

یادداشت پژوهشی

بررسی تجربی اثر توزیع کننده گاز و ارتفاع مایع بر ماندگی گاز در راکتورهای حبابی

پژوهش نفت

سال هفدهم

شماره ۵۵

صفحه ۸۹ - ۸۴ - ۱۳۸۶

● بهنوش مشتری^{۱*}، انسیه گنجی^۲، جعفر صادق مقدس^۱

۱ - دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۲ - پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده گاز

bmoshtari@gmail.com

مقدمه

راکتورهای ستون حبابی^۱ یکی از انواع راکتورهای چند فازی است که برای تماس فازهای مختلف استفاده می‌شوند. در این راکتورها فاز گاز از طریق یک توزیع کننده گاز^۲ در طول فاز مایع که ممکن است حاوی ذرات ریز جامد معلق باشد، پراکنده می‌شود. این ذرات جامد در فرایندهای شیمیایی، پتروشیمیایی، بیوشیمیایی و سایر فرایندهای صنعتی، غالباً ذرات کاتالیست هستند، که حضورشان باعث تسریع واکنش و کاهش زمان ماند در داخل راکتور می‌شود [۱].

روابط تجربی و تئوری زیادی به منظور تخمین ضرایب انتقال جرم و حرارت در راکتورهای ستون حبابی ارائه شده است. این روابط به ماندگی گاز در مایع وابسته‌اند. شناسایی عوامل مؤثر بر ماندگی گاز و ترکیب آن‌ها با قطر متوسط حباب‌ها، امکان تعیین سطح فعال انتقال جرم و حرارت بین فازهای مختلف را فراهم می‌کند. بنابراین

چکیده

ماندگی گاز یکی از عوامل مهم برای پیشگویی رفتار هیدرودینامیکی در راکتورهای حبابی است. از عوامل مؤثر بر ماندگی گاز، نوع توزیع کننده گاز و ارتفاع ستون مایع است.

در این تحقیق از یک ستون استوانه‌ای به قطر ۱۵cm و مجهز به دو نوع توزیع کننده گاز، استفاده و اثر توزیع کننده گاز و ارتفاع ستون مایع در سرعت‌های متفاوت گاز بررسی شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که، افزایش ارتفاع ستون مایع و کاهش قطر منافذ توزیع کننده گاز، باعث افزایش ماندگی کلی گاز در سیستم می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ستون حبابی، توزیع کننده گاز، ماندگی گاز

1. Bubble Column Reactors

2. Sparger

ناحیه با ساختار کف در متوسط ماندگی کلی گاز، بستگی به ارتفاع ستون دارد. اگر ستون حباب خیلی بلند باشد، ماندگی گاز در مجاورت توزیع کننده و ناحیه با ساختار کف در بالای ستون، تأثیر کمی روی ماندگی متوسط ستون دارد، در حالی که این تأثیر برای ستون‌های کوچک، چشمگیرتر است. بیشتر مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که تأثیر ارتفاع ستون بر ماندگی گاز برای ستون‌هایی با ارتفاع بیشتر از ۱-۳m و همچنین برای زمانی که نسبت ارتفاع به قطر ستون بیشتر از ۵ است، قابل صرف نظر است [۶، ۹ و ۱۰].

در ستون‌های حبابی بلند، تأثیر توزیع کننده گاز به دلیل رخ دادن پدیده به هم آمیختگی حباب‌ها کم می‌شود. بنابراین سرعت انتقال جرم در ستون‌های حبابی بزرگ (صنعتی)، در مقایسه با ستون‌های حبابی کوچک دارای شدت کمتری بوده، در نتیجه ماندگی گاز در ستون‌های بلندتر بیشتر خواهد بود.

با توجه به اهمیت طراحی توزیع کننده گاز و ارتفاع ستون مایع در ماندگی کلی گاز در راکتورهای حبابی و کافی نبودن آزمایش‌ها و تحقیق‌های انجام شده در این زمینه، انجام آزمایش‌ها و مطالعات جهت پیش بینی رفتار هیدرودینامیکی در این راکتورها، ضروری است.

