

بررسی اثر سرعت ظاهری گاز و غلظت جامد بر ضریب انتقال حرارت در ستون‌های حبایی - دوغابی

پژوهش‌نفت

سال نوزدهم
شماره ۵۹
صفحه ۴۶-۵۲، ۱۳۸۸

انسبه گنجی باباخانی^{۱*}، علی فاضلی^۱، حمیدرضا خاکدامن^۱ و محمدرضا مسعودی^۲

۱- پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده گاز

۲- پژوهشگاه صنعت نفت، مرکز مهندسی طرح‌های صنعتی و عمرانی

ganjie@ripi.ir

واژه‌های کلیدی: ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، ستون‌های حبایی دوغابی، سرعت ظاهری، غلظت جامد، سنتز فیشر-تروپش

چکیده

انتقال حرارت از پدیده‌های بسیار مهم در راکتورهای دوغابی برای مدل‌سازی، طراحی ادوات حرارتی و افزایش مقیاس است. برای مطالعه ضریب انتقال حرارت موضعی در راکتور دوغابی، ستونی به قطر ۳۰ cm و ارتفاع ۳ m، برای دستیابی به رژیم جریان راکتورهای صنعتی، طراحی و ساخته شد. در آزمایش‌ها پودر سیلیس با قطر متوسط ۵۰ میکرون (اندازه‌ای مشابه با کاتالیست فرایند فیشر-تروپش) به عنوان فاز جامد به کار رفت. از پارافین به عنوان فاز مایع و از هوا به عنوان فاز گاز استفاده شد. همچنین یک پروب حرارتی مخصوص برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با منبع حرارتی الکتریکی و ترموکوپل‌های اندازه‌گیری دمای سطح و دمای سیال تعبیه شد. به کمک این پروب، ضریب انتقال حرارت در راکتور اندازه‌گیری و تأثیر پارامترهای سرعت ظاهری گاز و غلظت جامد در آن مطالعه شد. در تمام آزمایش‌ها، نسبت ارتفاع فاز دوغابی به قطر ۴ در نظر گرفته شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که با افزایش سرعت گاز از ۲۵-۲ cm/s، ضریب انتقال حرارت به طور متوسط حدود ۶۵ درصد افزایش می‌یابد و همچنین افزایش غلظت جامد در دوغاب موجب افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود.

مقدمه

تبدیل گاز طبیعی به محصولات مایع موجب انتقال آن با روش‌های متعارف انتقال نفت می‌شود که مشکلات سیاسی - امنیتی ناشی از انتقال گاز را با خط لوله نخواهد داشت. ایران منابعی عظیم از گاز طبیعی دارد و با توجه به بالا بودن قیمت نفت خام در سال‌های اخیر، تحقیقات درباره تبدیل گاز به مایع رونقی خاص یافته‌اند. از جمله روش‌های موجود، تولید گاز سنتز از گاز طبیعی و تبدیل آن به هیدروکربن‌های سنگین‌تر به کمک سنتز فیشر-تروپش است. به دلیل وجود واکنش‌های بسیار گرمازا در فرایند فیشر-تروپش، طراحی یک سیستم کارای انتقال حرارت ضروری است. حرارت می‌تواند، با لوله‌هایی که درون آنها ماده‌ای با نقطه جوش نزدیک دمای مطلوب جریان دارد، به درون راکتور منتقل شود. ماده درون لوله اغلب آب اشباع است که در فشار بالا نقطه جوشی مطلوب خواهد داشت. انتقال حرارت مؤثر و ثبات دمایی خوب در راکتورهای حبایی، به خصوص هنگامی که در رژیم ناهمگن کار می‌کنند، از مزایای مهم این راکتورهاست. به این

آنها از ستون پلکسی گلاس به قطر داخلی ۷/۶۲ سانتیمتر استفاده کرده‌اند. استفاده از ستون‌های با قطر کمتر از حدود ۲۰ سانتیمتر باعث می‌شود که تنها در سرعت‌های کم بتوان کار کرد و به رژیم جریان حبابی و یا در سرعت‌های بالا به رژیم لخته‌ای^۷ دست یافت که برای عملکرد راکتور مناسب نیست.

