مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1396، دوره 17، شماره 7، ص‌ص 39-48

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

ارائه رابطه تجربی جدید و به‌دست آوردن نقشه الگوی جریان برای لوله‌های دیمپل در جریان دوفازی برای مبرد ایزوبوتان

علی وهابی[1]، مازیار شفائی[2*]، علیرضا سرمدیان[1]، هومن مشعوف[1]

1- کارشناسی‌ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه تهران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، صندوق پستی 143951374، mshafaee@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 19 فروردین 1396

پذیرش: 27 اردیبهشت 1396

ارائه در سایت: 16 تیر 1396

کلید واژگان:

جوشش

چگالش

سیکل

برازش

رابطه تجربی

چکیده

در مقاله حاضر نقشه الگوی جریان در طی فاز جوشش و چگالش جابه‌جای اجباری هیدروکربن R600-a داخل لوله افقی صاف و دیمپل با استفاده از سیکل طراحی شده برای جریان دوفازی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. براساس داده‌های تجربی که از این آزمایشات به‌دست آمده برازش نتایج تجربی و کمک گرفتن از نرم‌افزار متلب رابطه تجربی بیان می‌شود که بتواند نقشه الگوی جریان را برای این مبرد با دقت مناسب نشان دهد. این سیکل متشکل از یک پمپ، دو پیش گرمکن، دو بخش آزمون، دو چگالنده، جریان‌سنج و برگردان جریان است. تبخیرکننده آزمایش در این مطالعه یک لوله مسی به قطر داخلی 8.7 میلی‌متر و طول 1200 میلی‌متر است که گرمای مورد نیاز برای تبخیر سیال به‌وسیله المنت حرارتی پیچیده شده دور آن نأمین می‌شود. این لوله به صورت دو مدل دیمپل‌دار و صاف طراحی شده است تا تأثیر قرارگیری دیمپل‌ها نیز در سطح داخلی لوله‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. آزمون در دبی جرمی 155 تا 470 kg/m^2s و کیفیت بخار 0.05 تا 0.78 انجام شد. در طول آزمایش الگوهای جریان حلقوی، منقطع (تناوبی) و جدا شده موجی برای لوله صاف مشاهده شد، این در حالی است که برای لوله دیمپل تنها الگوهای منقطع و حلقوی قابل مشاهده بود و الگوی جریان جدا شده موجی مشاهده نشد. مشاهدات نشان دادند که ناحیه گذار از الگوی جریان منقطع به حلقوی در لوله دیمپل در کیفیت بخار کمتری رخ می‌دهد که این امر موجب افزایش ضریب انتقال حرارت نیز می‌شود.

Discovering an empirically new relation and obtaining the flow pattern map for dimpled tubes in two-phase flow for refrigerant R600-a

Ali Vahabi, Maziar Shafaee*, Alireza Sarmadian, Hooman Mashouf

- Faculty of New Sciences and Technologies, University Of Tehran, Tehran, Iran.
* P.O.B. 143951374 Tehran, Iran, mshafaee@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 08 April 2017
Accepted 17 May 2017
Available Online 07 July 2017

Keywords:
Boiling
Condensation
Cycle
empirical relation
fitness

ABSTRACT

In present work, heat transfer and flow pattern map of dimpled and horizontal tubes were studied during phases of boiling and condensation of mandatory convection of hydrocarbon R600-a. Empirical relationship will be expressed based on empirical data obtained by such experiments and the experimental results will be fit with Matlab software to show flow pattern map for such refrigerant with proper accuracy. The cycle consists of a pump, two preheaters, two testing parts, two condensers, flow meter and reversing valve. In this study, experimental evaporator is a copper tube with internal diameter of 8.7 mm and length of 1200 mm. The heat required for fluid evaporation is supplied by a thermal element twisted around it. Such tube has been designed in the form of dimpled and straight models to evaluate the effect of placement of dimples inside tubes. The test was conducted by refrigerant mass flow between 155 and 470 kg/m^2s and vapor quality between 0.05 and 0.78. Moreover, flow patterns and their transitions for refrigerant R-600a during flow boiling inside a helically dimpled tube and a smooth tube were visually observed and analyzed. Annular, intermittent, and stratified-wavy flow were recognized for plain tube whereas there was no stratified-wavy flow in flow pattern visualization of dimpled tube. Investigation clearly shows that the dimples in evaporation significantly impact the two phase flow pattern. Inside the helically dimpled tube the intermittent/annular transitions occur at lower vapor quality value than for the smooth tube.

1- مقدمه

امروزه به دلیل محدودیت‌های منابع انرژی و افزایش هزینه‌ها و با توجه به این‌که جهان به سمت ذخیره کردن انرژی پیش می‌رود، مسائل مربوط به بهینه‌سازی مبدل‌های حرارتی همواره مورد توجه محققان بسیاری بوده است. در سال‌های اخیر توجه بسیاری به مبدل‌های با سطوح فشرده معطوف و در نتیجه مبدل‌هایی با وزن کمتر، کوچک‌تر و ارزان‌تر طراحی شده است. سرمایش و گرمایش سیال در فرایندها یک رویکرد استاندارد در بسیاری از صنایع است که توسط مبدل‌های حرارتی انجام می‌گیرد، در آن سیال گرم یا سرد شده درون لوله‌های حرارتی جریان دارد. مکانیزم انتقال حرارت در این لوله‌ها می‌تواند جابه‌جایی آزاد یا اجباری باشد. اواپراتور و چگالنده از تجهیزات

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Vahabi, M. Shafaee, A. Sarmadian, H. Mashouf, Discovering an empirically new relation and obtaining the flow pattern map for dimpled tubes in two-phase flow for refrigerant R600-a, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 39-48, 2017 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.25.7]

مهم و پرکاربرد سیستم‌های تبرید و تهویه مطبوع صنعتی است. این وسایل بخش جدایی‌ناپذیر بسیاری از سیستم‌های مهندسی دیگر مانند نیروگاه بخار و دستگاه‌های شیمیایی را نیز تشکیل می‌دهند. طراحی تجهیزات حرارتی کارآمد منجر به حرکت طراحان به سمت عایق‌بندی و صرفه‌جویی در انرژی شده که منجر به بهبود عملکرد اواپراتور و چگالنده‌ها خواهد شد. برای این منظور اقداماتی صورت گرفته تا نرخ انتقال حرارت به مایع مبرد در حجم کوچک‌تر افزایش یابد تا هم اندازه دستگاه‌های مبرد کوچک‌تر شود و هم بازده کاری مبدل‌های حرارتی افزایش یابد. به خصوص امروزه با پیشرفت‌هایی که در صنایع مختلف از جمله الکترونیک و صنعت شده نیاز به مبدل‌های حرارتی در اندازه‌های کوچک و با کارایی بیشتر بسیار مهم است.

چیو و همکاران [1] افزایش سطح انتقال حرارت در یک کانال را با استفاده از دو مدل دیمپل مختلف، نیم‌کره و قطره اشک مطالعه کرده‌اند. دیمپل به‌عنوان تولیدکننده گردابه برای ایجاد اختلاط مغشوش در جریان جهت افزایش انتقال حرارت در مقادیر رینولدز 10000 تا 50000 و نسبت طول کانال به قطر کانال $H/D = 0.5, 1.5, 3.0$ و نسبت ارتفاع برجستگی به قطر $\delta/D = 0.575$ به کار رفته است. این کار موجب افزایش انتقال حرارت 2.5 برابر بیشتر از مقادیر کانال صاف و با افت فشار بسیار پایین خواهد شد که این افت فشار تقریباً نصف افت فشاری است که توسط دنده‌های توربیلاتور معمولی ایجاد می‌شود.

موون و همکاران [2] به طور تجربی اثر تلفات اصطکاک در مسیر مستطیل شکل دارای فرورفتگی با فرورفتگی‌های زیگزاگی بر دیواره را مطالعه کرده‌اند. هندسه استفاده شده نسبت طول کانال به قطر $H/D = 0.37, 0.74, 1.11, 1.49$ و رینولدز 12000 تا 60000 بود. افزایش انتقال حرارت تقریباً 1.2 برابر بیشتر از پیکربندی کانال صاف با مقدار $H/D = 0.37$ بود. افزایش انتقال حرارت با تغییر میزان رینولدز و طول کانال ثابت است و این دو پارامتر تأثیر کمتری بر نرخ انتقال حرارت دارد. افزایش ضریب اصطکاک 2.0 برابر کمتر از کانال صاف و تلفات فشار نیز تقریباً برای ارتفاع کانال ثابت باقی مانده بود.