سیستم آزمایشگاهی

سیستم آزمایشگاهی مورد مطالعه، یک راکتور استوانه‌ای شکل از جنس شیشه با قطر ۱۵cm و ارتفاع ۳m است که از پایین به توزیع کننده گاز مجهز است. راکتور در دما و فشار محیط کار کرده و دبی گاز ورودی به سیستم توسط یک روتامتر با دقت ۰/۱ درصد اندازه‌گیری می‌شود.

اختلاف فشار ستون توسط مانومتر U شکل و از طریق نازل‌های جانبی راکتور، اندازه‌گیری می‌شود. از آن‌جا که تغییرات فشار در سیستم کم است از سیالی با دانسیته نزدیک به آب (تراکلرید کربن) در مانومتر استفاده می‌گردد.

آب از بالا وارد راکتور شده و برای تخلیه از یک شیر که در پایین راکتور نصب شده است، استفاده می‌شود (شکل ۱).

با اندازه‌گیری اختلاف فشار ستون مایع در سرعت‌های

پیش بینی صحیح ماندگی گاز و سرعت انتقالی آن بین رژیم‌های جریان هموزن و هتروژن از موارد مهم در طراحی راکتورهای ستون حبابی است.

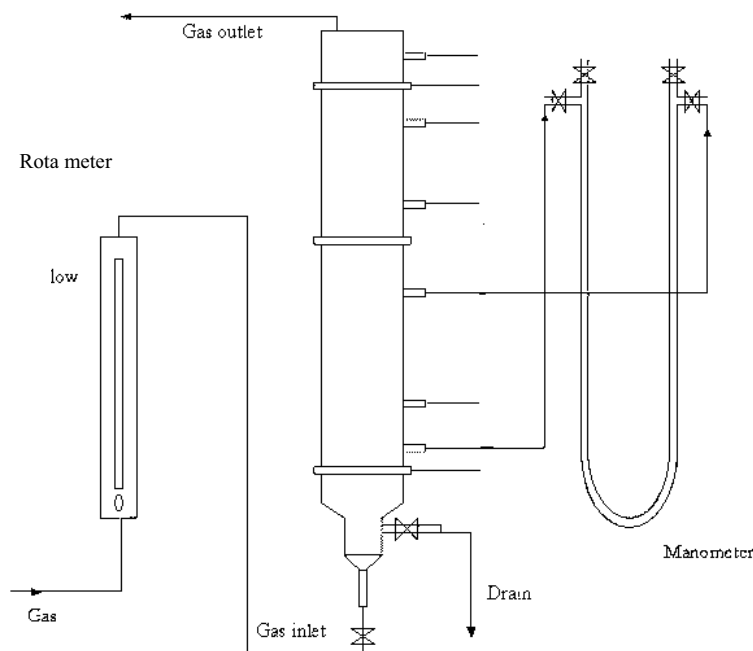
در طراحی راکتورهای ستون حبابی، طراحی توزیع کننده گاز و ارتفاع ستون مایع در میزان ماندگی گاز تأثیر زیادی دارند. توزیع کننده گاز یکی از قسمت‌های داخلی راکتور است که انواع متفاوتی دارد. تفاوت توزیع کننده‌های گاز در اختلاف اندازه سوراخ‌ها، نحوه آرایش، تعداد آن‌ها و درصد فضای خالی نسبت به قطر ستون است. صفحات مشبک، صفحات متخلخل، توزیع کننده نوع عنکبوتی^۱، فیبرهای توخالی و تک نازل‌ها^۲ از انواع متداول توزیع کننده‌های گاز هستند [۲، ۳ و ۴]. صفحات متخلخل معمولاً دارای سوراخ‌هایی با قطر ۱/۷ تا ۱۰۰ میکرون می‌باشند [۴ و ۵]. طراحی صفحات مشبک شامل مواردی مانند قطر سوراخ‌ها، تعداد آن‌ها، نوع و فاصله بین پیچ‌ها است. قطر سوراخ‌ها در صفحات مشبک معمولاً در حد میلی‌متر بوده و نوع توزیع کننده گاز بر قطر حباب‌ها و سرعت انتقالی تأثیر زیادی دارد [۵].