اثر سرعت گاز بر ضرایب انتقال حرارت در سیستم‌های دو و سه فازی بسیار مطالعه شده است [۵، ۷ و ۸]. مطالعات زیادی گزارش کرده‌اند که ضرایب انتقال حرارت با افزایش سرعت ظاهری گاز افزایش می‌یابد که این با توجه به خواص مختلف فاز جامد (قطر، شکل و غلظت) یا خواص مختلف فاز مایع (چگالی، گرانی و ...) متفاوت است [۵ و ۷-۱۰]. در این تحقیق سعی شده است از پودر سیلیس با قطر ۵۰ میکرون استفاده شود که بسیار شبیه کاتالیست سنتز فیشر- تروپش است. همچنین تا غلظت ۴۰ درصد وزنی جامد اضافه شده است که حداکثر غلظت اقتصادی در این فرایند است. از طرفی سرعت‌های ظاهری گاز، از ۴ تا ۲۵ سانتیمتر بر ثانیه، دستیابی به رژیم‌های همگن و ناهمگن کاملاً آشفته را ممکن می‌کند. همچنین حد بالای سرعت ظاهری گاز یعنی ۲۵ سانتیمتر بر ثانیه به شرایط عملکرد راکتورهای حبابی- دوغابی سنتز فیشر- تروپش از نظر رژیم جریان نزدیک است. همچنین در این تحقیق، با استفاده از ستونی با قطر ۳۰ سانتیمتر از رژیم جریان لخته‌ای جلوگیری می‌شود و به جای آن رژیم جریان آشفته و توربولنت^۸ به دست می‌آید.

آزمایش‌ها، تجهیزات و مواد

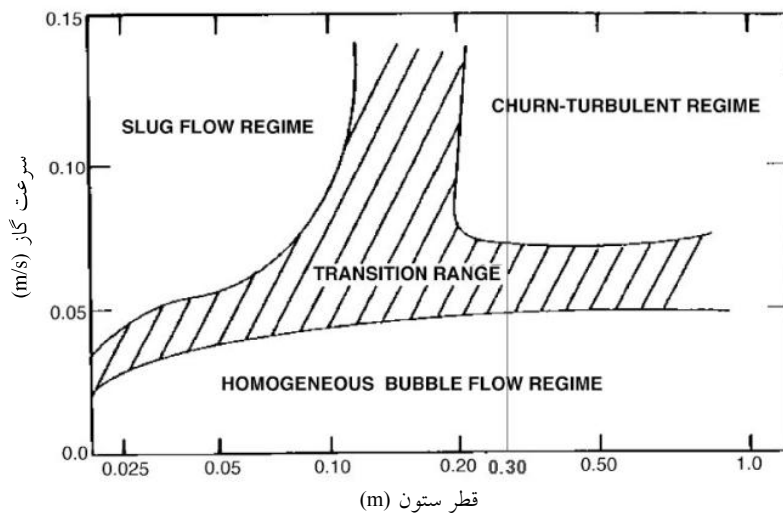
در این بخش روند آزمایش‌ها و ایده اصلی روش اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، تجهیزات شامل ستون حبابی- دوغابی، غلاف^۹ اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و مواد مصرفی معرفی شده‌اند.

دلیل دانستن ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در راکتورهای حبابی- دوغابی ضروری است و در یافتن اندازه و تعداد مناسب لوله‌های کوئل و در نتیجه هزینه فرایند و همچنین وزن راکتور بسیار مهم است. علیرغم مطالعات متعدد پدیده انتقال حرارت در راکتورهای دو و سه فازی [۱۰ و ۱۱]، در این مطالعات برای بعضی حالات نتایج قطعی ارائه نشده است؛ لذا به تحقیقات بیشتری بر روی ضریب انتقال حرارت در این نوع راکتورها نیاز است.