محمود و همکاران [3] ویژگی‌های جریان و انتقال حرارت را روی ارائه زیگزاگی از فرورفتگی با $\delta/D = 0.2$ مورد مطالعه قرار داده‌اند. تغییرات برای عدد ناسلت متوسط کلی با عدد رینولدز کوچک است. محمود و همکاران [4] اثر برآمدگی را بر دیوار مقابل با سطح فرورفتگی مورد بررسی قرار داده‌اند. محمود و لیگرانی [5] به طور تجربی تأثیر نسبت ابعاد گودی نسبت درجه حرارت، عدد رینولدز و ساختارهای جریان را در یک کانال دارای فرورفتگی در رینولدز 600 تا 11000 و نسبت رکود درجه حرارت ورودی هوا از 0.94 با $H/D = 0.20, 0.25, 0.5, 1.00$ را نشان دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که جفت گردابه که به صورت دوره‌ای از فرورفتگی ایجاد می‌شوند قوی‌تر است و عدد ناسلت محلی با کاهش ارتفاع کانال افزایش می‌یابد.

برگلس و لیگرانی [6] به طور تجربی اثر عمق گودی و برجستگی را روی سطح در یک کانال با نسبت عمق گودی $\delta/D = 0.1, 0.2, 0.3$ تجزیه و تحلیل کرده است.

از سوی دیگر باید یادآور شد که تاکنون مطالعات گسترده‌ایی در جریان‌های دوفازی مبردهای مختلف صورت گرفته که بیشتر این مطالعات روی مبردهای کلروفلوئوروکربن، هیدرو کلروفلوئوروکربن و هیدرو فلوئوروکربن است. پروتکل مونترال (1987) [7] استفاده از آن‌ها را با توجه به اثرات تخریبی مبردهای کلروفلوئوروکربن و هیدرو کلروفلوئوروکربن بر لایه اوزن ممنوع کرد و مبردهای هیدرو فلوروکربنی به عنوان مبردهای جایگزین مناسب معرفی شدند. پس از آن در پروتکل کیوتو (1997) [8] با تمرکز روی اثرات زمین گرمایی مبردهای هیدرو فلوروکربنی، استفاده از این مبردها نیز به دلیل پتانسیل گرمایش جهانی آن‌ها محدود شد. مبردهای طبیعی مانند آب، آمونیاک، دی‌اکسیدکربن، هیدروکربن‌ها و هوا به دلیل اثرات قابل اغماض روی گرمایش جهانی و تخریب لایه اوزن به عنوان مبردهای جایگزین به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند. مطالعه کنونی بر مبرد ایزوبوتان (R600-a) انجام می‌شود که یکی از انواع مبردهای طبیعی است. این مطالعه برای به‌دست آوردن داده‌های الگوی جریان جوششی و چگالشی R600-a، نقشه الگوی جریان جوششی و چگالشی، اصلاح و ارائه روابط تجربی داخل لوله صاف و لوله دیمپل انجام شده است.

از مبرد R600-a در گذشته در یخچال و فریزر دهه چهل میلادی استفاده می‌شده، ولی امروزه گسترش زیادی پیدا کرده است، در حال حاضر استفاده وسیعی در یخچال و فریزر تجاری داخلی و کوچک و فریزر در اروپا پیدا کرده است. از آن‌جا که از نظر در دسترس بودن، ایزوبوتان (R600-a) در سراسر جهان به سادگی پیدا می‌شود و استفاده از آن به طور گسترده برای جایگزینی کلروفلوئورو کربن مورد بحث است. ایزوبوتان یک مبرد با بهره‌وری انرژی خوب، دارای یک سری ویژگی‌هاست. این مبرد نیاز به مراقبت‌های ویژه برای جلوگیری از اشتعال‌پذیری دارد. استفاده از R600-a به دلیل اثرات مخرب زیست محیطی کم و کارایی ترمودینامیکی بسیار عالی در حال افزایش است.

در این راستا نصر و همکاران [9] یک تحقیق تجربی از ویژگی‌های انتقال حرارت و تغییرات الگوی جریان مبرد هیدروکربن R600-a در طول جریان جوشش در داخل لوله صاف افقی در گستره وسیعی از دبی جرمی 130 تا 380 kg/m^2s و کیفیت بخار 0.05 تا 0.70 انجام داده‌اند. آن‌ها مشاهده کردند که الگوهای جریان غالب الگوهای جریان متناوب و حلقوی است. آن‌ها نتیجه گرفتند که ضریب انتقال حرارت با سرعت شار جرم در کیفیت بخار ثابت افزایش می‌یابد، علاوه‌بر این کیفیت بخار در سرعت جرم ثابت افزایش یافته است. کپتی و همکاران [10] به صورت آزمایشگاهی جوشش R600-a را در داخل یک لوله صاف افقی 2.6 میلی‌متر مورد مطالعه قرار داده‌اند. شرایط آزمایش آن‌ها شامل شار حرارتی در محدوده 44 تا 95 kW/m^2 بود. سرعت جرم نیز در محدوده 240 تا 440 kg/m^2s قرار داشت. آن‌ها نشان دادند که اثر شار حرارتی بر ضریب انتقال حرارت در کیفیت‌های بخار کم برای سرعت‌های پایین جرمی معنی‌دار است. با توجه به مطالعه آن‌ها در مقایسه با R134a، R600-a ضریب انتقال حرارت و افت فشار بالاتری در شرایط عملیات مشابه فراهم می‌کند.

ایوب و همکاران [11] مطالعه‌ای تجربی بر یک لوله حرارتی دیمپل‌دار با قطر خارجی 19.05 mm انجام دادند. هدف از این مطالعه درک اثر انتقال زود هنگام اجباری به جریان حلقوی بر افت فشار و ضریب انتقال حرارت در یک لوله افقی است. در این مطالعه از مبرد R-134a در دمای اشباع 5 درجه سانتی‌گراد، نرخ شار حرارتی 2.5 تا 15 kW/m^2، شار جرمی از 80 تا 200 kg/m^2s و کیفیت بخار ورودی 0.12 تا 0.72 استفاده شد. نتایج مربوط به الگوی جریان و افت فشار تحت شرایط آدیاباتیک به‌دست آمده است. لوله حرارتی در شرایط عملکرد یکسان، ارتقاء یافته با یک میله، در مقایسه با لوله صاف توخالی هم اندازه با افت فشار کمتر در شار جرمی کمتر، کارایی سه برابر بهتری از خود نشان می‌دهد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.25.7]

زورشر، تام و فاورات (1999) [12] نیز الگوی جریان را در لوله‌ای شفاف به قطر 14mm برای آمونیاک در سرعت جرمی 20 تا 140 kg/m^2s، کیفیت بخار از 1% تا 99% و شار حرارتی از 5000 تا 5800 W/m^2 به‌دست آوردند، در تمامی این آزمایشات فشار اشباع 0.497 MPa و دمای اشباع 4°C بود. در مجموع با در نظر گرفتن داده‌های آزمایشگاهی مختلف (با توجه به گستردگی محدوده سرعت جرمی و کاهش آن از 100 به 20 kg/m^2s، به این نتیجه رسیدند که مقدار G در رابطه (1) بسیار پایین است و در نتیجه به صورت تجربی با افزایش 20χ+ رابطه (1) را به‌صورت رابطه (2) تصحیح کردند.

$$G_{\text{Stratified}} = \{\frac{(226.3)^2 A_{fd} A_{gd}^2 \rho_g (\rho_f - \rho_g) \mu_f g}{x^2 (1-x) \pi^3}\}^{1/3} \quad (1)$$

$$G_{\text{Stratified}} = 20x + \{\frac{(226.3)^2 A_{fd} A_{gd}^2 \rho_g (\rho_f - \rho_g) \mu_f g}{x^2 (1-x) \pi^3}\}^{1/3} \quad (2)$$

همچنین به دلیل این‌که مرز تغییر جریان جدا شده موجی به جریان حلقوی در کیفیت‌های بخار بالا بسیار بالا بوده، رابطه (3) را نیز به صورت رابطه (4) تصحیح کردند.

$$G_{\text{Wavy}} = \{\frac{16 A_{gd}^3 g d_i \rho_f \rho_g}{x^2 \pi^2 \left(1-(2h_{fd}-1)^2\right)^{0.5}} [\frac{\pi^2}{25 h_{fd}^2} (1-x)^{-F(q)_1} \left(\frac{We}{Fr}\right)_f^{-F(q)_2} + 1]\}^{0.5} + 50 \quad (3)$$

$$G_{Wavy} = \{\frac{16 A_{gd}^3 g d_i \rho_f \rho_g}{x^2 \pi^2 \left(1-(2h_{fd}-1)^2\right)^{0.5}} [\frac{\pi^2}{25 h_{fd}^2} (1-x)^{-F(q)_1} \left(\frac{\text{We}}{\text{Fr}}\right)_f^{-F(q)_2} + 1]\}^{0.5} + 50 + 75 e^{\frac{-(x^2-0.97)^2}{x(1-x)}} \quad (4)$$

در این مقاله یک تحقیق تجربی برای مطالعه اثرات لوله‌های دارای دیمپل در الگوهای جریان R600-a و در یک لوله افقی انجام شده است. اثر لوله‌های دارای دیمپل در جریان جوشش و چگالش R600-a بررسی و با حالت لوله صاف مقایسه شده است. در ادامه با توجه به داده‌های تجربی به‌دست آمده، معادلات حاکم بر الگوی جریان، الگوهای جریان رسم شده و در مناطقی که عدم تطابق مشاهده شده، معادلات الگوی جریان اصلاح خواهد شد.