مطالعات نشان داده است که علیرغم اهمیت توزیع کننده گاز بر ماندگی آن، اگر قطر سوراخ‌ها از ۲mm بیشتر باشد، تأثیر قابل توجهی در ماندگی گاز نداشته و می‌توان از اثر آن صرف نظر کرد [۶].

ارتفاع ستون مایع نیز بر میزان ماندگی گاز تأثیر دارد [۷]. ماندگی گاز در یک ستون حبابی همیشه یکنواخت نیست. عموماً سه نوع رژیم مختلف برای ماندگی گاز پیشنهاد می‌شود. در بالای ستون، یک نوع ساختار کف^۳ با ماندگی نسبتاً بالا وجود دارد، در حالی که ماندگی گاز نزدیک توزیع کننده، در بعضی مواقع بیشتر (برای صفحات متخلخل و مشبک) و بعضی مواقع کمتر (برای تک نازل‌ها) از قسمت مرکزی ستون است [۶ و ۸].

بدیهی است که میزان سهم توزیع کننده گاز و

1. Spider Type Sparger
2. Single Orifice Nozzle
3. Foam
4. Coalescing



شکل ۱- سیستم آزمایشگاهی

در مقایسه بین صفحات مشبک و متخلخل، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است در صورت استفاده از صفحه متخلخل، ماندگی گاز در ستون بیشتر می‌شود. علت این اختلاف، تفاوت در قطر و آرایش سوراخ‌ها است. قطر سوراخ‌ها در صفحه متخلخل در محدوده میکرون و در صفحه مشبک یک میلی‌متر است. کمتر بودن قطر سوراخ‌های توزیع کننده گاز باعث می‌شود حباب‌های گاز ایجاد شده در ستون حبابی دارای قطر کمتری باشند. از آن‌جا که حباب‌های کوچک‌تر سرعت کمتری نسبت به حباب‌های بزرگ دارند، ماندگی بیشتری نیز خواهند داشت. البته همان‌طور که در شکل ۳ مشخص شده است با افزایش ارتفاع مایع به دلیل پدیده به هم آمیختگی حباب‌ها اثر توزیع کننده گاز کم شده و پیش بینی می‌شود که این اثر در مقیاس‌های صنعتی قابل اغماض باشد [۱۱].

اثر ارتفاع ستون مایع بر ماندگی گاز

همان‌طور که قبلاً گفته شد طول ستون مایع در راکتورهای حبابی را می‌توان به ۳ ناحیه تقسیم کرد. اغلب مطالعات هیدرودینامیک در راکتورهای حبابی در ناحیه میانی انجام می‌شود. با اضافه کردن ارتفاع ستون مایع،

مختلف گاز، می‌توان ماندگی گاز در این سیستم آزمایشگاهی را طبق رابطه ۱ تعیین کرد:

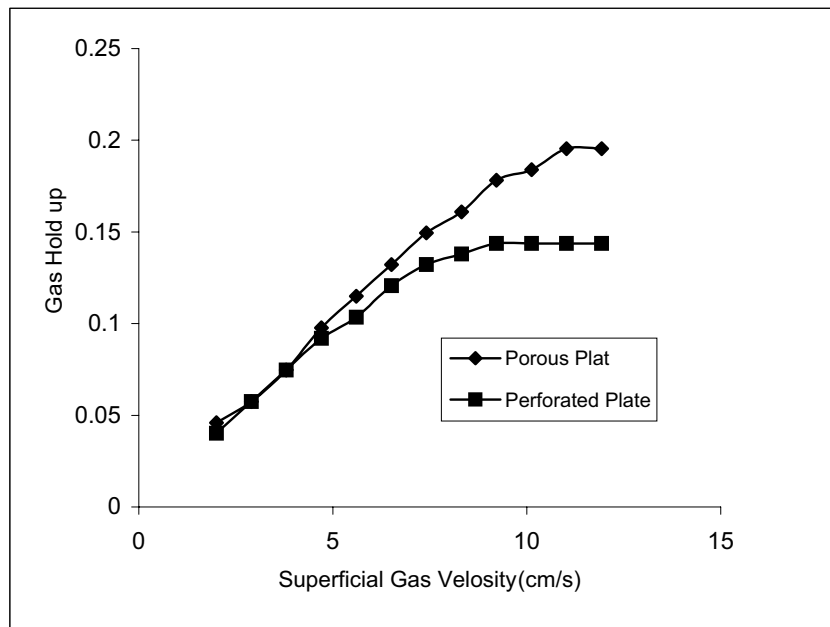
$$\varepsilon_g = \left(\frac{\rho_m - \rho_L}{\rho_L - \rho_G} \right) \left(\frac{dh_m}{dz} \right) \quad (1)$$

