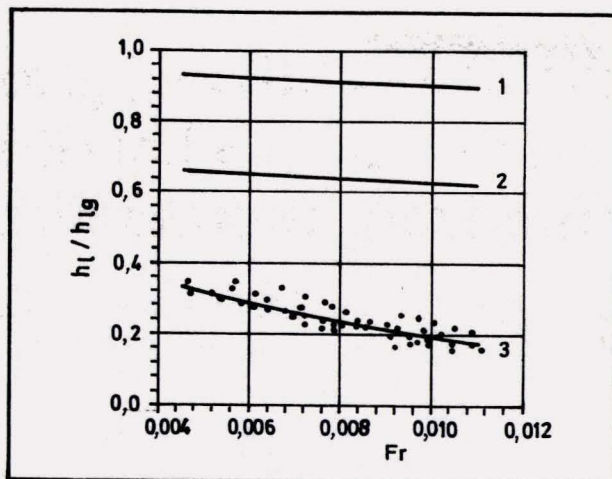
za koju su statistički pokazatelji ($\theta = 0,865$ i $\Delta_{\text{kr}} = 10,3\%$) lošiji u odnosu na pokazatelje za jednačinu (4).

Na slici 5. prikazano je korelaciono polje $h_1/h_{1g}(Fr)$, a linija 3 predstavlja funkcionalnu zavisnost (5).

Na dijagramu (slika 5) je lako uočljivo da postoji znatno odstupanje izmerenih od izračunatih vrednosti prema [13 i 14].

4. Zaključak

Cilj ovog rada je da se pokaže složenost problematike proračuna osnovnih hidrodinamičkih parametara potrebnih za dimenzionisanje sitastih podova sa prelivnim uređajima. Analiza rezultata ispitivanja i njihovog poređenja sa relevantnim literaturnim izvorima upućuje na zaključak da pre-



Slika 5. Zavisnost h_1/h_{1g} u funkciji Fr : 1 – [4], 2 – [13], 3 – jednačina (5), * – izmerene vrednosti

poruke iz literature treba prihvatiti sa određenom rezervom. Jasno je da su neophodna dalja ispitivanja u ovoj oblasti.

Literatura

- [1] JAČIMOVIĆ, B., Ristić, S.: *Uznošenje tečnosti na podovima sa tunelskim kontaktnim elementima u kaskadnim difuzionim kolonama*, Procesna tehnika 1, 1991.
- [2] TREYUBAL, R., E.: *Mass-Transfer Operations*, McGraw-Hill Kogakusha Ltd., 1981.
- [3] STABNIKOV, V. N.: *Rasčet i konstruovanje kontaktnih ustrojev rektifikacionih i absorpcionih aparata*, Tehnika, Kiev, 1970.
- [4] COULSON, J., M., Richardson, J., F., Sinnott, R., K.: *Chemical Engineering*, Vol. 6, Pergamon Press Ltd, Oxford, 1983.
- [5] FOSS, A., S., Gerster, J., A.: *Chemical Engineering Progress*, 59, 1963.
- [6] FRANK, O.: *Shortcut For Distillation Design*, Chemical Engineering, Vol. 84, 1977.
- [7] BARKER, P., E., Self, M., F.: *The Evaluation of Liquid Mixing Effect on a Sieve Plates Using Unsteady and Steady State Tracer Techniques*, Chemical Engineering Science, Vol 7, 1962.
- [8] * * *: *Bubble-Tray Design Manual*, AIChE, New York, 1958.
- [9] HAMAD, M., A., Pavlov, V., P.: *Trudi MIHM*, 1969.
- [10] KAŠTANEK, F.: *Collection of Czechoslov. Chem. Commun.*, Vol. 35, 1970.
- [11] KUTATELJADZE, S., S. Strikovič, M., A.: *Gidravlika gazožidkostnih sistem*, Gosnergoidat, Moskva, 1958.
- [12] GILBERT, T., J.: *Liquid Mixing on Bubble-cap and Sieve Plates*, Chemical Engineering Science, 1959.
- [13] RODIONOV, A., I., Vinter, A., A.: *Teor. osn. him. tehnol.*, 1967.
- [14] AZBELJ, D. S.: *Himičeskaja promišlenost*, Vol 11, 1962.
- [15] JAČIMOVIĆ, B., Genić, S., Miletić, V., Ristić, S.: *Problem određivanja visine sloja čiste tečnosti na sitastim podovima*, XXXIV savetovanje Srpskog hemijskog društva, Beograd, 1992.