

SRĐAN M. PEJANOVIĆ

Tehnološko–metalurški fakultet
Univerziteta u Beogradu

NAUČNI RAD

532.54+66–912:532.5.001.5

APSORPCIJA U KOLONI SA POKRETNIM PUNJENJEM

I. Hidrodinamička ispitivanja

Zapremina zadržane tečnosti, pad pritiska, dinamička visina sloja i minimalna brzina fluidizacije ispitivani su u koloni sa trofaznim fluidizovanim slojem inertnih sfera, u funkciji operativnih promenljivih – protoka tečnosti i gasa i gustine punjenja, sa ciljem da se objasne promene apsorpcionih karakteristika kolone, pri promeni operativnih promenljivih, koje će biti razmatrane u drugom delu ovog rada.

Iako su kolone sa pokretnim punjenjem prvi put upotrebljene u aluminijumskoj industriji SAD i Kanade još 1959. godine, suštinski doprinos razmatranju njihovog funkcionisanja dali su O Neill i saradnici [1] tek 1972. godine. Oni su zaključili da su kod trofazne fluidizacije moguća dva, suštinski različita, režima rada – bez i sa početnim plavljenjem sloja.

U režimu bez početnog plavljenja sloja, koji je karakterističan za male gustine punjenja, minimalna brzina fluidizacije sloja dostiže se pre brzine plavljenja sloja i stoga zavisi od gustine punjenja, dok zapremina zadržane tečnosti u sloju praktično ne zavisi od brzine gasa. Na taj način se ostvaruje relativno mala međufazna aktivnost. Konstatovano je za sistem voda–vazduh, da je za gustine punjenja veće od $0,3 \text{ g/cm}^3$ nemoguće ostvariti režim bez početnog plavljenja sloja, već kolona radi u režimu sa početnim plavljenjem sloja, u kojem sloj ekspanduje tek pošto je već dostignuta brzina plavljenja. Povećanjem brzine gasa iznad minimalne brzine fluidizacije film tečnosti ostaje u stanju početnog plavljenja, jer svaki dalji porast međufazne aktivnosti koji bi vodio pravom plavljenju, sistem kompenzuje ekspanzijom sloja. Zbog toga zapremina zadržane tečnosti u sloju raste i sa porastom protoka gasa i sa porastom gustine punjenja, dok minimalna brzina fluidizacije ne zavisi od gustine punjenja.

Mogućnost povećanja intenziteta međufazne aktivnosti povećanjem gustine punjenja predstavlja ogromnu prednost rada u režimu sa početnim plavljenjem sloja.

Još je jedna značajna prednost kolona sa pokretnim, u odnosu na kolone sa nepokretnim punjenjem. Kod njih, naime, nije prisutan statički deo zapremine zadržane tečnosti u sloju, sa ograničenim doprinosom međufaznom prenosu, već jesva zadržana tečnost u sloju operativna i učestvuje u prenosu mase, pod uticajem

turbulentnog kretanja i stalnog sudaranja sfernih elemenata punjenja [2].

Stoga je osnovni zadatak ovog rada da se ispita hidrodinamičko ponašanje (zapremina zadržane tečnosti, pad pritiska, dinamička visina sloja i minimalna brzina fluidizacije, u koloni sa pokretnim punjenjem, u režimu sa početnim plavljenjem sloja. Poznavanje ovog ponašanja u funkciji protoka tečnosti i gasa i gustine punjenja, pruža mogućnost da se objasne promene karakteristika prenosa mase u koloni sa pokretnim punjenjem, pri promeni operativnih promenljivih, koje će biti razmatrane u drugom delu ovog rada.