کلبل^۱ و همکارانش [۳ و ۴] گزارش کرده‌اند که اضافه کردن ذرات ماسه به قطر ۰/۲ میلی‌متر در آب باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود و هر چقدر غلظت آن افزایش یابد ضریب انتقال حرارت بیشتر می‌شود در حالی که اضافه کردن ذرات کیزلقور^۲ باعث می‌شود که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی دوغاب از آب تنها نیز کمتر شود. دکور^۳ و همکارانش [۵] دریافتند که اضافه کردن ذرات آلومینای کوچکتر از ۵ میکرون، در سرعت‌های ظاهری کمتر از ۴ سانتیمتر بر ثانیه، به پارافین مذاب موجب افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود. برخی مطالعات نشان می‌دهند که با افزایش غلظت دوغاب، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش می‌یابد [۴ و ۵]. امالی و پرکاش^۴ [۶] روندی متضاد با دکور را ارائه کرده‌اند [۵]. آن‌ها نشان داده‌اند که با افزایش غلظت جامد، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. در این تحقیق این تضاد و عوامل آن بررسی شده‌اند تا از روند درست کارکرد راکتورهای حبابی- دوغابی سنتز فیشر- تروپش اطمینان حاصل شود.

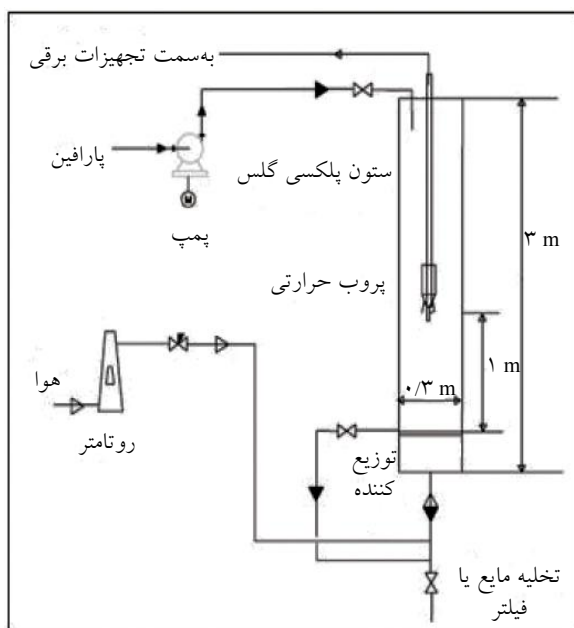
برخی آزمایش‌های اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت در ستون‌هایی با قطر کم انجام شده‌اند. دکور و همکارانش در سال ۱۹۸۰ از دو ستون با قطرهای ۴/۱ و ۱۰ سانتیمتر استفاده کرده‌اند [۵]. ماگی لیتون^۵ و همکارانش در سال ۱۹۸۸ ضریب انتقال حرارت را در ستون‌های پلکسی گلاس به قطرهای داخلی ۷/۶۲ و ۱۵/۲ سانتیمتر اندازه گرفته‌اند [۱۱]. کومار^۶ و همکارانش ضریب انتقال حرارت را برای بررسی مکانیزم انتقال حرارت در سیستم حبابی مایع و مایع- جامد با تزریق تک حباب اندازه گرفته‌اند [۱۲].

1. Kolbel
2. Kieselguhr
3. Deckwer
4. Li & Prakash
5. Magilton
6. Kumar
7. Slug
8. Churne Turbulent Flow Regim
9. Probe



شکل ۱- نمودار رژیم جریان [۵]

با توجه به اهمیت رژیم جریان آشفته و توربولنت و نمودار رژیم جریان دوغابی در شکل ۱، قطر ستون ۳۰ سانتیمتر برگزیده شده است تا بتوان به رژیم جریان واقعی در راکتورهای سنتز فیشر- تروپش دست یافت. این ستون به قطر خارجی ۳۰ سانتیمتر و ارتفاع تقریبی ۳ متر از جنس پلکسی گلاس با فلنج‌هایی از جنس تفلون ساخته شده و به توزیع کننده گاز از نوع صفحه سوراخدار مجهز است. هوا پس از عبور از رگولاتور تنظیم کننده فشار ورودی به روتامتر و سپس، از توزیع کننده گاز، به راکتور وارد می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲- نمایی از تجهیزات آزمایش

آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در چهار بلوک آزمایشی با تغییر غلظت انجام شدند: ابتدا غلظت پایین در راکتور تهیه شد و آزمایش‌های مربوط به آن در سرعت‌های مختلف انجام شدند و سپس به ترتیب تا ۴۰ درصد وزنی غلظت اضافه و آزمایش‌ها تکرار شدند.

برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، غلاف خاصی طراحی و ساخته شد که در برگیرنده منبع حرارتی الکتریکی است و ترموکوپل‌هایی نیز روی آن نصب می‌شوند. برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (h) با منبع حرارتی الکتریکی، توان حرارتی Q به کمک سطح انتقال حرارت A به توده سیال سه فازی منتقل می‌شود و $q = Q/A$ شار حرارتی است. با اندازه‌گیری دمای سطح منبع حرارتی (T_w)، دمای توده سیال (T_∞) و محاسبه اختلاف دمای $\Delta T = T_w - T_\infty$ می‌توان از رابطه قانون انتقال حرارت جابه‌جایی نیوتن ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (h) را به دست آورد:

$$h = \frac{Q}{A \cdot \Delta T} = \frac{q}{\Delta T} \quad (1)$$

تجهیزات و مواد

تجهیزات اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت در راکتورهای حیابی-دوغابی شامل غلاف‌های منبع حرارتی و حسگرهای مربوطه و نیز ستون‌ها و ادوات جانبی هستند.

سرعت ظاهری گاز

سرعت ظاهری گاز از حدود ۲ تا ۲۵ cm/s تغییر کرد. در محدوده سرعت انتخابی، ضریب انتقال حرارت در رژیم‌های مختلف جریان، از حبابی تا آشفته، قابل بررسی بود (شکل ۳).

با افزایش سرعت گاز ورودی، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت گاز ورودی، حباب‌های بزرگتر تشکیل می‌شوند [۱۳ و ۱۴] و آشفتگی سیال نیز زیاد می‌شود. این دو عامل باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شوند. ضریب انتقال حرارت از خواص حباب و هیدرودینامیک سیستم، از جمله اندازه حباب و ماندگی گاز، متأثر است. کومار و همکارانش [۱۲] دریافتند که با تزریق تک حباب به سیستم مایع-جامد، انتقال حرارت، به دلیل دنباله حباب‌ها، افزایش می‌یابد. چون اندازه دنباله حباب متناسب با اندازه حباب است [۱۵ و ۱۶]، حباب‌های بزرگتر دنباله‌ای بزرگتر خواهند داشت و در نتیجه تلاطم بیشتری ایجاد می‌کنند و انتقال حرارت را افزایش می‌دهند.

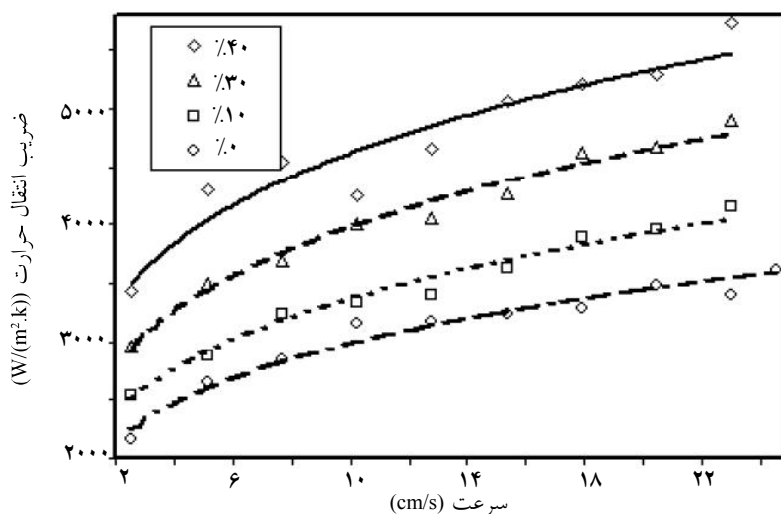
تأثیر سرعت گاز ابتدا زیاد است و در سرعت‌های بالا تأثیر آن کم می‌شود (شکل ۳). چون افزایش سرعت گاز بر اندازه حباب‌ها تا حدی اثر می‌گذارد و فقط باعث افزایش آشفتگی سیال می‌شود، شیب تغییرات ضریب انتقال حرارت در سرعت‌های بالا کاهش می‌یابد.

پروپ حرارتی، که به عنوان وسیله اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به کار می‌رود، از بالا با پایه‌های نگهدارنده و یک لوله به راکتور وارد می‌شود. در پروپ حرارتی، غلاف مسی حاوی منبع حرارتی الکتریکی به انتهای غلاف تفلونی متصل می‌شود و ترموکوپل‌ها نیز از محفظه تفلونی خارج می‌شوند. غلاف تفلونی به عنوان عایق حرارتی عمل می‌کند. یک ترموکوپل به سطح مس جوش خورده است و دیگری در سیال قرار دارد. ترموکوپل‌ها از نوع J هستند.

