



سال هفتم، شماره‌ی ۲۸
پاییز ۱۳۹۵، صفحات ۲۸-۲۳

دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

تأثیر سطح انتقال حرارت بر فرکانس تولید حباب در محلول استن خالص بر هیتر مسی

رضا مرادی

گروه مهندسی شیمی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران
reza_moradi446@yahoo.com

حسن اقدسی نیا

گروه مهندسی شیمی، واحد تبریز، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

در این مقاله، فرکانس تولید حباب جوشش استخری اشباع در محلول استن خالص در محدوده شار حرارتی ۱۰۰۰ تا ۷۵۰۰۰ وات بر مترمربع بر روی استوانه‌ای افقی از جنس مس مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های موجود مورد بررسی قرار گرفت. خطای مدل‌های مورد استفاده محاسبه شد. مشخص شد مدل Hatton and Hall کم‌ترین خطا و بهترین هم‌پوشانی و مدل Macfadden بیش‌ترین خطا را با داده‌های آزمایشگاهی دارد.

کلید واژه: جوشش، ضریب انتقال حرارت، جنس سطح، زبری سطح.

مقدمه

جوشش در سطح مشترک جامد - مایع، زمانی اتفاق می‌افتد که دمای سطح (T_w) از دمای اشباع (T_{sat}) مربوط به فشار مایع به اندازه کافی بیش‌تر باشد. جوشش یکی از فرآیندهای متداول و بسیار پیچیده در علوم مهندسی می‌باشد و دارای زیر فرآیندهای متعدد است. تجزیه و تحلیل جوشش نیازمند شناخت زیر فرآیندهایی از جمله قطر حباب، دانسیته مواضع تشکیل حباب و فرکانس حباب که به شدت بر ضریب انتقال حرارت تاثیر گذارند می‌باشد. فرآیند جوشش به طور کلی به دو صورت: جریانی و یا استخری انجام می‌گیرد، که جوشش مورد بحث در این پژوهش که به بررسی آن می‌پردازیم از نوع جوشش استخری می‌باشد. در جوشش استخری سیال ساکن است و حرکت آن در مجاورت سطح جامد توسط جابه‌جایی آزاد و اغتشاشات ناشی از رشد و جدایش حباب‌ها صورت می‌پذیرد. گرچه دما در نزدیکی سطح افزایش می‌یابد ولی در قسمت اعظم سیال دما فقط کمی از دمای اشباع بیش‌تر است. حباب‌های تولید شده در سطح مشترک جامد- مایع بالا رفته و از سطح مشترک مایع- بخار می‌گذرند. پارامترهایی از قبیل هسته‌زایی، نحوه توزیع نقاط مولد حباب، رفتار حباب‌ها در سیکل رشد و جدایی آن‌ها از سطح، مکانیسم‌های اساسی در مدل‌سازی فرآیند انتقال حرارت جوششی می‌باشند. یکی از پارامترهای کلیدی و تاثیر گذار بر نرخ انتقال حرارت، فرکانس جدایی حباب‌ها از سطح می‌باشد که رابطه تنگاتنگی را با قطر حباب و مکانیسم‌های حاکم بر نحوه رشد حباب دارا است. این پارامتر کلیدی به صورت معادله‌ی (۱) زیر تعریف شده است.

$$f = \frac{1}{n} \sum \frac{1}{t_w + t_g} \quad (1)$$

که t_g مدت زمان لازم برای رشد یک حباب از لحظه هسته‌زایی تا لحظه جدایی حباب از سطح و t_w مدت زمان لازم جهت گرمایش لایه مایع جایگزین شده تا هسته‌زایی حباب بعدی روی همان نقطه مولد حباب می‌باشد. مدل ژاکوب و

