



دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

سال هفتم، شماره‌ی ۲۶
بهار ۱۳۹۵، صفحات ۵۳-۴۷

بررسی تغییرات فرکانس تولید حباب در محلول‌های استن و آب خالص بر هیتر برنجی

رضا مرادی

گروه مهندسی شیمی، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

حسن اقدسی نیا

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

چکیده

در این مقاله، فرکانس تولید حباب جوشش استخری اشباع در محلول آب خالص و استن خالص در محدوده شار حرارتی ۱۰۰۰ تا ۷۵۰۰۰ وات بر متر مربع بر روی استوانه افقی از جنس برنج مورد بررسی قرار گرفت و محلولی که عملکرد بهتری در فرکانس تولید حباب دارد مشخص گردید. داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های موجود مورد بررسی قرار گرفت. خطای مدل‌های مورد استفاده محاسبه شد و مشخص گردید که در استن خالص مدل Hatton and Hall و در آب خالص مدل Ivey کم‌ترین خطا و در هر دو محلول مدل Macfadden بیش‌ترین خطا را با داده‌های آزمایشگاهی داشت.

کلیدواژه: جوشش، ضریب انتقال حرارت، جنس سطح، زبری سطح.

مقدمه

جوشش در سطح مشترک جامد - مایع، زمانی اتفاق می افتد که دمای سطح (T_w) از دمای اشباع (T_{sat}) مربوط به فشار مایع به اندازه کافی بیش تر باشد. جوشش یکی از فرآیندهای متداول و بسیار پیچیده در علوم مهندسی می باشد 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 می باشد. جوشش یکی از پدیده‌های مهم فیزیکی است که در فرآیندهای صنعتی به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته و می گیرد. در پدیده جوشش، حضور حباب‌ها، مایع در حال جوشش و نیز سطح جامد حرارت دهنده به عنوان سه فاز گاز، مایع و جامد ایجاد محیطی می کنند که از دیدگاه ترمودینامیک و نیز مکانیک سیالات ناهمگن خوانده می شود. این ناهمگنی موجب پیچیدگی‌های فوق العاده این مکانیسم در مقایسه با سایر مکانیسم‌های انتقال حرارت - مانند هدایت و جابجایی - می گردد. پارامترهایی از قبیل هسته زایی، نحوه توزیع نقاط مولد حباب، رفتار حباب‌ها در سیکل رشد و جدایی آن‌ها از سطح، مکانیسم های اساسی در مدل سازی فرآیند انتقال حرارت جوششی می باشند. یکی از پارامترهای کلیدی و تاثیرگذار بر نرخ انتقال حرارت فرکانس جدایی حباب‌ها از سطح می باشد که عبارتند از تعداد حباب جدا شده از یک چشمه مولد حباب بر واحد زمان و رابطه تنگاتنگی را با قطر حباب و مکانیسم‌های حاکم بر نحوه رشد حباب دارا است. پارامتر مهم دیگر فرآیند جوشش هسته‌ای که اشاره دارد به قطر حباب در همان لحظه‌ای که سطح گرمکن را ترک می کند. پارامتر کلیدی فرکانس به صورت معادله ی (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 هسته زایی تا لحظه جدایی حباب از سطح و t_w مدت زمان لازم جهت گرمایش لایه مایع جایگزین شده تا هسته زایی حباب بعدی روی همان نقطه مولد حباب می باشد. مدل ژاکوب و فریتر [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 درمراجعه 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 زوبر [۵] در ۱۹۶۳ با بررسی روابط و داده های 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 تنوری مدل هاتون و ها [۶]

Ar و Pr و Ja است. در جدول (۱) این روابط با مدل ریاضی آن‌ها نشان داده شده است.