روی تابلو برق یک منبع تغذیه و نشانگرهای دما با دقت مناسب نصب شده‌اند. مقدار انرژی الکتریکی ارسال شده به سیستم تنها با تغییر ولت تنظیم می‌شود. در آزمایش‌های تعیین ضریب انتقال حرارت در راکتور سه فازی از پودر سیلیس به عنوان فاز جامد با قطر متوسط ۵۰ میکرون استفاده شد و همچنین پارافین با چگالی ۸۶۶/۹ کیلوگرم بر متر مکعب و گرانش سینماتیک $10^{-6} \times 9/332$ متر مربع بر ثانیه در دمای ۳۰ °C، به عنوان فاز مایع، و هوا، به عنوان فاز گاز، به کار رفت. در تمام آزمایش‌ها نسبت ارتفاع به قطر ۴ در نظر گرفته شده است.

نتایج و بحث

از پارامترهای اثرگذار بر ضریب انتقال حرارت در راکتورهای دوغابی، غلظت کاتالیست و سرعت ظاهری گاز هستند، که در این بخش نتایج ارائه و بررسی می‌شوند.



شکل ۳- اثر سرعت ظاهری گاز بر ضریب انتقال حرارت ستون‌های حبابی - دوغابی برحسب سرعت ظاهری گاز در غلظت‌های متفاوت جامد

غلظت جامد

انتقال حرارت بر اثر افزایش گرانیوی ظاهری، در کاهش آشفته‌گی به دلیل کاهش عدد رینولدز غالب شده است. روند افزایش ضریب انتقال حرارت ابتدا تا غلظت ۱۰ درصد شیب تند دارد و از غلظت ۱۰ درصد تا ۳۰ درصد کاهش آشفته‌گی به دلیل افزایش گرانیوی سیال و تأثیر آن بر ضریب انتقال حرارت بیشتر به چشم می‌خورد. ولی دوباره با افزایش غلظت تا ۴۰ درصد، شیب نمودار در تمام سرعت‌ها افزایش می‌یابد.

مدل ضریب انتقال حرارت موضعی

دکور با استفاده از مدل کاست^۱ با اعمال مدل‌های غیرایستای هیگبی^۲ و دانکورتز^۳ برای انتقال جرم بین فازی، با توجه به تشابه انتقال جرم و حرارت و موازنه حرارت غیرایستا برای المان سیال در سطح انتقال حرارت با شرایط مرزی هیگبی و در نهایت به کار بردن مدل واقعی‌تر دانکورتز و قرار دادن زمان تماس از تئوری آشفته‌گی همسانگرد^۴ کولموگوروف^۵، معادله زیر را برای ضریب انتقال حرارت ارائه داده است [۱]:

$$h = ck^{0.5} \rho^{0.75} c_p^{0.5} \mu^{-0.25} g^{0.25} u_G^{0.25} \quad (2)$$

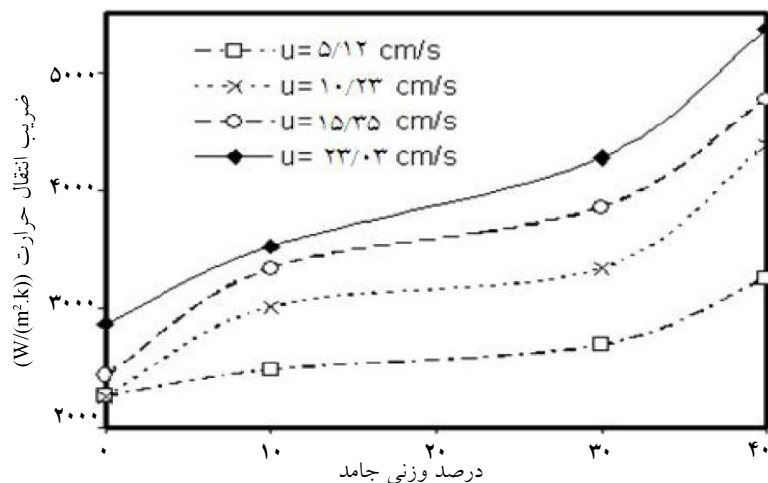
این معادله را می‌توان به صورت بی بعد نوشت:

$$St = c(Re Fr Pr^2)^{-0.25} \quad (3)$$

در این کار تجربی ارائه شده، نتایج بر اساس رابطه (۳) برای

غلظت پودر سیلیس از صفر تا ۴۰ درصد وزنی بود تا اثر حضور ذرات جامد در ضریب انتقال حرارت به خوبی دیده شود. به علاوه ماکزیمم غلظت مطالعه شده به گونه‌ای بود که محدوده غلظت کاتالیست در راکتور سنتز فیشر-تروپش را پوشش دهد. نمودار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در ستون‌های جابی-دوگابی، بر حسب درصد وزنی پودر سیلیس، برای برخی از سرعت‌های انتخابی در شکل ۴ آورده شده است.

افزایش غلظت جامد در راکتورهای دوگابی باعث افزایش گرانیوی فاز مایع می‌شود که افزایش گرانیوی خود دو اثر متضاد بر ضریب انتقال حرارت دارد: به هم پیوستن حباب‌های ریز و تشکیل حباب‌های درشت و در نتیجه افزایش ضریب انتقال حرارت و کاهش آشفته‌گی. به همین دلیل نتایج گزارش شده برای اثر غلظت جامد در مطالعات مختلف متفاوت‌اند. به گفته لی و پراکاش ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت ذرات جامد در سیستم هوا-آب-ذرات شیشه ۳۵ میکرونی کاهش می‌یابد [۶]. بر عکس، پراکاش [۷] در مطالعاتی دیگر برای سیستم هوا-آب-سلول‌های مخمر دریافت که افزایش سلول‌های مخمر باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود. در این آزمایش‌ها اثر افزایش گرانیوی در تشکیل حباب‌های بزرگ، و در نتیجه افزایش ضریب



شکل ۴- تغییرات ضریب انتقال حرارت بر حسب غلظت جامد

1. Kast
2. Higbie
3. Danckwerts
4. Isotropic Turbulence Theory
5. Kolmogoroff

نمادها

h : ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی

Q : توان حرارتی یا الکتریکی

A : سطح المان حرارتی

ΔT : اختلاف دمای سطح و سیال

T_w : دمای سطح المان حرارتی

T_∞ : دمای توده سیال

q : شار حرارتی

$$a = \frac{k}{\rho c_p}$$

ضریب نفوذ حرارتی

$$St = \frac{a}{u_G \rho c_p}$$

عدد بی بعد استانتون

u_G : سرعت ظاهری گاز

c : ثابت تناسب

ρ : چگالی

c_p : گرمای ویژه

k : ضریب رسانش سیال

μ : گرانیوی سیال

g : شتاب جاذبه گرانشی

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k}$$

عدد بی بعد پرانتل

$$Re Fr = \frac{u_G^3 \rho}{g \mu}$$

حاصلضرب دو عدد بی بعد رینولدز و

فرود (مستقل از تعریف طول مشخصه)

شرایط خاص آزمایش‌ها رگرسیون شده‌اند که نتایج را می‌توان با رابطه زیر خلاصه کرد:

$$St = 0.318(Re Fr Pr^2)^{-0.25} \quad (4)$$

مربع ضریب همبستگی رگرسیون 0.9782 به دست آمد که تطابق خوب نتایج تجربی و رابطه را نشان می‌دهد.

جمع بندی

ضریب انتقال حرارت، با افزایش سرعت ظاهری گاز، افزایش می‌یابد. این ضریب با توان 0.20 تا 0.22 از سرعت ظاهری گاز متناسب است که با نتایج کارهای مشابه تطابق دارد.