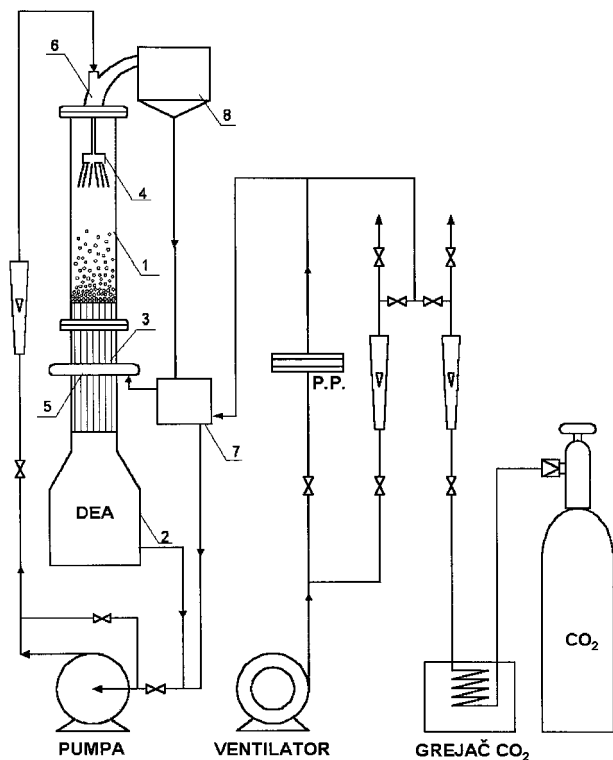
EKSPERIMENTALNI DEO

Ekperimentalna aparatura shematski je prikazana na slici 1.

U kolonu prečnika $\phi 110/120 \text{ mm}$. i dužine 1350 mm., odozdo je kroz raspodeljivač specijalne konstrukcije, uvođen gas protokom $6,0 - 23,5 \text{ m}^3/\text{h}$, a odozgo kroz raspodeljivač u obliku tuša, tečnost protokom $400 - 1600 \text{ l/h}$. Neposredno iznad raspodeljivača gasa nasipano je sferno polipropilensko punjenje, prečnika 10 mm. i gustine $0,322 \text{ g/cm}^3$. Statička visina sloja punjenja iznosi je 210 mm. Izuzetno su korišćene i gustina punjenja od $0,988 \text{ g/cm}^3$ i statička visina sloja od 110 mm., da bi se utvrdio uticaj gustine punjenja na minimalnu brzinu fluidizacije, pad pritiska u sloju i zapreminu zadržane tečnosti u sloju, ali je to posebno naglašeno u tekstu ili tabelama. Ispod kolone postavljen je rezervoar za tečnost iz kojeg je tečnost pumpom odvođena na vrh kolone u recirkulacionom toku. U okviru hidrodinamičkih ispitivanja kao gas je korišćen vazduh, a kao tečnost voda. Detaljan opis aparature dat je u literaturi [3]. Protok gasa meren je prigušnom pločom, a tečnosti rotametrom.

Zapremina zadržane tečnosti u sloju određivana je na osnovu podizanja nivoa tečnosti u rezervoaru, pri trenutnom zaustavljanju svih tokova. Pad pritiska u sloju meren je U manometrom, a dinamička visina sloja i minimalna brzina fluidizacije određivani su vizuelno.

Adresa autora: Srđan Pejanović, Tehnološko–metalurški fakultet, 11000 Beograd, Karnegijeva 4
e–mail adresa: ognjenpc@beotel.yu
Rad primljen: Jun 10, 2003
Rad prihvaćen: Jul 10, 2003



Legenda: 1. Kolona, 2. Rezervoar, 3. Raspođeljivač gas-tečnost, 4. Raspođeljivač tečnosti, 5. Raspođeljivač gasa, 6. Kapa kolone, 7. Mešač gasova, 8. Odvajač kapi

Slika 1. Shema eksperimentalne aparature
Figure 1. Experimental set-up

REZULTATI I DISKUSIJA

U tabeli 1 prikazana je promena minimalne brzine fluidizacije pri promeni protoka tečnosti za dve različite visine nasutog sloja punjenja i dve različite gustine pakovanja.