مواد و روش‌ها

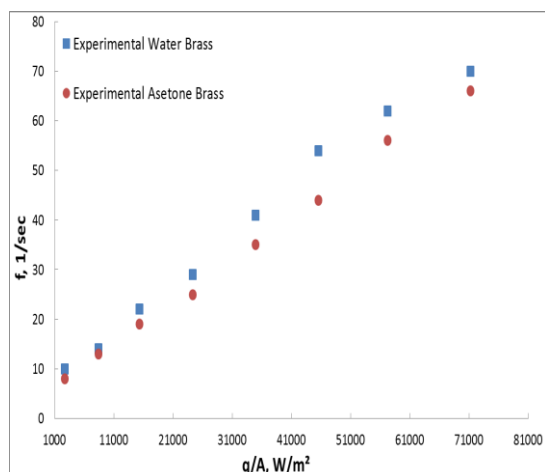
دستگاه آزمایشگاهی که ظرف آکواریومی از جنس شیشه سیکورت با مقاومت حرارتی بالا می باشد که در وسط آن یک میله صاف از جنس برنج قرار داده، میله تو خالی بوده و یک لامپ مدادی با توان ۱۰۰۰ وات به عنوان منبع حرارت در درون آن قرار دارد. برای ثبت دمای هر چه دقیق تر سطح میله در ولتاژهای مختلف، از چهار عدد ترموکوپل با قطر ۱/۵ میلی متر استفاده شده که در چهار سوراخ با قطر ۲ میلی متر با زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم در نزدیک ترین قسمت در سطح خارجی لوله ایجاد شده است قرار دارند و با میانگین گرفتن از دمای قرائت شده از ترموکوپل‌ها دمای سطح در شارهای مختلف بدست می آید، این شارها را اتوترنس القا می کند. از طرفی برای کاهش مقاومت تماسی هوای داخل سوراخ ها که بین لوله و ترموکوپل ایجاد می شود از خمیر سیلیکون با ضریب انتقال حرارت با استفاده شده است. روش کار بدین صورت می باشد که ابتدا مقدار ۶ لیتر استن خالص یا آب خالص را در ظرف آکواریومی ریخته و به وسیله یک هیتر کمکی این محلول به دمای جوشش شده و همواره به کمک دماسنج از جوشش محلول خود آگاه و در صورت خارج شدن محلول از حالت جوشش خود، هیتر کمکی دوباره روشن می شود. بعد از به جوش آمدن محلول هیتر کمکی را خاموش کرده و سپس برای ادامه جوشش محلول لامپ درون میله برنجی به وسیله اتوترانس روشن می شود. دامنه ولتاژهای ما از ۳۰ تا ۲۴۰ ولت است، بصورت پلکانی ۳۰ ولتی افزایش می یابد. 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 بیش تر دستگاه را در شکل‌های (۱) و (۲) نمایش داده شده است.

در سال 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 رابطه ای ارائه نمودند. رابطه ایوی [۷] در 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.

جدول ۱: برخی از مدل‌های پیشگویی کننده فرکانس تولید حباب مایعات خالص

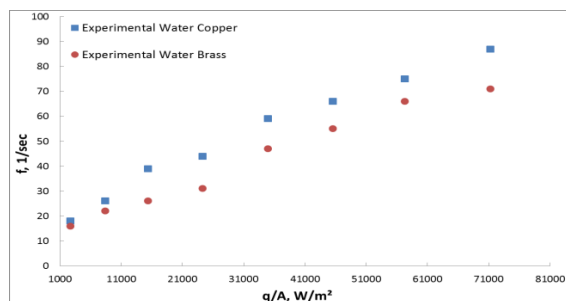
نام ارائه دهنده مدل	مدل ریاضی
Jakob and fritz 1933 [1]	$fd = 0.078$
Peebles 1953 [2]	$f_a d_a = 1.18 \left[\frac{t_a}{t_a + t_w} \right] \left[\frac{\sigma g g_c (\rho_f - \rho_g)}{\rho_f^2} \right]^{\frac{1}{4}}$
Cole 1960 [2]	$f_a \frac{d_a^{0.5}}{g^{0.5}} = \sqrt{\frac{4(\rho_f - \rho_g)}{3\rho_f}}$
Macfadden 1961 [4]	$f_a d_a^{\frac{1}{2}} = 17.5 \frac{cm^{0.5}}{s}$
Zuber 1963 [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]	$f_a d_a = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{g}{2} \left(d_a + \frac{4\sigma}{\rho g d_a} \right)}$

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 استفان استفاده می شود که تابعی از اعداد بدون بعد