فریتز [۱] در ۱۹۳۱ در شارهای حرارتی پایین ژاکوب و همکارانش به این نتیجه رسیدند که قطر و فرکانس جدایی حباب‌ها از سطح، مستقل از شار حرارتی است و تنها اثر افزایش شار حرارتی افزایش تعداد نقاط مولد حباب است و نهایتاً حاصل ضرب قطر در فرکانس را به صورت یک عدد ثابت ارائه نمودند. مدل پیبل و گاربر [۲] در ۱۹۵۳ پیبل و همکارانش پس از انجام آزمایش‌های خود سرعت برخاست حباب‌های بخار را برای حباب‌های کروی شکل ثابت و مستقل از اندازه آن‌ها گزارش نمودند. رابطه پیبل و همکارانش برای شانزده مایع مختلف و با توجه به مطالعات و گزارشات ژاکوب و همکارانش در مراجع ثبت گردیده است. رابطه تجربی کول [۳] در ۱۹۶۰ با فرض ناحیه هیدرودینامیک و موازنه بین نیروهای دراگ و شناوری حاصل ضرب قطر در فرکانس را معادل سرعت برخاست حباب در نظر گرفته. در مراجع مقادیر پیش‌بینی شده توسط این معادله برای آب و تترا کلرید کربن و متانول بیش از مقادیر تجربی گزارش شده است. رابطه تجربی مک فادن [۴] در ۱۹۶۲ و همکارانش جوشش استخری نیتروژن مایع را مطالعه نمودند. گزارش‌های آن‌ها حاکی از عدم هم‌پوشانی معادلات موجود با داده‌های به دست آمده از آزمایش بوده است. هم‌چنین مک فادن و همکارانش از طریق آنالیز ابعادی و داده‌های موجود معادله‌ی زیر را پیشنهاد نمودند. یک موازنه نیرو توسط آن‌ها نتایج مشابهی را به دنبال داشته است. رابطه تجربی زویر [۵] در ۱۹۶۳ با بررسی روابط و داده‌های تجربی موجود و با توجه به مشاهدات ژاکوب و همکارانش با استفاده از ارتباط فاصله مرکز دو حباب متوالی و زمان تشکیل و رشد حباب‌های بخار معادله‌ی خود را ارائه نموده است. رابطه تئوری مدل هاتون و هال در سال [۶] ۱۹۶۳ این دو دانشمند با فرض ناچیز بودن زمان انتظار در برابر زمان رشد حباب حاصل ضرب فرکانس در توان دوم قطر حباب را برای جوشش استخری آب در فشارهای ۰/۱۶۲ و ۰/۰۶۶۲ و ۰/۱۰۱ مگا پاسکال با خطای ۳۴/۳٪ به صورت رابطه‌ای ارائه نمودند. رابطه ایوی [۷] در

مواد و روش‌ها

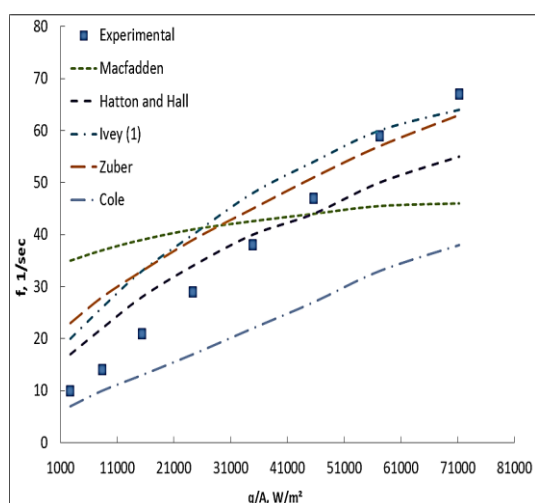
دستگاه آزمایشگاهی که ظرف آکواریومی از جنس شیشه سیکورت با مقاومت حرارتی بالا می‌باشد که در وسط آن یک میله صاف از جنس مس قرار داده، میله تو خالی بوده و یک لامپ مدادی با توان ۱۰۰۰ وات به عنوان منبع حرارت در درون آن قرار داده و برای ثبت دمای هر چه دقیق‌تر سطح میله در ولتاژهای مختلف، از چهار عدد ترموکوپل با قطر ۱/۵ میلی‌متر که در چهار سوراخ با قطر ۲ میلی‌متر که با زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم در نزدیک‌ترین قسمت در سطح خارجی لوله ایجاد شده است قرار داده و با میانگین گرفتن از دمای قرائت شده از ترموکوپل‌ها دمای سطح را در شارهای مختلف بدست می‌آید که به وسیله اتوترانس القا کرده‌ایم ثبت می‌نماییم. از طرفی برای کاهش مقاومت تماسی هوای داخل سوراخ‌ها که بین لوله و ترموکوپل ایجاد می‌شود از خمیر سیلیکون با ضریب انتقال حرارت با استفاده شده است. روش کار بدین صورت می‌باشد که ابتدا مقدار ۶ لیتر استن خالص را در ظرف آکواریومی ریخته و به وسیله یک هیتر کمکی این محلول را به دمای جوشش می‌رساند و همواره به کمک دماسنج از جوشش محلول خود آگاه و در صورت خارج شدن محلول از حالت جوشش خود، هیتر کمکی را دوباره روشن کرده. بعد از به جوش آمدن محلول هیتر کمکی را خاموش کرده و سپس برای ادامه جوشش محلول لامپ درون میله مسی را به وسیله اتوترانس روشن کرده. دامنه ولتاژهای ما از ۳۰ تا ۲۴۰ ولت است، بصورت پلکانی ۳۰ ولتی افزایش می‌یابد. برای بررسی روند تغییرات فرکانس حباب‌های جدا شده از سطح انتقال حرارت از یک دوربین با قدرت ۱۲۰۰ فرم بر ثانیه استفاده شده است. جزئیات بیش‌تر دستگاه را در شکل‌های (۱) و (۲) نمایش داده شده است.