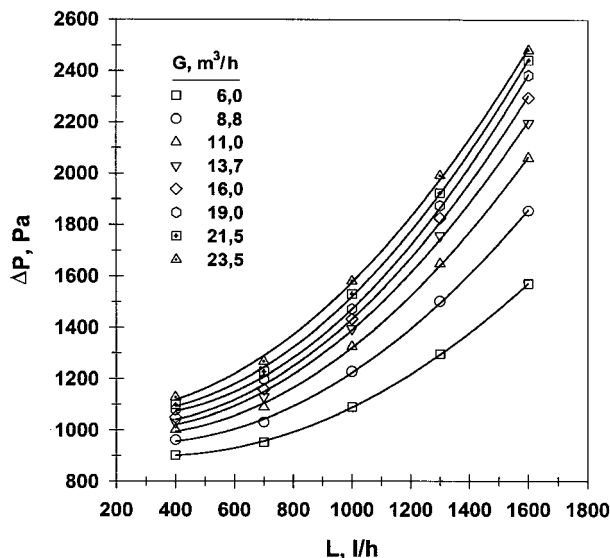
Minimalna brzina fluidizacije opada sa porastom protoka tečnosti, raste sa statičkom visinom sloja punjenja i praktično ne zavisi od gustine punjenja. Ovakvo ponašanje zabeleženo je i u literaturi [4,5,6].

S druge strane računskim određivanjem brzine plavljenja iz Lobovog dijagrama [7], konstatovano je da je ona pri svim korišćenim eksperimentalnim uslovima značajno manja od dobijenih vrednosti minimalne brzine fluidizacije. Na taj način potvrđeno je da kolona radi u

Tabela 1. Minimalni protok fluidizacije u funkciji protoka tečnosti, gustine punjenja i statičke visine sloja

Table 1. Minimum fluidization flow-rate as a function of liquid flow-rate, packing density and static bed height

	L (l/h)	400	700	1000	1300	1600
V_{mF} (m^3/h)	$h_0=210mm$ $\rho_p=0,322$ (g/cm ³)	7,7	7,1	6,6	6,1	5,8
	$h_0=110mm$ $\rho_p=0,322$ (g/cm ³)	7,0	5,3	4,5	4,0	3,3
	$h_0=110mm$ $\rho_p=0,988$ (g/cm ³)	7,0	5,2	4,7	4,2	3,5



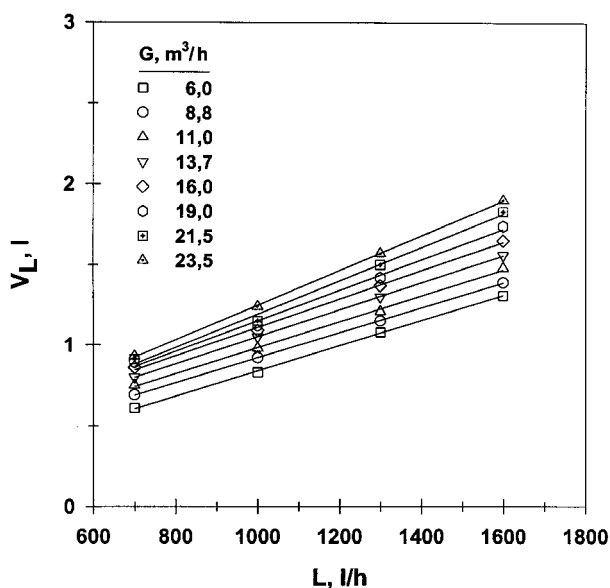
Slika 2. Zavisnost pada pritiska u sloju od protoka tečnosti i gasa
Figure 2. Pressure drop vs. liquid and gas flow-rate

režimu sa početnim plavljenjem sloja, za koji je karakteristično da minimalna brzina fluidizacije ne zavisi od gustine punjenja.

Zavisnost pada pritiska u sloju od protoka tečnosti i gasa prikazana je na dijagramu na slici 2.

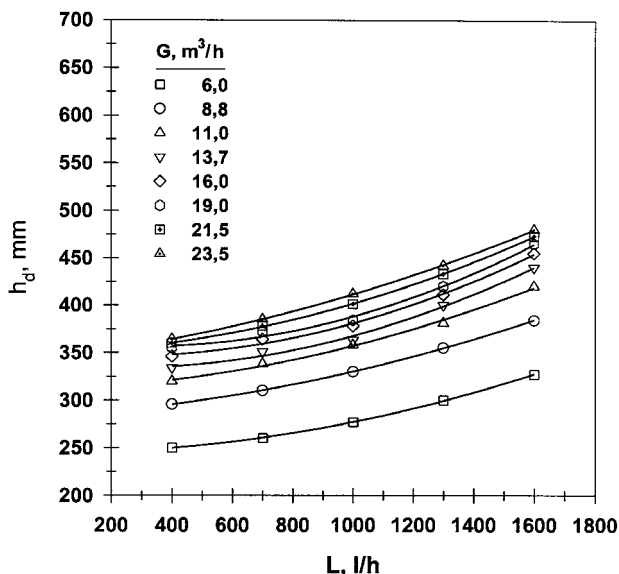
Pad pritiska u sloju raste i sa porastom protoka tečnosti i sa porastom protoka gasa, što je zabeleženo i u literaturi [4,5,8]. Pri protoku tečnosti od 1000 l/h i gasa od 22,5 m³/h i statičkoj visini sloja punjenja od 110 mm, pad pritiska za punjenje gustine 0,322 g/cm³ iznosi 1030 Pa, odnosno 1795 Pa, respektivno, što znači da pad pritiska u sloju značajno raste i sa porastom gustine punjenja.