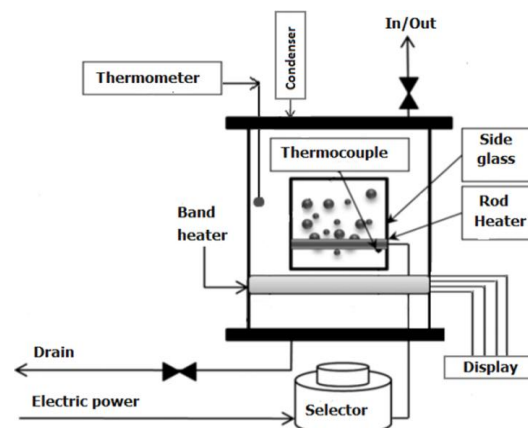
نمودار ۱: مقایسه فرکانس تولید حباب در آب خالص و استن خالص با هیتر برنج در زبری ۰/۰۳ میکرومتر

نمودار (۱) به مقایسه فرکانس تولید حباب بین آب خالص و استن خالص می‌پردازد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان تولید فرکانس در آب خالص بیش‌تر از استن بوده است.

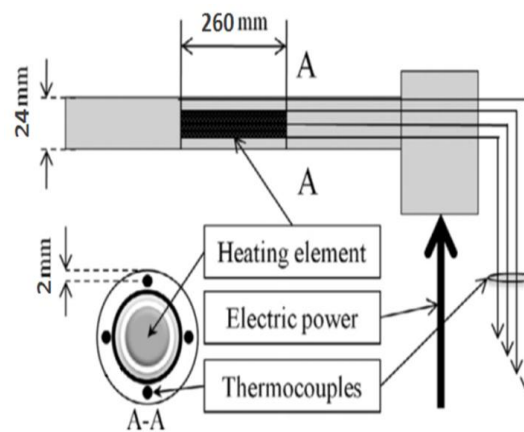


نمودار ۲: مقایسه فرکانس تولید حباب در آب خالص و استن خالص با هیتر برنج در زبری ۰/۱۴ میکرومتر

نمودار (۲) به مقایسه فرکانس تولید حباب بین آب خالص و استن خالص با افزایش زبری سطح انتقال حرارت به ۰/۱۴ میکرومتر می‌پردازد. که میزان تولید فرکانس در آب خالص باز هم بیش‌تر از استن بوده است.



شکل ۱: نمای کلی دستگاه جوش استخری



شکل ۲: نمای کلی هیتر میله ای

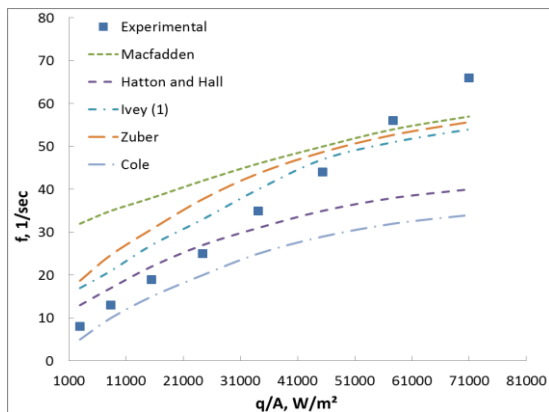
یافته‌ها و بحث

برای بررسی مقایسه تغییرات فرکانس تولید حباب در محلول‌های آب خالص و استن خالص بر اساس افزایش شار حرارتی پرداخته شده است. نمودارهای (۱) و (۲) مقایسه تغییرات فرکانس تولید حباب بر اساس افزایش شار حرارتی دو محلول محلول آب خالص و استن خالص را در دو زبری متفاوت سطح انتقال حرارت (هیتر برنجی) نشان می‌دهد نشان داده ایم.

نمودار (۴) در این نمودار با افزایش زبری سطح انتقال حرارت از ۰/۰۳ میکرومتر به ۰/۱۴ میکرومتر به بررسی و مقایسه روابط موجود و هم پوشانی آنها با داده های آزمایشگاهی با افزایش شار حرارتی برای فرکانس تولید حباب در آب خالص می پردازد. جدول (۳) مقدار خطای این روابط را با داده های آزمایشگاهی ذکر شده است.