سال ۱۹۶۷ با بررسی مدل‌های موجود و با استفاده از آنالیز ابعادی و با این ایده که تعیین یک رابطه برای کل رژیم‌های موجود در طی فرآیند جوشش مفید نخواهد بود با تعریف سه ناحیه متفاوت سه رابطه مختلف را ارائه نموده است. مدل استفان [۸] در سال ۱۹۹۲ استفان پس از آزمایشات و مشاهداتش حاصل ضرب فرکانس در قطر حباب را به شکل تابعی از قطر حباب به دست آورد و رابطه‌ی ارائه نموده که در این رابطه است برای محاسبه‌ی قطر حباب از مدل Stephan استفاده می‌شود که تابعی از اعداد بدون بعد Ar و Pr و Ja است. در جدول (۱) این روابط با مدل ریاضی آن‌ها نشان داده شده است.

جدول ۱- برخی از مدل‌های پیشگویی کننده فرکانس تولید حباب

مابعات خالص

نام ارائه دهنده مدل	مدل ریاضی
Jakob and fritz 1933 [1]	$fd = 0.078$
Peebles 1953 [2]	$fd_a = 1.18 \left[\frac{t_a}{t_a + t_w} \right] \left[\frac{\sigma g g_c (\rho_f - \rho_g)}{\rho_f^2} \right]$
Cole 1960 [3]	$f_a \frac{d_a^{0.5}}{g^{0.5}} = \sqrt{\frac{4(\rho_f - \rho_g)}{3\rho_f}}$
Macfadden 1961 [4]	$f_a d_a^{\frac{1}{2}} = 17.5 \frac{cm^{0.5}}{s}$
Zuber ۱۹۶۳ [5]	$f_a d_a = 0.59 \left[\frac{\sigma g (\rho_f - \rho_g)}{\rho_f^2} \right]^{\frac{1}{4}}$
Hatton 1966 [7]	$f_a d_a^2 = 284.7 \alpha_f$
Ivey 1967 [7]	$f_a d_a^{0.75} = 0.44 g^{0.5} cm^{0.25}$ (1) $f_a d_a^{0.5} = 0.9 g^{0.5}$ (2)
Stephan 1992 [8]	$f_a d_a = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{g}{2} \left(d_a + \frac{4\sigma}{\rho g d_a} \right)}$



نمودار ۱: مقایسه داده های تجربی فرکانس تولید حباب با مدل های موجود برای

استن خالص بر روی هیتر مس در زبری ۰/۰۳ میکرومتر

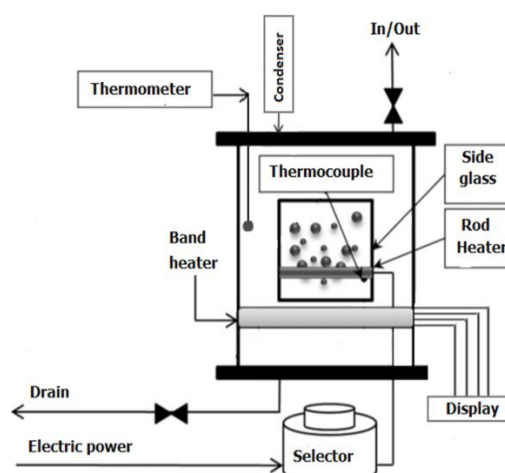
نمودار (۱) نشان می دهد که فرکانس تولید حباب تحت تاثیر شار حرارتی افزایش یافته و در این میان بعضی از روابط هم پوشانی خوبی را با داده های آزمایشگاهی دارند و برخی از مدل ها دارای خطای زیادی نسبت به داده ها بوده اند. مقدار خطای آن ها در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲- خطای متوسط فرکانس تولید حباب مدل های موجود با نتایج