مقاله کنونی در خصوص تعیین الگوی جریان در لوله‌های صاف و لوله‌های ارتقا یافته و بررسی معادلات حاکم بر الگوی جریان این لوله، اصلاح و ارائه رابطه تجربی جهت تعیین الگوی جریان این لوله در شرایط آزمایشی جدید از اهمیت خاصی برخوردار است. شرایط جدید آزمایشی نیز که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرند تغییر سطح لوله با استفاده از ایجاد گودی و برآمدگی مارپیچ روی سطح لوله اواپراتور است. یک الگوی اصلاح شده از دیمپل‌ها با الگوی مارپیچ و با بهره‌گیری تواماً از مزایای دیمپل‌های کم عمق و عمیق در سطح لوله مورد مطالعه به کار گرفته شد. انتظار می‌رود این الگو منجر به چرخش فیلم مایع در نزدیکی دیواره شود که درنتیجه جدایش جریان را درپی خواهد داشت. هر دوی این پدیده‌ها سبب پیدایش جریان‌های ثانویه، افزایش توربولانسی، تخریب لایه مرزی، افزایش سطح مؤثر انتقال حرارت و افزایش نقاط هسته‌زنی خواهند شد. همه پدیده‌های یادشده به ارتقا مکانیزم‌های انتقال حرارت کمک خواهند کرد. هیچ گزارشی در مورد مطالعه الگوی جریان، بررسی و اصلاح روابط حاکم بر الگوی جریان و ارائه رابطه اصلاح شده در پدیده جوشش و چگالش در این لوله پیشنهادی در مقالات دیده نشده که در مطالعه پیش‌رو سعی بر این است که این پدیده با استفاده از مبرد R600-a به آزمایش گزارده شود.

نوآوری‌های این طرح را می‌توان در پنج بخش اصلی عنوان کرد.

1- بررسی جوشش و چگالش اجباری مبرد HC-R600-a. از آن‌جا که این مبرد جز مبردهای طبیعی (هیدروکربن) و جایگزین مبردهای HFC است و اطلاعات چندانی در خصوص عملکرد حرارتی مبردهای طبیعی (مبردهای هیدروکربنی، دی‌اکسیدکربن و آمونیاک) در دسترس نیست.

2- ارائه نقشه الگوهای جریان و بیان مرز بین رژیم‌های متفاوت در جوشش و چگالش جابه‌جایی اجباری R600-a داخل لوله دیمپل که تاکنون اطلاعاتی در این خصوص در دسترس نبوده است.

3- اصلاح روابط تجربی الگوی جریان دوفازی در لوله حرارتی صاف برای مبرد R600-a برای نخستین بار.

4- اصلاح روابط تجربی الگوی جریان دوفازی در لوله حرارتی دیمپل و ارائه رابطه تجربی و تأثیر پارامترهای هندسی این لوله پیشنهادی برای مبرد R600-a برای نخستین بار.

5- مشخص کردن ناحیه گذار از تناوبی به حلقوی در نقشه الگوی جریان لوله دیمپل.

بررسی الگوی جریان لوله دیمپل و لوله صاف به تشخیص بیشتر تأثیر لوله دیمپل بر جریان بسیار کمک می‌کند، بیشتر روابط داده شده برای تخمین ضریب انتقال حرارت و افت فشار و در نهایت طراحی بهینه اواپراتورها بر پایه و مبنای الگوی جریان مبرد در شرایط مختلف است.

تغییرات الگوی جریان در بخش شفاف انتهای لوله آزمایش جهت بررسی الگوهای جریان جوششی با ثابت نگاه داشتن سرعت جرمی مبرد و تغییر کیفیت بخار مورد مشاهده قرار گرفت و نقشه‌های الگوی جریان تهیه شد. برای ترسیم نقشه‌های الگوی جریان و به‌دست آوردن مرز بین الگوهای مختلف جریان به نقاط گذار بین الگوهای مختلف جریان در یک سرعت جرمی ثابت نیاز است. این نقاط گذار با تغییر کیفیت بخار در خروجی لوله آزمایش در یک سرعت جرمی به‌دست می‌آیند. شکل جریان در این نقاط گذار ترکیبی از دو الگوی بالا دستی و پایین دستی است و به صورت غیرپایدار از الگوی جریان پایین دستی به بالا دستی تغییر می‌کند. مسأله مهم این است که در کیفیت‌های بخار پیش یا پس از این نقاط گذار الگوهای جریان کاملاً قابل تشخیص و تمیز دادن است.

از آخرین ورژن نقشه الگوی جریانی ارائه شده توسط کتان، تام و همکاران [13] برای لوله صاف استفاده شد. محور طولی کیفیت بخار و محور عرضی شار جرمی در این نوع از نقشه الگوی جریان در نظر گرفته می‌شود. مشاهده می‌شود که گذار از ناحیه جداشده موجی به منقطع در مقادیر بالاتری نسبت به آن‌چه که کتان، تام و همکاران پیش‌بینی کرده بودند اتفاق می‌افتد. داده‌های تجربی تطابق مناسبی در ناحیه گذار از منقطع به الگوی جریان حلقوی با نقشه الگوی جریان تام و همکاران دارند.

استفاده از «لوله دیمپل» برای سادگی در بیان است. در واقع لوله دیمپل همان Helically Dimpled Tube بوده که به معنای تحت‌اللفظی لوله به‌صورت مارپیچ دیمپل‌دار شده است.

2- شرح مسأله

جریان دوفازی (چگالشی و جوششی) داخل لوله‌ها در بسیاری از کاربردهای مهندسی مانند سیستم‌های تبرید و تهویه مطبوع، نیروگاه‌های بخار، کارخانجات صنایع شیمیایی و کاربردهای هوافضایی مطرح است. برای طراحی بهینه اواپراتورها، داشتن اطلاعات کافی از چگونگی تغییرات ضریب انتقال حرارت و افت فشار در شرایط متفاوت ضروری است. مسأله دیگری که در

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.25.7]

جریان دوفازی حائز اهمیت بسیاری است، اطلاع از چگونگی الگوی جریان دوفازی است. در واقع ضریب انتقال حرارت و میزان افت فشار به‌شدت به ساختار جریان سیال دوفاز بستگی دارد. از این‌رو پیش‌بینی رژیم جریان جنبه مهمی از مدل‌سازی جریان دوفازی را به خود اختصاص می‌دهد. در حقیقت مدل‌های انتقال حرارتی جدید برای پیش‌بینی جریان دوفازی در جریان داخلی براساس رژیم موضعی جریان بوده و در نتیجه به اجبار نیاز به نقشه‌های الگوی جریان مناسب برای پیش‌بینی خصوصیات در شرایط محلی جریان است. از طرف دیگر لوله‌هایی که در اواپراتورها مورد استفاده قرار می‌گیرند، یا به‌صورت لوله صاف است که با توجه به هزینه پایین و سهل‌الوصول بودن آن‌ها در شرایط کنونی بیشترین کاربرد را در صنایع دارد و یا از روش‌های افزایش انتقال حرارت مانند لوله‌های تغییر شکل یافته و استفاده از تجهیزات درون لوله‌ای و... بهره می‌برند که هرکدام در یک حالت بهینه موجب افزایش میزان انتقال حرارت می‌شود.