اثر توزیع کننده گاز بر ماندگی گاز

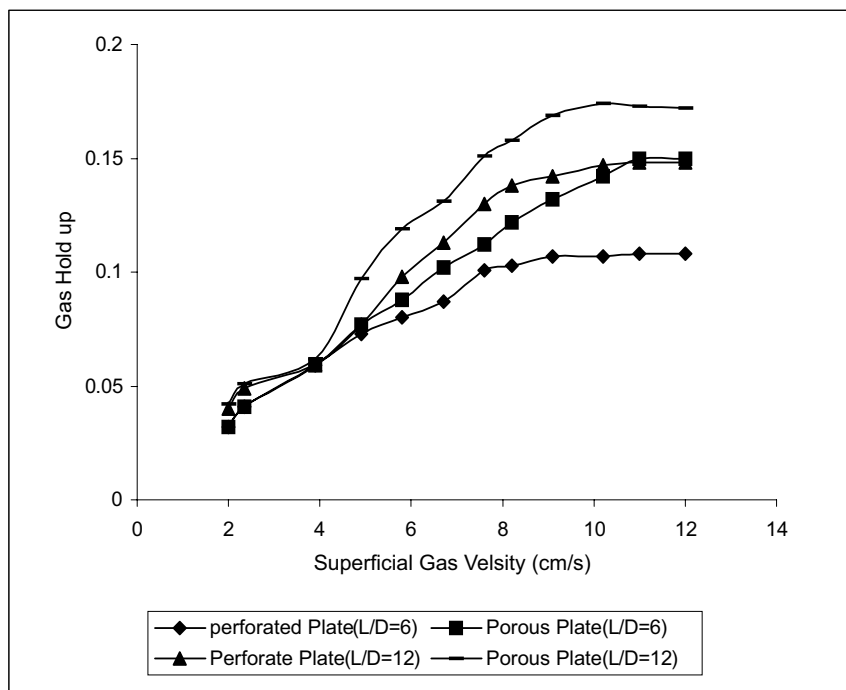
به منظور بررسی اثر توزیع کننده بر ماندگی گاز از دو نوع توزیع کننده استفاده شده است. این توزیع کننده‌ها عبارتند از: یک صفحه متخلخل از جنس Sintered Glass با درصد تخلخل ۰/۱ و یک صفحه مشبک دارای ۱۹ سوراخ به قطر ۱mm با آرایش مثلثی. هر دو توزیع کننده دارای قطر ۱۵cm بوده و در تخلخل یکسان می‌باشند.

طراحی صفحه مشبک از نظر تعداد و قطر سوراخ‌ها به عدد وبر^۱ وابسته است. بدین ترتیب که جهت جلوگیری از پدیده ریزش مایع، عدد وبر باید در حداقل سرعت گاز ورودی از ۲ بزرگ‌تر باشد. عدد وبر را می‌توان از رابطه ۲ محاسبه کرد [۱۱]:

$$we = \frac{\rho_G U_G d_o}{\sigma} = \frac{\rho_G U_G D_c^4}{N_o d_o \sigma} \quad (2)$$