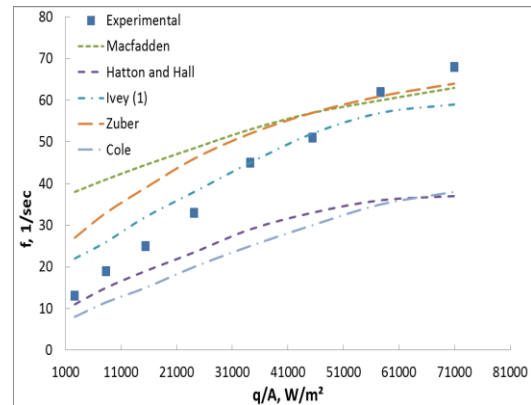
جدول ۳- خطای متوسط فرکانس تولید حباب مدل های موجود با نتایج تجربی جهت آب خالص بر روی هیتر برنج در زبری ۰/۱۴ میکرومتر

مدل	Macfadden	Hatton and Hall	Ivey (1)	Zuber	Cole
خطای متوسط	56.05	33.03	20.62	35.72	43.53



نمودار ۵: مقایسه فرکانس تولید حباب مدل های موجود برای استن خالص بر روی هیتر برنج در زبری ۰/۰۳ میکرومتر

نمودار (۵) در این نمودار به بررسی و مقایسه مدل های موجود و هم پوشانی آنها با داده های آزمایشگاهی با افزایش شار حرارتی برای فرکانس تولید حباب استن خالص در زبری سطح انتقال حرارت ۰/۰۳ میکرومتر می پردازد. جدول (۴) مقدار خطای این روابط را با داده های آزمایشگاهی ذکر شده است.

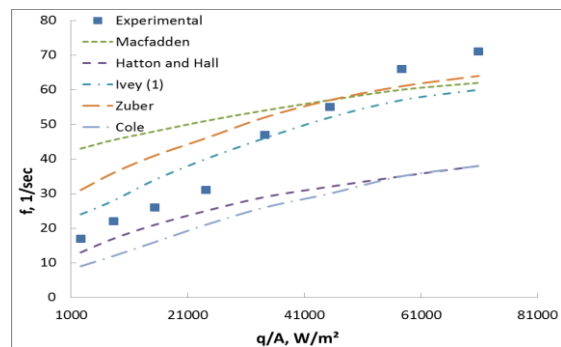


نمودار ۳: مقایسه فرکانس تولید حباب مدل های موجود برای آب خالص بر روی هیتر برنج در زبری ۰/۰۳ میکرومتر

نمودار (۳) در این نمودار به بررسی و مقایسه و روابط موجود و هم پوشانی آنها با داده های آزمایشگاهی با افزایش شار حرارتی برای فرکانس تولید حباب آب خالص در زبری سطح انتقال حرارت ۰/۰۳ میکرومتر می پردازد. جدول (۲) مقدار خطای این روابط را با داده های آزمایشگاهی ذکر شده است.

جدول ۲- خطای متوسط فرکانس تولید حباب مدل های موجود با نتایج تجربی جهت آب خالص بر روی هیتر برنج در زبری ۰/۰۳ میکرومتر

مدل	Macfadden	Hatton and Hall	Ivey (1)	Zuber	Cole
خطای متوسط	۵۸/۷۱	۳۰/۹۵	۲۱/۶۱	۳۸/۴۸	۳۷/۴۱



نمودار ۴: مقایسه فرکانس تولید حباب مدل های موجود برای آب خالص بر روی هیتر برنج در زبری ۰/۱۴ میکرومتر

همان طور که در نمودارها مشخص است با افزایش شار حرارتی، فرکانس تولید حباب چه در آب خالص و چه در استن خالص افزایش یافته که این افزایش باعث افزایش اختلاط در محلول در حال جوش مورد نظر شده که نتیجه آن افزایش ضریب انتقال حرارت برای محلول می‌باشد. طبق نمودارهای (۱) و (۲) حال این افزایش فرکانس تولید حباب در آب خالص بیش‌تر از استن خالص بوده است و به همین دلیل ضریب انتقال حرارت در آب خالص بیش‌تر از استن خالص می‌باشد.