2-1- تجهیزات آزمایشگاهی و روش انجام کار

برای جریان دادن سیال در قسمت تحت آزمایش از یک سیستم شبیه‌ساز تبرید با یک پمپ دنده‌ای[1] دور متغییر جهت گردش سیال در سیکل استفاده شده است دور پمپ توسط یک اینورتور[2] تنظیم می‌شود. مسیر برگشت[3] جهت کنترل بیشتر بر دبی در نظر گرفته شده است. یک دبی‌سنج[4] از نوع جرمی (با اثر شتاب کریولیس)[5] جهت اندازه‌گیری شار جرمی سیال بلافاصله پس از پمپ نصب شده است. پیش از ورود سیال به تبخیرکننده اصلی دو گرمکن با روش گرمایش المنت‌های حرارتی تعبیه شده است که یکی از گرمکن‌ها جهت افزایش آنتالپی تا آنتالپی مایع اشباع و گرمکن دیگر جهت دستیابی به کیفیت بخار دلخواه در ورود تبخیرکننده آزمایش مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار توان داده شده به المنت‌های حرارتی توسط وات مترها اندازه‌گیری می‌شود. گرمکن‌ها به نحو مناسبی توسط عایق‌های حرارتی از (پشم شیشه) جهت جلوگیری از اتلاف حرارتی عایق شده‌اند. تبخیرکننده آزمایش یک لوله مسی صاف افقی با قطر داخلی 8.7mm و ضخامت 0.4mm است که مشابه گرمکن‌ها به روش گرمایش الکتریکی گرم می‌شود. پس از تبخیرکننده اصلی سیال جهت چگالش و گردش دوباره در سیکل وارد چگالنده می‌شود. سیال پیش از ورود به پمپ در چگالنده ثانویه کاملاً چگالیده شده و فشار و دمای آن در ورود به پمپ کنترل می‌شود.

از دو نوع لوله به عنوان لوله تست برای انجام آزمایش استفاده شد یک لوله صاف و یک لوله پیشنهادی که تصویر و نقشه طراحی آن به ترتیب در شکل‌های 1 و 2 دیده می‌شود. لوله مارپیچی دیمپل‌دار شده همان‌طور که در شکل 2 دیده می‌شود با قرار گرفتن یک سری گودی/ برآمدگی بر دیواره و با الگوی نشان داده شده در مسیرهای مارپیچ، شکل پیشنهادی لوله پس از مطالعات است.

2-2- دستگاه آزمایش

دیاگرام شماتیک مدار جریان مبرد در شکل 3 نشان داده شده است. مبرد پمپ شده توسط پمپ دنده‌ای پس از عبور از دبی‌سنج وارد گرمکن و با توجه به توان مصرفی در کیفیت‌های مختلف از اواپراتور آخر خارج می‌شود. گرمکن و اواپرتور در واقع لوله‌هایی است که گرمای لازم توسط المنت‌های حرارتی

[1] Gear pump
[2] Invertor
[3] By pass
[4] Flow meter
[5] Coriolis-effect mass flow meter

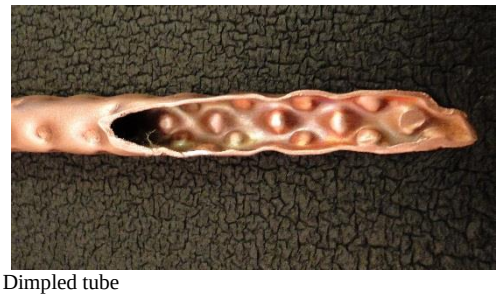

Fig. 1 Dimpled tube

شکل 1 تصویر لوله دیمپل

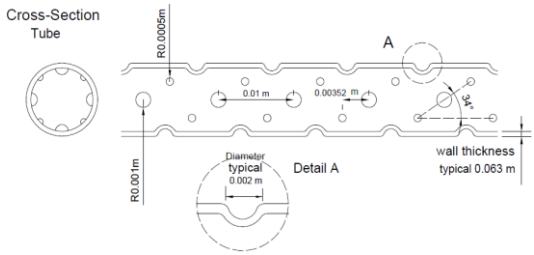

Fig. 2 Map of dimpled tube in AutCAD

شکل 2 نقشه لوله دیمپل در نرم‌افزار اتوکد

پیچیده شده به دور آن‌ها تامین می‌شود. کیفیت بخار خروجی از گرمکن و اواپراتور که همان کیفیت ورود به اواپراتور تست است به میزان توان داده شده و بازده عایق‌کاری بستگی دارد. مخلوط دوفاز پس از عبور از چگالنده و سرد شدن و چگالش کامل در چگالنده ثانویه وارد پمپ می‌شود. پیش از پمپ یک شیر یک‌طرفه نصب شده است تا از حرکت جریان در جهت عکس جلوگیری شود، همچنین از آن‌جا که پمپ دنده‌ای از نوع جابه‌جایی مثبت بوده و فشار به‌طور پیوسته بالا می‌رود، یک شیر اطمینان با فشار عملکرد 9bar پس از پمپ تعبیه شده است تا شاید در مواقعی که مشکل پیش‌بینی نشده‌ای در سیکل به وجود آمد، مبرد از این شیر تخلیه شده و فشار کاهش یابد تا مانع از آسیب‌دیدگی تجهیزات نظیر پمپ و دبی‌سنج شود. برای اندازه‌گیری افت فشار در طول تست اواپراتور از یک دستگاه اندازه‌گیری افت فشار استفاده می‌کنیم. برای جلوگیری از صدمه دیدن دیافراگم دستگاه افت فشار آن را به یک منیفولد[6] دارای سه شیر تجهیز می‌کنیم. شیوه کار با منیفولد به این صورت است که ابتدا شیر وسط و پس از آن شیر ورودی را باز می‌کنیم تا فشار به دو طرف دیافراگم هم‌زمان وارد شود. سپس شیر خروجی را باز می‌کنیم و در آخر شیر وسط را می‌بندیم تا دستگاه افت فشار واقعی را نشان دهد.

در این آزمایشات با توجه به این‌که درجه حرارت مبرد در حال چگالش نسبتا بالاست از آب لوله‌کشی شهر جهت خنک‌کاری در چگالنده استفاده می‌شود. در زمان انجام تست‌های مورد نظر درجه حرارت آب خنک‌کن (در فصل تابستان) تقریباً بین 15-22 درجه سلسیوس بوده است.

2-3- عملکرد دستگاه آزمایش

ابتدا جریان آب خنک‌کن لوله‌کشی شهر توسط شیلنگ‌هایی به داخل پوسته چگالنده‌های سیستم تزریق می‌شود. سپس سیستم با روشن کردن پمپ به‌کار می‌افتد. کلید مربوط به المنت‌های هیترها و اواپراتور را پس از تنظیم دبی مورد نظر به کمک دور پمپ و بای‌پس روشن کرده و تنظیمات لازم انجام می‌شود تا سیستم تحت شرایط مورد نظر قرار گیرد. شرایط مورد نظر

[6] Manifold

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.25.7]

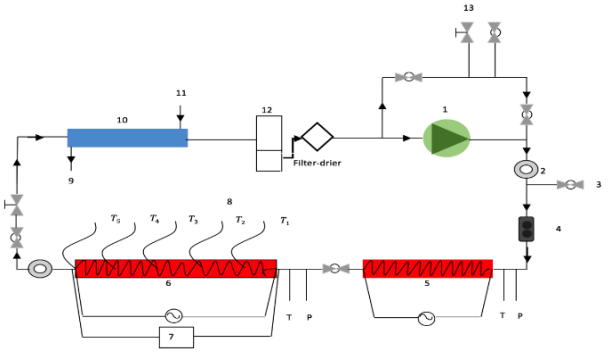

Fig.3 Schematic refrigeration cycle used

شکل 3 شماتیک سیکل تبرید مورد استفاده

عبارت از شار جرمی مبرد، فشار جوشش، کیفیت بخار ورودی به اواپراتور است. این تنظیمات به ترتیب به وسیله تغییر دور پمپ دنده‌ای، تنظیم دبی آب خنک‌کن چگالنده اولیه و چگالنده ثانویه و تغییر توان الکتریکی ورودی به المنت‌های هیترها و اواپراتور تست صورت می‌گیرد. سیستم پس از تنظیمات لازم مدتی باید کار کند تا به حالت پایا برسد. حالت پایا زمانی برقرار است که تغییرات قابل توجهی در مقادیر دبی مبرد، فشار و درجه حرارت‌های دیواره لوله به مدت 30 دقیقه صورت نگیرد. پس از رسیدن سیستم به حالت پایا مشاهدات ثبت می‌شود.

2-4- گردآوری داده‌ها

داده‌های زیر هنگام آزمایش و پس از رسیدن سیستم به حالت پایا ثبت می‌شود:

1- دبی جرمی مبرد (دبی‌سنج استفاده شده در این آزمایش چگالی و دما را نیز نشان می‌دهد).