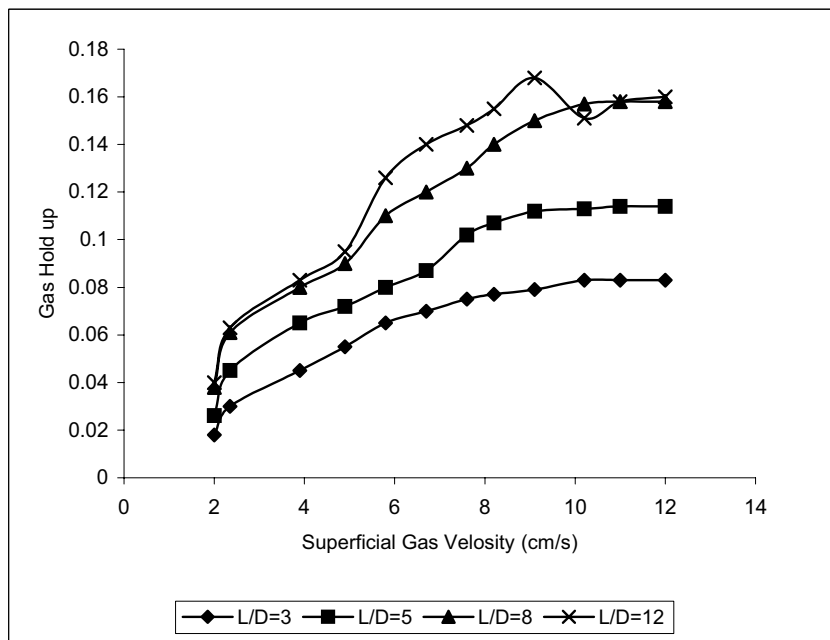
شکل ۲- اثر توزیع کننده بر ماندگی گاز



شکل ۳- اثر نوع توزیع کننده بر ماندگی گاز در مقادیر متفاوت از ارتفاع مایع

خواهد یافت. اما نتایج نشان می‌دهد این افزایش ماندگی گاز، زمانی که نسبت ارتفاع ستون مایع نسبت به قطر آن بیشتر از ۵ است، تغییر قابل توجهی ندارد. علت این امر می‌تواند مربوط به پدیده به هم چسبیدن حباب‌ها باشد، زیرا با افزایش طول ستون حباب‌ها، زمان بیشتری برای

ارتفاع ناحیه کفی و ناحیه مجاور توزیع کننده گاز تغییر چندانی نمی‌کند. بنابراین ماندگی این دو ناحیه نیز تغییر چندانی نخواهد کرد. اما از آنجایی که طول ناحیه میانی با افزایش یا کاهش ارتفاع ستون به ترتیب افزایش یا کاهش می‌یابد، ماندگی این ناحیه نیز با افزایش ارتفاع افزایش



شکل ۴- اثر ارتفاع مایع بر ماندگی گاز در سیستم مجهز به توزیع کننده صفحه مشبک

L/D های بیشتر، اثر ارتفاع ستون مایع کمتر بوده. بنابراین بهتر است در مقیاس‌های صنعتی از راکتورهایی با ارتفاع زیاد استفاده شود.

علائم و نشانه‌ها

- D_c : قطر ستون (m)
- N_0 : تعداد سوراخ‌های توزیع کننده
- U_g : سرعت گاز (m/s)
- d_o : قطر سوراخ (m)
- dh_m : اختلاف ارتفاع در سیال مانومتریک (m)
- d_z : اختلاف ارتفاع نقاط متصل به مانومتر (m)
- ε_g : ماندگی گاز

- ρ_g : دانسیته گاز (kg/m^3)
- P_L : دانسیته مایع (kg/m^3)
- P_m : دانسیته سیال مانومتریک (kg/m^3)
- σ : کشش سطحی مایع (N/m)