Zavisnost zapremine zadržane tečnosti u sloju od protoka tečnosti i gasa, prikazana je na dijagramu na slici 3 i dobro se slaže sa rezultatima iz literature [5].



Slika 3. Zavisnost zapremine zadržane tečnosti u sloju od protoka tečnosti i gasa

Figure 3. Liquid hold up vs. liquid and gas flow-rate



Slika 4. Zavisnost dinamičke visine sloja od protoka tečnosti i gasa

Figure 4. Dynamic bed height vs. liquid and gas flow-rate

Zapremina zadržane tečnosti u sloju, određena je i za dve različite gustine punjenja od $0,322 \text{ g/cm}^3$ i $0,988 \text{ g/cm}^3$, pri istim uslovima pri kojima je određena zavisnost pada pritiska u sloju od gustine punjenja. Dobijene vrednosti od 0,82 l i 1,54 l, respektivno, ukazuju na značajno povećanje zapremine zadržane tečnosti u sloju pri porastu gustine punjenja, što i predstavlja jednu od prednosti kolona sa pokretnim punjenjem.

Na slici 4 je dijagram zavisnosti dinamičke visine sloja u funkciji protoka tečnosti i gasa.

Dinamička visina sloja raste i sa porastom protoka tečnosti i sa porastom protoka gasa, što je zabeleženo i u literaturi [5,8]. Konstatovano je takođe da dinamička visina sloja praktično ne zavisi od gustine punjenja.

Podaci dobijeni za zapreminu zadržane tečnosti u sloju i dinamičku visinu sloja punjenja, pružaju mogućnost da se u ukupnoj zapremini dinamičkog sloja, odrede zasebno zapremine punjenja, tečnosti i slobod-

Tabela 2. Stvarne srednje brzine tečnosti i gasa kroz sloj u funkciji protoka tečnosti

Table 2. Effective mean liquid and gas velocities as a function of liquid flow-rate

L, l/h	700	1000	1300	1600
V_L , l	0,93	1,24	1,57	1,90
h_d , mm	385	412	442	480
V_T , l	3,66	3,91	4,20	4,56
V_P , l	1,20	1,20	1,20	1,20
V_G , l	1,53	1,47	1,43	1,46
ϵ_G	0,418	0,376	0,340	0,320
ϵ_L	0,254	0,317	0,374	0,417
u_{GS} , m/s	1,644	1,827	2,021	2,147
u_{LS} , cm/s	8,055	9,221	10,160	11,215

dnog prostora za proticanje gasa, na osnovu čega se mogu odrediti i udeli tečne i gasne faze, pa onda i proceniti stvarne srednje brzine gasa i tečnosti kroz dinamički sloj u funkciji protoka tečnosti. Podaci su sumirani u tabeli 2 i odnose se na protok gasa od $23,5 \text{ m}^3/\text{h}$, gustinu punjenja od $0,322 \text{ g/cm}^3$ i statičku visinu sloja od 210 mm.

Prema podacima iz tabele 2, može se zaključiti da porast protoka tečnosti pri konstantnom protoku gasa, izaziva porast stvarne srednje brzine i tečnosti i gasa kroz sloj, što može imati uticaja i na vrednosti koeficijenta prelaza mase i sa strane tečnosti i sa strane gasa.