2- درجه حرارت‌های دیواره خارجی لوله در ورودی و خروجی از هیترها.

3- درجه حرارت‌های دیواره خارجی لوله اواپراتور اصلی در 20 نقطه.

4- فشارهای استاتیک مبرد در ورودی و خروجی از هیتر و اواپراتور.

5- میزان گرمای داده شده به هیتر و اواپراتور.

6- فشار استاتیک مبرد در ورودی به اواپراتور (که توسط فشارسنج دیجیتالی قرائت می شود).

7- افت فشار نشان داده شده در اواپراتور اصلی توسط دستگاه DP.

8- تصاویر لوله شفاف هنگام بررسی الگوهای جریان.

در مجموع 315 آزمایش مختلف با چهار سرعت جرمی مختلف برای دو لوله و در هر سرعت جرمی در رنج کیفیت بخار از 0.05-0.8 صورت گرفت.

یک آزمایش دو (و در برخی مواقع سه) بار تحت شرایط عملکرد کاملاً مشابه برای اثبات صحت اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی قرار گرفت. مقادیر به‌دست آمده برای آزمایشات جدید تقریباً همان مقادیر ثبت شده پیشین بودند.

محدوده پارامترهای مختلف کاری در جدول 1 آمده است.

3- روش حل و فرضیه‌ها

روش اجرای این طرح به صورت تجربی است. به این ترتیب که برای انجام آزمایشات یک سیستم چگالشی و جوششی درون لوله‌ای طراحی، ساخته و نصب می‌شود. در واقع این دستگاه یک سیکل بسته مجهز به کلیه وسایل اندازه‌گیری مورد نیاز است. اجزای اصلی این سیکل شامل یک اواپراتور مورد

جدول 1 محدوده پارامترهای مختلف در این مقاله

Table 1 Range of different parameters on this paper

پارامترها	محدوده
سیال مبرد	R600-a
سرعت جرمی مبرد	155-470 kg/m^{2}s
محدوده فشار کاری	6-8 bar
کیفیت بخار متوسط در اواپراتور	0.05-0.78
محدوده شار حرارتی	15.8 kW/m^2

آزمایش است. یک کنداسور جهت چگالش مبرد باید طراحی و ساخته شود که در شرایط مختلف آزمایش قادر به چگالش سیال باشد، این سیستم یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای هم محور از نوع جریان مخالف است که آب خنک‌کن در پوسته خارجی آن جریان داشته و مبرد در لوله داخلی آن چگالیده می‌شود. یک پمپ جهت نأمین فشار لازم سیکل باید پس از اواپراتور مورد آزمایش قرار گیرد. گرمای لازم اواپراتور باید به گونه‌ای مناسب جهت دستیابی به کیفیت‌های مختلف بخار نأمین شود. در انتهای تست اواپراتور نیز از یک بخش شفاف جهت بررسی الگوی جریان استفاده می‌شود. این تکنیک نخستین بار توسط جسیم و همکاران [14] ارائه شده است. استفاده از این تکنیک کمک فراوانی به تشخیص سطح مشترک فاز مایع و بخار و تعیین الگوی صحیح جریان می‌کند. در این دستگاه مقتضی است تمام تمهیدات لازم جهت اندازه‌گیری و کنترل پارامترهای مختلف آزمایش طراحی و ساخته شود.

پس از انجام آزمایشات اولیه و کالیبره کردن وسایل اندازه‌گیری به گردآوری داده‌های تجربی شامل افت فشار در طول اواپراتور، فشار اواپراتور آزمایش، میزان گرمای داده شده به اواپراتور، تصاویر ضبط شده از بخش شفاف جهت تعیین الگوی جریان، دمای سطح بیرونی لوله تست و سایر پارامترهای لازم پرداخته خواهد شد. با استفاده از این داده‌ها و پس از بررسی خواص مبرد و براساس داده‌های تجربی که از این آزمایشات به‌دست‌آمده است و برازش نتایج تجربی، رابطه تجربی بیان می‌شود که بتواند نقشه الگوی جریان را برای این مبرد با دقت مناسب نشان دهد.

4- بررسی و تحلیل نتایج

کتان و همکاران برای مبردها در فاز جوشش معادلات تجربی را پیشنهاد می‌دهد که نواحی مختلف الگوی جریان را در لوله‌های صاف مشخص می‌کند [13]. در شکل 4 نمونه‌ای از این نقشه الگوی جریان R-134 رسم شده است.

با استفاده از معادلاتی که در مقاله کتان و همکاران [13] یاد شده و داده‌هایی که برای مبرد R600-a داریم و کمک گرفتن از نرم‌افزار متلب، نقشه الگوی جریان مطابق با شکل 5 رسم می‌شود.

در ادامه داده‌هایی را که از آزمایشات به‌دست آورده‌ایم برای لوله‌های صاف و مبرد R600-a در فاز جوشش بر نقشه الگوی جریانی که در شکل 5 به‌دست آوردیم قرار می‌دهیم تا به اعتبارسنجی معادلات کتان و همکاران برای مبرد R600-a بپردازیم.

با توجه به شکل 6 مشاهده می‌شود که داده‌ها در منطقه جداشده موج‌دار با الگوی جریانی که کتان و همکاران معرفی کرده و همخوانی ندارند؛ بنابراین معادلات الگوی جریان کتان و همکاران برای مبرد جدید باید اصلاح شود.

برای مرز G_{wavy} معادله‌ای که کتان و همکاران پیشنهاد می‌دهد به صورت رابطه (5) است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.25.7]

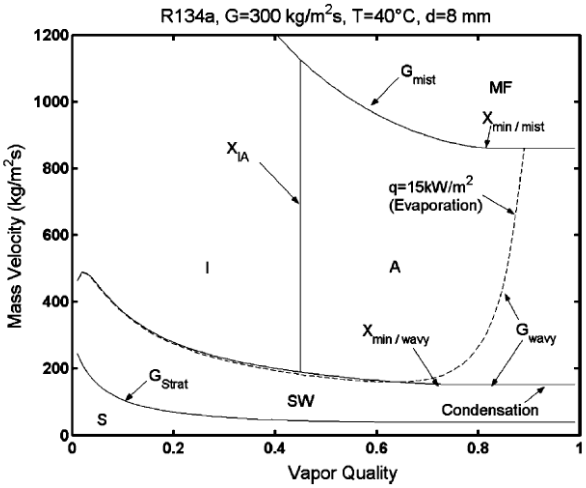

Fig. **4** Kattan et al. flow pattern for R-134 [13]

شکل 4 الگوی جریان کتان و همکاران برای مبرد R-134 [13]

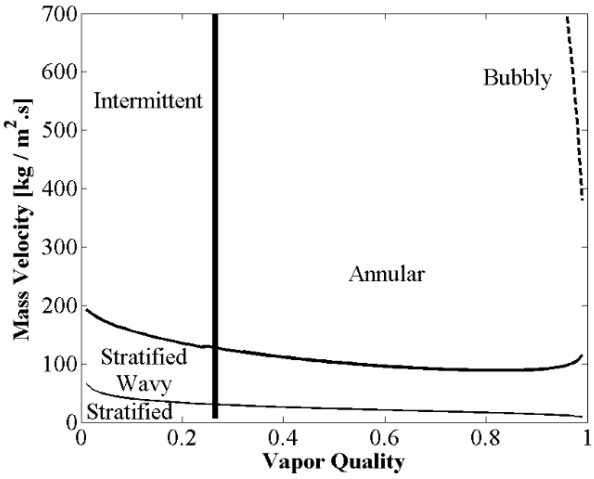

Fig. **5** Flow pattern R600-a, based on Kattan et al. [13]

شکل 5 الگوی جریان R600-a براساس روابط کتان و همکاران [13]

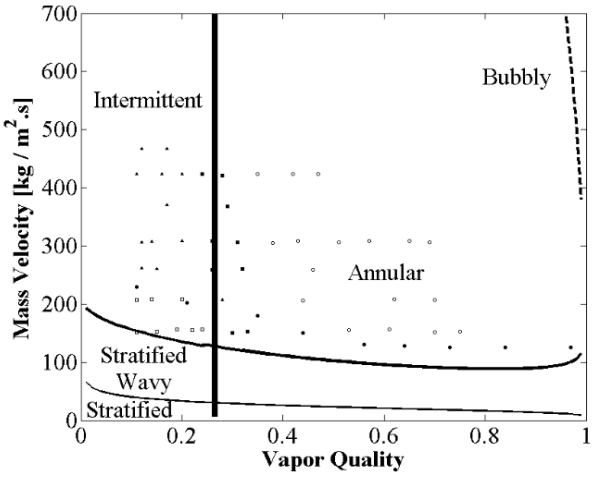

Fig. **6** Experimental data flow pattern R600-a, based on Kattan et al. [13]