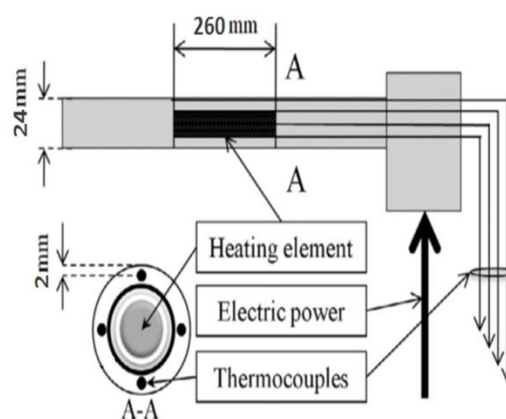
تجربی استن جهت خالص بر روی هیتر مس در زبری ۰/۰۳ میکرومتر

مدل	Macfad den	Hatton and Hall	Ivey (۱)	Zuber	Cole
خطای متوسط	۷۶/۱۲	۲۷/۸۱	۴۰/۱۲	۴۴/۹۷	۳۸/۷۵

همان گونه که مشاهده می شود در نمودار (۱)، با افزایش شار حرارتی فرکانس تولید حباب نیز افزایش یافته است. مدل گذشتگان نیز با افزایش همراه بوده که در این میان رابطه Cole هم پوشانی بهتری با نتایج آزمایشگاهی داشته است.



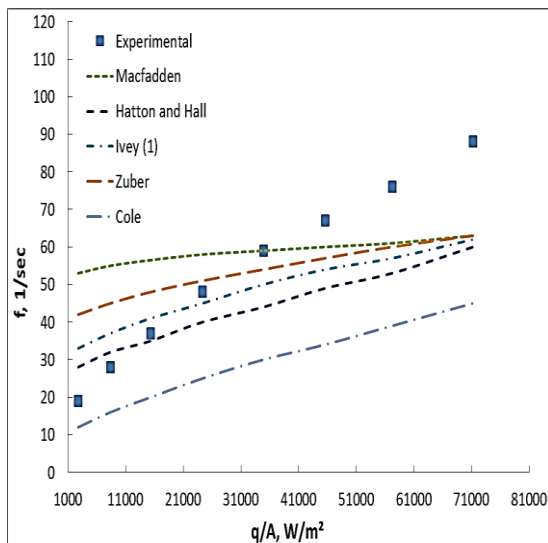
شکل ۱: نمای کلی دستگاه جوشش استخری



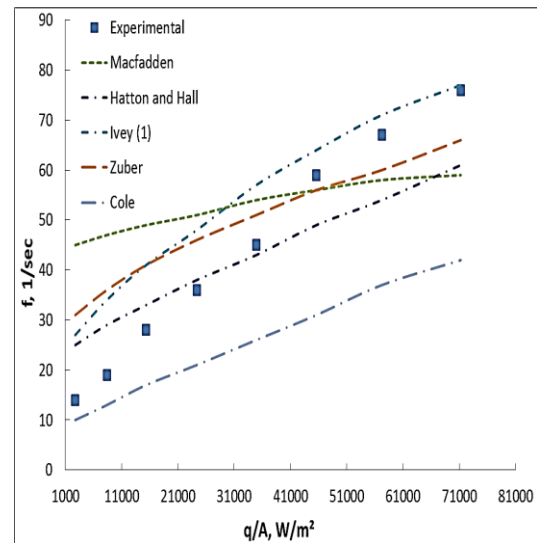
شکل ۲: نمای کلی هیتر میله ای

یافته ها و بحث

در این بخش به بررسی تغییرات فرکانس تولید حباب بر اساس افزایش شار حرارتی در محلول استن خالص و چگونگی افزایش آن در سه زبری مختلف که در سطح هیتر ایجاد شده، پرداخته می شود. نتایج در نمودارهای (۱)، (۲) و (۳) نشان داده شده است.



نمودار ۳: مقایسه داده های تجربی فرکانس تولید حباب با مدل های موجود برای استن خالص بر روی هیتر مس در زبری ۰/۱۴ میکرومتر



نمودار ۲: مقایسه داده های تجربی فرکانس تولید حباب با مدل های موجود برای استن خالص بر روی هیتر مس در زبری ۰/۱۴ میکرومتر

جدول ۴- خطای متوسط فرکانس تولید حباب مدل های موجود با نتایج تجربی استن جهت خالص بر روی هیتر مس در زبری ۰/۵ میکرومتر

مدل	Macfadden	Hatton and Hall	Ivey (1)	Zuber	Cole
خطای متوسط	۵۰/۸۲	۲۴/۲۱	۲۶/۵۱	۳۶/۳۶	۴۶/۹۵

همان طور که در نمودار (۱)، (۲) و (۳) مشخص است با افزایش زبری سطح، فرکانس تولید حباب افزایش یافته که این افزایش باعث افزایش اختلاط محلول در حال جوش و به نحوی به باعث آشفتگی در محلول مورد نظر شده که نتیجه آن افزایش ضریب انتقال حرارت برای محلول می باشد. البته این افزایش تولید فرکانس فقط در محدوده جوش هسته که حباب تولید می شود در افزایش ضریب انتقال حرارت موثر است و نه دیگر نواحی جوش که حباب تولید نمی شود.