ZAKLJUČAK

Kod kolona sa trofaznim fluidizovanim slojem i pad pritiska i količina zadržane tečnosti u sloju i dinamička visina sloja rastu i sa porastom protoka tečnosti i sa porastom protoka gasa. Pad pritiska u sloju i količina zadržane tečnosti u sloju rastu i sa porastom gustine punjenja, dok dinamička visina sloja i minimalna brzina fluidizacije praktično ne zavise od gustine punjenja. Upravo ovakvo ponašanje čini da se povećanjem gustine punjenja jako intenzivira međufazni prenos mase kod ovih kontakatora.

S druge strane pokazano je da i porast protoka tečnosti izaziva porast stvarnih srednjih brzina i tečnosti i gasa kroz sloj, što takođe dovodi do intenzivnijeg prenosa mase, o čemu će biti reči u drugom delu ovog rada

LISTA UPOTREBLJENIH SIMBOLA

G (m^3/h)	– zapreminski protok gasa
L (l/h)	– zapreminski protok tečnosti
h_0 (mm)	– statička visina sloja punjenja
h_d (mm)	– dinamička visina sloja punjenja
u_G (cm/s)	– prividna površinska brzina gasa
u_{GS} (cm/s)	– stvarna srednja brzina gasa kroz sloj
u_L (cm/s)	– prividna površinska brzina tečnosti
u_{LS} (cm/s)	– stvarna srednja brzina tečnosti kroz sloj
V_{mF} (m^3/h)	– minimalni zapreminski protok fluidizacije
V_T (l)	– ukupna zapremina dinamičkog sloja
V_P (l)	– zapremina punjenja u sloju
V_G (l)	– zapremina slobodnog prostora u dinamičkom sloju raspoloživa za proticanje gasa
V_L (l)	– zapremina zadržane tečnosti u dinamičkom sloju
ϵ_G (–)	– udeo gasa u dinamičkom sloju
ϵ_L (–)	– udeo tečnosti u dinamičkom sloju
ρ_P (g/cm^3)	– gustina punjenja
Δp (Pa)	– pad pritiska u sloju

LITERATURA

- [1] B.K. O'Neill, D.J. Nicklin, N.J. Morgan and L.S. Leung, *Can. J. Chem. Eng.*, **50** (1972) 595.
- [2] B.H. Chen and W.J.M. Douglas, *Can. J. Chem. Eng.*, **46** (1968) 245.
- [3] D. Melentijević, Magistarski rad, TMF, Beograd, 1977.

- [4] O.S. Balabekov, P.G. Romankov, Z.R. Tarat and M.F. Mikhailev, Zh. Prikl. Khim., **42** (1969) 1540
- [5] G. Vunjak–Novaković, Doktorska disertacija, TMF, Beograd, 1980.
- [6] N.I. Gelperin, V.I. Savtchenko and V.Z. Grishko, Khim. Prom. **43** (1967) 372
- [7] R.H. Perry, D.W. Green and J.O. Maloney, Perrys Chemical Engineers Handbook, Sixth Edition, Mc Graw–Hill Inc., 1984.
- [8] M. Wozniak and K. Ostergaard, Chem. Eng. Sci., **28(1)** (1973) 167.

SUMMARY

ABSORPTION IN A THREE–PHASE FLUIDIZED BED I HYDRODYNAMIC INVESTIGATIONS

(Scientific paper)

Srđan Pejanović

Faculty of Technology and Metallurgy, University of Belgrade

The hydrodynamic properties of a three phase fluidized bed with low density inert spherical packing, fluidized by the interaction of a gas flowing upwards and a liquid flowing downwards through the column, were investigated. It was found that the pressure drop, liquid hold up and dynamic bed height increase with both increasing liquid and gas flow rate. While the dynamic bed height and minimum fluidization velocity remain unchanged, both the pressure drop and liquid hold up increase with increasing density of the packing. Therefore, an increase in packing density causes more intensive mass transfer between the fluid phases than packed columns. It was shown that increase of the liquid flow rate causes an increase of both the effective liquid and gas velocity through the fluidized bed, which may also improve mass transfer.

Key words: Three–phase fluidized bed • Hydrodynamic behaviour • Liquid hold up • Pressure drop • Dynamic bed height •

Ključne reči: Trofazni fluidizovani sloj • Zapremina zadržane tečnosti • Pad pritiska • Dinamička visina sloja •