شکل 6 داده‌های تجربی بر الگوی جریان R600-a براساس روابط کتان و همکاران [13]

$$G_{\text{wavy}} = \left\{\frac{16{A_{vd}}^3 gD\rho_L\rho_v}{x^2\pi^2(1-(2h_{Ld}-1)^2)^{0.5}}\left[\frac{\pi^2}{25h_{Ld}^2}(1-x)^{F_1(q)}\left(\frac{\text{We}}{\text{Fr}}\right)_L^{F_2(q)}+\frac{1}{\cos\varphi}\right]\right\}^{0.5}+50 \quad (5)$$

رابطه (6) را با توجه به رابطه (5) به پیشنهاد کتان و همکاران با ضرایب نامشخص پیشنهاد می‌دهیم.

$$G_{\text{wavy}} = a\left\{\frac{16{A_{vd}}^3 gD\rho_L\rho_v}{x^2\pi^2(1-(2h_{Ld}-1)^2)^{0.5}}\left[\frac{\pi^2}{25h_{Ld}^2}(1-x)^{F_1(q)}\left(\frac{\text{We}}{\text{Fr}}\right)_L^{c}+\frac{1}{\cos\varphi}\right]\right\}^{0.5}+b \quad (6)$$

رابطه (6) همان کلیت رابطه کتان و همکاران را دارد و تنها باید ضرایب آن براساس برازش به دست آمده بر داده‌های تجربی حاصل از آزمایشات به‌دست آید. معادله اصلاحی با محاسبات ریاضی در نرم‌افزار متلب به صورت رابطه (7) قابل بیان است.

$$G_{\text{wavy}} = 0.8441\left\{\frac{16{A_{vd}}^3 gD\rho_L\rho_v}{x^2\pi^2(1-(2h_{Ld}-1)^2)^{0.5}}\left[\frac{\pi^2}{25h_{Ld}^2}(1-x)^{F_1(q)}\left(\frac{\text{We}}{\text{Fr}}\right)_L^{1.286}+\frac{1}{\cos\varphi}\right]\right\}^{0.5}+84.38 \quad (7)$$

در رابطه (7) مقادیر ضرایب حاصل از برازش داده‌های تجربی محاسبه شده است. با توجه به شکل 7 مشاهده می‌شود که دقت معادله اصلاح شده رابطه (7) در حالت جریان جدا شده موج‌دار تقریباً 97% است و نشان می‌دهد رابطه (7) از دقت بسیار مناسبی جهت پوشش‌دهی داده‌های تجربی برخوردار است. با رسم رابطه (7) و قرار دادن آن بر داده‌های تجربی و الگوی جریان مشاهده می‌شود که رابطه (7) به خوبی مرزها را از هم جدا می‌کند.

قسمت کیفیت بخار بالای این منحنی به نسبت عدد فرود به عدد وبر وابسته، و عدد فرود نسبت نیروی اینرسی به کشش سطحی و عدد وبر نسبت نیروی اینرسی به گرانش است.

در ادامه معادله جدیدی برای لوله دیمپل در فاز جوشش پیشنهاد می‌دهیم که بتواند نقشه الگوی جریان را به‌خوبی پوشش بدهد. نقشه الگوی جریان لوله دیمپل در فاز جوشش به صورت شکل 8 است.

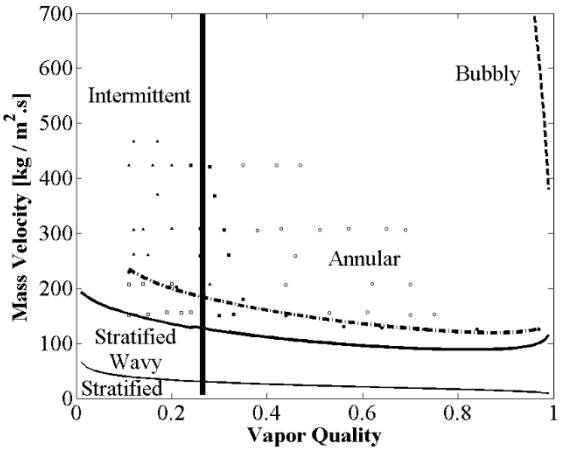

Fig. **7** Boiling flow pattern based on the modified flat tube fitted to experimental results

شکل 7 الگوی جریان جوششی اصلاح شده لوله صاف براساس برازش نتایج تجربی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.25.7]

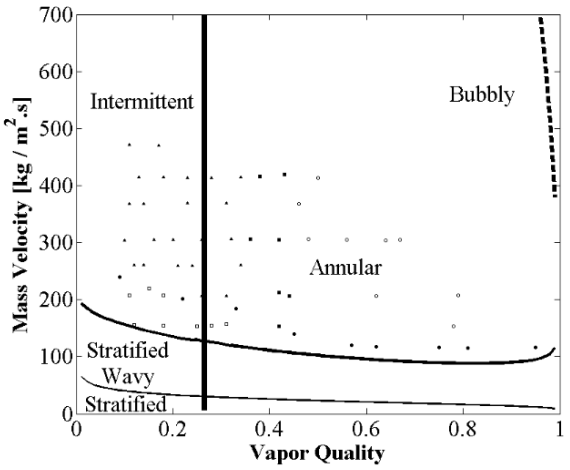

Fig. 8 Experimental data flow pattern dimple tube boiling R600-a, based on Kattan et al. [13]

شکل 8 داده‌های تجربی بر الگوی جریان جوششی لوله دیمپل R600-a براساس روابط کاتان و همکاران [13]

معادله پیشنهادی به صورت رابطه (8) است.

$$G_{\text{wavy}} = a\left\{\frac{16A_{vd}{}^{3}gD\rho_L\rho_v}{x^2\pi^2(1-(2h_{Ld}-1)^2)^{0.5}}\left[\frac{\pi^2}{25h_{Ld}^2}(1-x)^{F_1(q)}\left(\frac{\text{We}}{\text{Fr}}\right)_L^{c}+\frac{1}{\cos\varphi}\right]\right\}+b+d\left(\frac{\varepsilon}{D}\right)^{e} \quad (8)$$

با استفاده از معادلات حاکم بر الگوی جریان که در قسمت پیشین یاد شد و تعیین ضرایب جدید، مقادیر زیر قابل بیان است. در رابطه (8) نیز یک ترم $d(\varepsilon/D)^e$ اضافه شده که بتواند اثرات دیمپل‌ها را برای رابطه تجربی پیشنهادی با دقت مناسب لحاظ کند. این عدد بدون بعد معمولاً در بحث سیالات و انتقال حرارت لوله‌های زبر جزء پارامترهای اساسی است و در کل زبری سطح سبب تولید اختلالات رشد شده بزرگ و بیشتری در جریان می‌شود. ایجاد یک زبری عموماً سبب به جلو افتادن نقطه گذرش می‌شود و این به دلیل تولید نوسانات اضافی در لایه مرزی است. به طور مشخص زبری سبب ایجاد نوسانات و البته تغییر شکل در پروفیل سرعت می‌شود. زبری همچنین سبب افزایش ضریب شکل، کاهش عدد رینولدز بحرانی و افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود.

برای این‌که معادلات لوله صاف و دمیپل شبیه به یکدیگر باشد به‌جای ضرایب a، b و c مقادیر پیشین محاسبه شده را قرار داده و دو ضریب جدید d و e را با استفاده از داده‌های تجربی، برازش آن‌ها و کمک گرفتن از نرم‌افزار متلب تعیین می‌کنیم که عدد بدون بعد ε/D در معادلات وارد می‌کند.

پس معادله جدید به صورت رابطه (9) به‌دست خواهد آمد.

$$G_{\text{wavy}} = 0.8441\left\{\frac{16A_{vd}{}^{3}gD\rho_L\rho_v}{x^2\pi^2(1-(2h_{Ld}-1)^2)^{0.5}}\left[\frac{\pi^2}{25h_{Ld}^2}(1-x)^{F_1(q)}\left(\frac{\text{We}}{\text{Fr}}\right)_L^{1.286}+\frac{1}{\cos\varphi}\right]\right\}^{0.5}+84.38-1.471\left(\frac{\varepsilon}{D}\right)^{10.4} \quad (9)$$

مقادیر ضرایب در معادله (9) محاسبه شده و می‌توان مشاهده کرد که رابطه اصلاح شده (7) با ضرایب جدید و همچنین وارد کردن پارامتر زبری سطح، دارای دقت تقریباً 94% است و نشان می‌دهد که رابطه (9) از دقت بسیار مناسبی جهت پوشش دادن داده‌های تجربی برخوردار است.