به هم چسبیدن پیدا کرده و با افزایش قطر آن‌ها سرعت خروجشان زیاد می‌شود. بنابراین ماندگی کلی گاز تغییر چندانی نمی‌کند. اما در L/D های کمتر از ۵ چون حباب‌ها فرصتی برای به هم چسبیدن ندارند اثر ارتفاع ستون قابل توجه است [۱] (شکل ۴). همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود ماندگی گاز در $L/D=12$ زمانی که سرعت ظاهری گاز حدود 9 cm/s است کاهش ناگهانی می‌یابد علت این پدیده به دلیل به هم پیوستن حباب‌های گاز و تشکیل ناگهانی حباب‌های بزرگ می‌باشد. این پدیده در ارتفاع‌های زیاد به دلیل افزایش زمان ماند حباب‌های گاز اتفاق می‌افتد.

بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر ارتفاع ستون مایع و نوع توزیع کننده گاز در یک راکتور حبابی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که، کمتر بودن قطر سوراخ‌های توزیع کننده گاز در درصد تخلخل یکسان از موارد قابل اهمیت جهت افزایش ماندگی گاز است. در ارتفاع‌های زیاد مایع این اثر چندان محسوس نیست. همچنین با افزایش ارتفاع ستون مایع، ماندگی گاز افزایش می‌یابد. این افزایش در $L/D=5$ کاملاً محسوس بوده اما در

منابع

- [1] W. Deckwer, *Bubble Column Reactor*, 4th Ed. John Wiley and Sons, Chichester, 1992.
- [2] M.H. Oyevaar, R. Bos, K.R. Westerterp, *Interfacial Areas and Gas Hold-Ups in Gas-Liquid Contactors at Elevated Pressures from 0.1 to 8.0 Mpa*, Chemical Engineering Science, Vol. 46, 1991.
- [3] I.G. Reilly, D.S. Scott, T.J.W. de Bruijn, and D. MacIntyre, *The Role of Gas Phase Momentum in Determining Gas Holdup and Hydrodynamic Flow Regimes in Bubble Column Operations*, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 72, 1994.
- [4] J.S. Smith, L.F. Burns, K.T. Valsaraj, L.J. Thibodeaux, *Bubble Column Reactors for Wastewater Treatment. 2. The Effect of Sparger Design on Sublation Column Hydrodynamic in the Homogeneous Flow Regime*, Industrial and Engineering Chemistry Research, Vol. 35, 1996.
- [5] Ch. Vial, R. Laine, S. Poncin, N. Midoux, G. Wild, *Influence of Gas Distribution and Regime Transition on Liquid Velocity and Turbulence in a 3-D Bubble Column*, Chemical Engineering Science, Vol. 56, 2001.
- [6] S.C. Saxena, Z.D. Chen, *Hydrodynamics and Heat Transfer of Baffled and Un baffled Slurry Bubble Column*, Rev. Chem. Eng., Vol. 10, 1994.
- [7] P.M. Wilkinson, A.P. Spek, L. van Dierendonck, *Design Parameters Estimation for Scale-Up of High-Pressure Bubble Columns*, AIChE Journal, Vol. 38, 1992.
- [8] B.N. Thorat, K. Kataria, A.V. Kulkarni, J.B. Joshi, *Pressure Drop Studies in Bubble Columns*, "Industrial and Engineering Chemistry Research", Vol. 40, 2001.
- [9] L.Z. Pino, R.B. Solari, S. Siquier, L. Antonio Estevez, M. Yopez, *Effect of Operating Conditions on Gas Holdup in Slurry Bubble Columns with a Foaming Liquid*, Chemical Engineering Communication, Vol. 117, 1992.
- [10] F. Kastanek, J. Zahradnik, J. Kratochvil, J. Cermak, *Modeling of Large-Scale Bubble Column Reactors for Non-Ideal Gas-Liquid Systems*, 2nd Ed, L. K. Doraiswamy, 1997.
- [11] F. Mashelkar, *Frontier in Chemical Reaction Engineering*, 2nd Ed, John Wiley & Sons, New Delhi, India, Vol. 1, 1984.
- [12] A. Mersmann, *Design and Scale-up of Bubble and Spray Columns*, Ger. Chem. Eng. Vol. 1, 1978.