نتیجه گیری

فرکانس تولید حباب برای محلول استن خالص بر روی هیتر مسی در فشار اتمسفریک با نهایت دقت و تکرار انجام گرفته شد و نشان داد که با افزایش شار حرارتی، فرکانس تولید

نمودار (۲) نیز همانند نمودار (۱) نشان می دهد که فرکانس تولید حباب تحت تاثیر شار حرارتی افزایش یافته و در این نتایج باز هم بعضی از مدل ها هم پوشانی خوبی را با داده های آزمایشگاهی داشته اند. مقدار خطای آن ها در جدول (۳) آمده است.

جدول ۳- خطای متوسط فرکانس تولید حباب مدل های موجود با نتایج تجربی استن جهت خالص بر روی هیتر مس در زبری ۰/۱۴ میکرومتر

مدل	Macfadden	Hatton and Hall	Ivey (1)	Zuber	Cole
خطای متوسط	۶۸/۴۸	۲۶/۳۶	۳۶/۷۹	۴۰/۱۵	۴۱/۰۹

نمودار (۳) افزایش زبری سطح انتقال حرارت را با افزایش ۰/۵ میکرومتر بررسی می کند که باعث شده است که فرکانس تولید حباب افزایش یافته که این افزایش تاثیر مستقیم بر ضریب انتقال حرارت را دارد.

[7] Ivey, H. J., 1967, Relationships Between Bubble Frequency, Departure Diameter and Rise Velocity in Nucleate Boiling, International Journal Heat Mass Transfer, vol.10, pp.1023-1040.

[8] Stephan, K., 1992, Heat Transfer in Condensation and Boiling, Springer, New York.

فهرست علائم

حرف	شرح	حرف	شرح
$\frac{q}{A}$	شار حرارتی	f	فرکانس تولید حباب
T_{sat}	دمای اشباع	g_c	ضریب تصحیح آحاد ناسازگار
T_s	دمای سطح	R_p	زبری متوسط سطح انتقال حرارت
p^{sat}	فشار اشباع	ρ	چگالی
ρ^{sat}	چگالی اشباع	K_L	رسانایی حرارتی مایعات
ρ_L	دانسیته مایع	σ	کشش سطحی
ρ_r	دانسیته بخار	d_b	قطر حباب

حباب افزایش پیدا می‌کند. این افزایش همان طور که ذکر شده باعث افزایش ضریب انتقال حرارت در پی افزایش اختلاط محلول می‌باشد. مدل‌ها و روابط به کار رفته هر کدام دارای خطاهایی می‌باشند که مدل Hatton and Hall دارای کم‌ترین خطا نسبت به سایر روابط می‌باشد.

تقدیر و تشکر

نگارنده بر خود واجب می‌داند که از زحمات و الطاف استادان و مدیر گروه مهندسی شیمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر در انجام آزمایشات مربوطه نهایت تشکر را بنماید.

منابع

- [1] Fritz, W., Jakob, 1931, Berechnung des maximal volumens von Dampfblase, Phys. Z., Vol. 36, PP. 379-384.
- [2] Peebles, F. N., Garber, H.J., 1953, Studies on Motion of Gas Bubbles in Liquids, Chem. Eng. Prog., vol.49, pp.88-97.
- [3] Cole, R., 1960, Photographic Study of Boiling in the Region of Critical Heat Flux, AIChE Journal, vol.6, pp.533-542.
- [4] McFadden, P. W., Grassmann, P., 1962, The Relation Between Bubble Frequency and Diameter During Nucleation Pool Boiling, Int. J. Heat Mass Transfer, 1962, vol.5, pp.169-173.
- [5] Zuber, N., 1963, Nucleate Boiling the Region of Isolated Bubbles Similarity with Natural Convection, Int. J. Heat Mass Transfer, vol.6, pp.53-65.
- [6] Hatton, A.P., Hall, I.S., 1966, Photographic Study of Boiling on Prepared Surfaces, Third International Heat Transfer Conference, Chicago, vol.4, pp.24-37.