رابطه (9) می‌تواند برای هر دو لوله، دیمپل و صاف استفاده شود. برای استفاده از معادله پیشنهادی (9) برای لوله صاف تنها باید ارتفاع زبری را مقدار صفر قرار دهیم تا رابطه پیشین به‌دست آید.

مشاهده می‌شود نتایج در ناحیه منقطع روی نقشه الگوی جریان قرار نمی‌گیرد. در قسمت منقطع نیز نیاز به اصلاح معادله است تا نمودارها روی داده‌های تجربی قرار گیرد.؛بنابراین مانند حالات پیشین سعی در اصلاح معادله داریم. توجه داریم که در این حالتی پارامتر زبری سطح در لوله‌ها وجود دارد که پارامتر مهمی است و می‌توان از عدد بدون بعد ε/D در معادلات استفاده و به اصلاح آن پرداخت. بنابراین سعی می‌شود در معادله پیشنهادی در این حالت این پارامتر جای داده شود. معادله پیشنهادی به صورت معادله (10) خواهد بود.

$$x = \left(\frac{D-\varepsilon}{D}\right)^{a}\left\{\left[0.34^{1/0.875}\left(\frac{\rho_v}{\rho_L}\right)^{-1/1.75}\left(\frac{\mu_L}{\mu_v}\right)^{-1/7}\right]+1\right\}^{-1} \quad (10)$$

رابطه (10) براساس معادله‌ای که کتان و همکاران پیشنهاد داده است [13].

معادله اصلاح شده و ضریب جدید a برابر با 3.35- به‌دست می‌آید. با توجه به شکل 9 مشاهده می‌شود نقشه الگوی جریان اصلاح شده با دقت بسیار مناسبی نتایج تجربی را پوشش می‌دهد.

این آزمایش را برای فاز چگالش نیز انجام داده‌ایم. مانند حالت جوشش در حالت لوله صاف و دیمپل اطلاعات را ثبت نموده‌ایم. مانند روندی که برای فاز جوشش توصیف شد، به همین طریق معادلاتی را براساس معادلات کتان و همکاران [13] در فاز چگالش پیشنهاد می‌دهیم که نواحی مختلف الگوی جریان را در لوله‌های صاف و دیمپل مشخص می‌کند [13]. در شکل 10 نمونه‌ای از این نقشه الگوی جریان برای مبرد R-134 رسم شده است.

اکنون با به‌دست آمدن نقشه الگوی جریان جریان برای لوله صاف در فاز جوشش با استفاده از نرم‌افزار متلب مطابق با شکل 11، نتایج تجربی را روی نقشه الگوی جریان ثبت می‌کنیم، با توجه به شکل 12 مشاهده می‌شود در ناحیه جدا شده موج‌دار اختلاف وجود دارد.

نقشه الگوی جریان برای مبرد R600-a براساس معادلات کتان و همکاران [13] به صورت شکل 13 حاصل می‌شود.

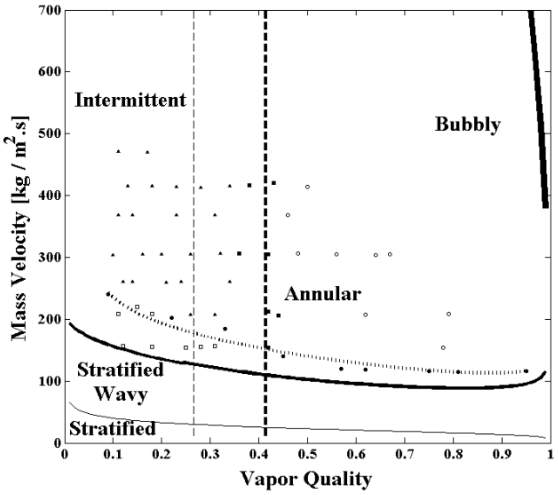

Fig. 9 New map the flow pattern dimpled tube based on improved relations

شکل 9 نقشه الگوی جریان جدید لوله دیمپل براساس روابط اصلاح شده

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.25.7]

بنابراین معادله جدید با ضرایب مشخص به صورت رابطه (11) پیشنهاد می‌شود.

$$G_{\text{wavy}} = a\left\{\frac{16{A_{vd}}^3 gD\rho_L\rho_v}{x^2\pi^2(1-(2h_{Ld}-1)^2)^{0.5}}\left[\frac{\pi^2}{25h_{Ld}^2}(1-x)^{F_1(q)}\left(\frac{\text{We}}{\text{Fr}}\right)_L^{-f}+1\right]\right\}+b-de^{-(x^2-0.97)^2/x(1-x)} \quad (11)$$

با برازش نتایج تجربی مقدار ضرایب a، b، d و f به‌دست می‌آیند با توجه به شکل 13 دقت رابطه اصلاح شده (11) در این حالت تقریباً 97% و نشان می‌دهد رابطه (11) از دقت بسیار مناسبی جهت پوشش دادن داده‌های تجربی برخوردار است.

با قراردادن نتایج تجربی لوله دیمپل بر نقشه الگوی جریان با توجه به شکل 14 مشاهده می‌شود که الگوی جریان در حالت جریان جدا شده موج‌دار نیاز به اصلاح دارد.

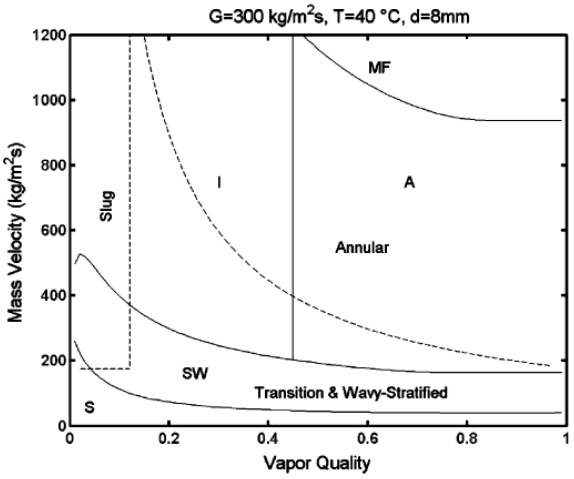

Fig. 10 flow pattern map for condensation horizontal tube by Kattan et al. [13]

شکل 10 نقشه الگوی جریان کاتان و همکاران برای چگالش لوله صاف [13]

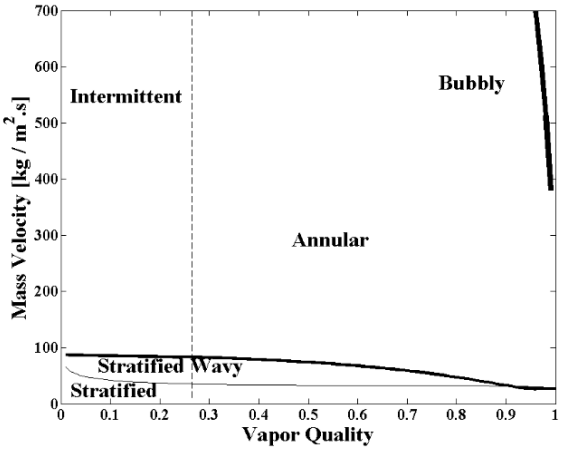

Fig. 11 Map the flow pattern horizontal tube based on Kattan et al. [13] relations for phase condensation

شکل 11 نقشه الگوی جریان لوله صاف براساس روابط کاتان و همکاران [13] برای فاز چگالش

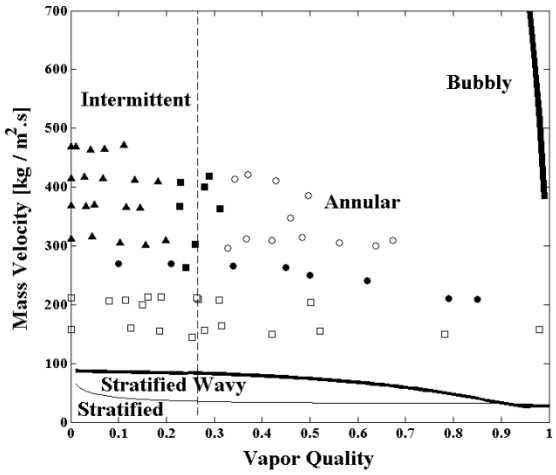

Fig. 12 Experimental data flow pattern horizontal tube condensation R600-a, based on Kattan et al. [13]