دو نتیجه متضاد درباره اثر غلظت جامد بر ضریب انتقال حرارت وجود دارند. برخی از مطالعات [۴ و ۵] گزارش کرده‌اند که افزایش غلظت جامد باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود در حالی که برخی از گزارش‌ها نتایجی برعکس را گزارش کرده‌اند [۶]. افزایش ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت جامد به افزایش گرانیوی دوغاب مربوط می‌شود که سبب ایجاد حباب‌های درشت‌تر با سرعت صعود بالاتر و در نتیجه سرعت بالاتر انتقال حرارت می‌شود. به عبارت دیگر نتیجه متضاد حاصل از کار پراکاش و لی [۶] با این واقعیت تشریح می‌شود که آشفستگی با افزایش گرانیوی کاهش می‌یابد. در واقع با اضافه کردن جامدات دانه‌ای بی اثر، گرانیوی، به ویژه در غلظت‌های کم، تغییر قابل ملاحظه‌ای نخواهد کرد. لذا می‌توان گفت که حضور ذرات جامد، فقط حذف گرما را از سطح جسم گرم شده، از طریق افزایش آشفستگی، تقویت می‌کند. در کار اخیر نظر اول تأیید و مشخص شده است که با افزایش غلظت جامد (پودر سیلیس) ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

منابع

- [1] Deckwer W.D., *Bubble column reactors*, New York, Wiley, 1992.
- [2] Kantarci N., Borak F. & Ulgen K.O., "Review: bubble column reactors", *Process Biochemistry*, Vol. 40, pp. 2263-2283, 2005.
- [3] Kolbel H., Borchers E. & Muller K., "Warmeubergang in blasensaulen. II. Messungen an viscosen suspensionen (Heat transfer in bubble columns. II. Measurements with viscous suspensions)", *Chem.-Ing.-Tech.*, Vol. 30 pp. 729-734, 1958.
- [4] Kolbel H., Borchers E. & Martins J., "Warmeubergang in blasensaulen. III. Messungen an gasdurchstromten suspensionen", *Chem. Eng. Tech.*, Vol. 32, pp. 84-88, 1960.
- [5] Deckwer W.D., Louisi Y., Zaidi & Ralek M., "Hydrodynamic properties of the Fischer-Tropsch slurry process", *Ind. Chem. Eng. Process Des. Dev.*, Vol. 19, pp. 699-708, 1980.
- [6] Li H. & Prakash A., "Heat transfer and hydrodynamics in a three-phase slurry bubble column", *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 36, pp. 4688-4694, 1997.
- [7] Prakash A., Margaritis, Li H. & Bergougnou M.A., "Hydrodynamics and local heat transfer measurements in a bubble column with suspension of yeast", *Biochem. Enging. J.*, Vol. 9, pp. 155-163, 2001.
- [8] Saxena S.C., Rao N.S. & Saxena A.C., "Heat-transfer and gas-holdup studies in a bubble column: air-water-glass bead system", *Chem. Eng. Commun.*, Vol. 96, pp. 31-55, 1990.
- [9] Li H. & Prakash A., "Heat transfer and hydrodynamics in a three-phase slurry bubble column", *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 36, pp. 4688-4694, 1997.
- [10] Li H. & Prakash A., "Influence of slurry concentrations on bubble population and their rise velocities in three-phase slurry bubble column", *Powder Technol.*, Vol. 113, pp. 158-167, 2000.
- [11] Magilliton M., Chem Y.M. & Fan L.S., "Bed-Immersed object heat transfer in a three-phase fluidized bed", *A.I.Ch.E. J.*, Vol. 34, pp. 1043-1047, 1988.
- [12] Kumar S., Kusakabe K., Raghunathan K., Fan L.S., "Mechanism of heat transfer in bubbly liquid and liquid-solid systems: single bubble injection", *A.I.Ch.E. J.*, Vol. 38, pp. 733-741, 1992.
- [13] Kim S.D., Baker C.G.J. & Bergougnou M.A., "Bubble characteristics in three-phase fluidized beds", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 32, pp. 1299-1306, 1977.
- [14] Fukuma M., Muroyama K. & Yasunishi A. "Properties of bubble swarm in a slurry bubble column", *J. Chem. Eng. Jpn.*, Vol. 20, pp. 28-33, 1987.
- [15] Miyahara T., Tsuchiya K. & Fan L.S., "Wake properties of a single gas bubble in a three-dimensional liquid-solid fluidized bed", *Int. J. Multiphase flow*, Vol. 14, pp. 749-763, 1988.
- [16] Fan L.S. & Tsuchiya K., *Bubble wake dynamics in liquid and liquid-solid suspensions*, Butterworth-Heinemann: Stoneham, MA, 1990.