نتیجه‌گیری

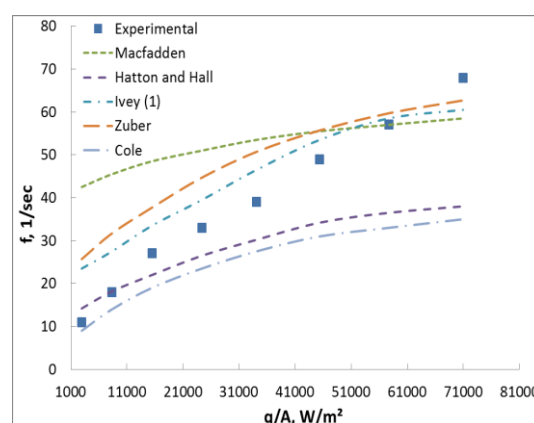
فرکانس تولید حباب برای محلول آب خالص و استن خالص بر روی هیتر برنجی در فشار اتمسفریک با نهایت دقت و تکرار انجام گرفته شد و نشان داد که با افزایش شار حرارتی، فرکانس تولید حباب همواره افزایش پیدا می‌کند. این افزایش در آب خالص در هر دو زیری سطح انتقال حرارت بیش‌تر از استن خالص بوده است. در میان روابط و مدل‌های پیشین مدل همان طور که مشخص است مدل Ivey برای آب خالص و 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.

جدول ۴- خطای متوسط فرکانس تولید حباب مدل‌های موجود با نتایج تجربی جهت استن خالص بر روی هیتر برنج در زیری ۰/۰۳ میکرومتر

مدل	Macfadden	Hatton and Hall	Ivey (1)	Zuber	Cole
خطای متوسط	۸۵/۸۵	۲۷/۹۸	۳۷/۴۵	۴۹/۵۹	۳۱/۴۲



نمودار ۶: مقایسه فرکانس تولید حباب مدل‌های موجود برای استن خالص بر روی هیتر برنج در زیری ۰/۱۴ میکرومتر

نمودار (۶) در این نمودار با افزایش زیری سطح انتقال حرارت از ۰/۰۳ میکرومتر به ۰/۱۴ میکرومتر به بررسی و مقایسه روابط موجود و هم‌پوشانی آنها با داده‌های آزمایشگاهی با افزایش شار حرارتی برای فرکانس تولید حباب در استن خالص می‌پردازد. جدول (۵) مقدار خطای این روابط را با داده‌های آزمایشگاهی ذکر شده است.

جدول ۵- خطای متوسط فرکانس تولید حباب مدل‌های موجود با نتایج تجربی جهت استن خالص بر روی هیتر برنج در زیری ۰/۱۴ میکرومتر

مدل	Macfadden	Hatton and Hall	Ivey (1)	Zuber	Cole
خطای متوسط	۷۹/۷۶	۲۵/۷۶	۳۱/۵۳	۴۲/۶۵	۳۱/۹۸

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, 49: 88-97.
- [3] Cole, R., 1960, Photographic Study of Boiling in the Region of Critical Heat Flux, AIChE Journal, 6: 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, 5: 169-173.
- [5] Stephan, K., Abdelsalam, K., Heat transfer correlation for natural convection boiling, International Journal of Heat and Mass Transfer 23, 1980, 73-87.
- [6] Zuber, N., 1963, Nucleate Boiling the Region of Isolated Bubbles Similarity with Natural Convection, Int. J. Heat Mass Transfer, 6: 53-65.
- [7] Fritz, W., Jakob, 1931, Dampfblase, Phys. Z., 36: 379-384.
- [8] Hatton, A. P., Hall, I. S., 1966, photographic Study of Boiling on Prepared Surfaces, Third International Heat Transfer Conference, Chicago, 4: 24-37.
- [9] Fritz, W., Jakob, 1931, Berechnung des maximal volumens von Dampfblase, Phys. Z., Vol. 36, PP. 379-384.
- [10] Ivey, H.J., 1967, Relationships Between Bubble Frequency, Departure Diameter and Rise Velocity in Nucleate Boiling, International Journal Heat Mass Transfer, 10: 1023-1040.
- [11] Stephan, K., 1992, Heat Transfer in Condensation and Boiling, Springer, New York.