شکل 12 داده‌های تجربی بر الگوی جریان جوششی لوله صاف R600-a براساس روابط کاتان و همکاران [13]

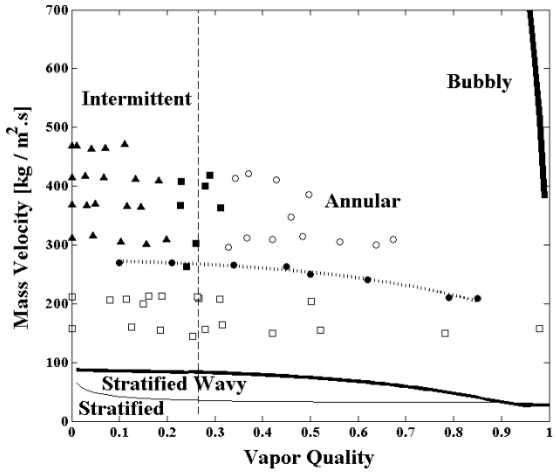

Fig. 13 Map the Horizontal tube condensation flow pattern after the correction

شکل 13 نقشه الگوی جریان چگالشی لوله صاف پس از اصلاح

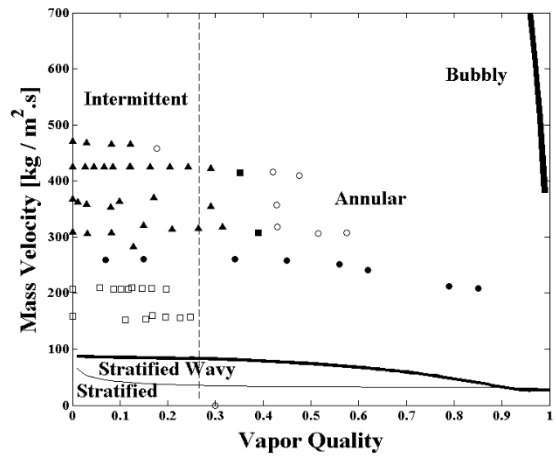

Fig. 14 Experimental data flow pattern dimpled tube condensation R600-a, based on Kattan et al. [13]

شکل 14 داده‌های تجربی بر الگوی جریان جوششی لوله دیمپل R600-a براساس روابط کاتان و همکاران [13]

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.25.7]

برای لوله دیمپل هم معادلات (14,12) پیشنهاد می‌شود. در این روابط ترم $c(\varepsilon/D)^e$ وارد شده تا اثرات دیمپل هم در معادلات در نظر گرفته شود.

ضرایب به صورت زیر است و رابطه جدید با ضرایب جدید به صورت زیر پیشنهاد می‌شود که برجستگی‌های لوله دیمپل نیز در آن وجود داشته باشد. اکنون با استفاده از نرم‌افزار متلب و نتایج تجربی در آزمایش ضرایب رابطه (12) را مشخص می‌کنیم.

$$G_{\text{wavy}} = a\left\{\frac{16{A_{vd}}^3 gD\rho_L\rho_v}{x^2\pi^2(1-(2h_{Ld}-1)^2)^{0.5}}\left[\frac{\pi^2}{25h_{Ld}^2}(1-x)^{F_1(q)}\left(\frac{\text{We}}{\text{Fr}}\right)_L^{-f}+1\right]\right\}+b - de^{-(x^2-0.97)^2/x(1-x)}+c\left(\frac{\varepsilon}{D}\right)^e \quad (12)$$

برای شباهت معادلات لوله صاف و دیمپل اگر ضرایبی که در لوله صاف به‌دست آوردیم به جای ضرایب a، b، d و f قرار داده و تنها دو ضریب c و e را با برازش بر داده‌های تجربی به دست خواهد آمد.

مزیت رابطه (12) این است که برای هر دو نوع لوله صاف و دیمپل یک معادله داریم. تنها با صفر قرار دادن ε به معادله چگالش لوله صاف می‌رسیم.

رابطه کلی لوله‌های دیمپل با تعیین شدن ضرایب حاصل از برازش نتایج تجربی و کمک گرفتن از نرم‌افزار متلب به صورت رابطه (13) قابل بیان است.

$$G_{\text{wavy}} = 1.931\left\{\frac{16{A_{vd}}^3 gD\rho_L\rho_v}{x^2\pi^2(1-(2h_{Ld}-1)^2)^{0.5}}\left[\frac{\pi^2}{25h_{Ld}^2}(1-x)^{F_1(q)}\left(\frac{\text{We}}{\text{Fr}}\right)_L^{-7.692}+1\right]\right\}+204 - 95.72e^{-(x^2-0.97)^2/x(1-x)} - 4.414\left(\frac{\varepsilon}{D}\right)^{0.2094} \quad (13)$$

همچنین با قرار دادن داده‌ها متوجه شده‌ایم که داده‌های آزمایش در قسمت تناوبی نیز با الگوی جریان تطابق ندارد؛ بنابراین برای این قسمت نیز رابطه (14) پیشنهاد شده است.

$$x = \left(\frac{D-\varepsilon}{D}\right)^a\left\{\left[0.34^{1/0.875}\left(\frac{\rho_v}{\rho_L}\right)^{-1/1.75}\left(\frac{\mu_L}{\mu_v}\right)^{-1/7}\right]+1\right\}^{-1} \quad (14)$$

مقدار a برابر با 2.7 به‌دست می‌آید.

از شکل 15 می‌توان مشاهده کرد که نقشه الگوی جریان جدید به خوبی نواحی مختلف را از یکدیگر جدا کرده است.

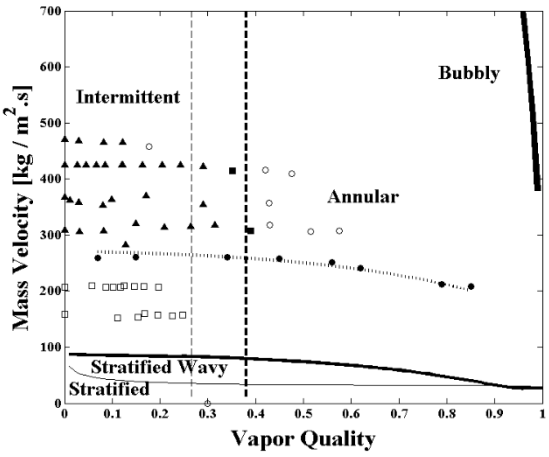

Fig. 15 Map the flow pattern dimpled tube based on the new relations of data fit on experimental data

شکل 15 نقشه الگوی جریان جدید براساس روابط جدید حاصل از برازش بر داده‌های آزمایشگاهی

همچنین با در اختیار داشتن داده‌های تجربی آزمایشگاهی می‌توان با تعریف معادلات تجربی که بتواند پارامترهای اساسی مسأله را در معادلات وارد کند، معادلات مناسبی جهت تخمین رفتار پدیده‌های فیزیکی از جمله مبردها در سیکل‌های گرمایش و سرمایش ایجاد کرد. در این مقاله به معرفی روند آزمایش و راهکاری جهت یافتن معادلاتی برای مبرد R600-a براساس برازش داده‌های تجربی پرداختیم. از روابط درمی‌یابیم که دیمپل‌دار کردن لوله‌ها موجب می‌شود در همان دبی و همان انتقال حرارت، کیفیت بخار بیشتری داشته باشیم.

در طول انجام آزمایش در شرایط یادشده تنها دو الگوی جریان تناوبی و حلقوی برای لوله دیمپل مشاهده شد، در حالی که همان طور که بیان شد سه نوع الگوی جریان جداشده موجی، تناوبی و حلقوی برای لوله صاف ثبت شد. گذار از الگوی جریان تناوبی به حلقوی در لوله دیمپل در کیفیت بخارهای کمتری نسبت به لوله صاف اتفاق می‌افتد. در یک شار جرمی ثابت و در ناحیه کیفیت بخاری که جریان در لوله صاف جداشده موجی در لوله دیمپل الگوی جریان تناوبی است.

برای ترسیم نقشه‌های الگوی جریان و به‌دست آوردن مرز بین الگوهای مختلف جریان به نقاط گذار بین الگوهای مختلف جریان در یک سرعت جرمی ثابت نیاز است. این نقاط گذار با تغییر کیفیت بخار در خروجی لوله آزمایش در یک سرعت جرمی به‌دست می‌آیند. در این نقاط گذار شکل جریان ترکیبی از دو الگوی بالا دستی و پایین دستی است و به صورت غیرپایدار از الگوی جریان پایین دستی به بالا دستی تغییر می‌کند، اما مسأله مهم این که در کیفیت‌های بخار پیش یا پس از این نقاط گذار الگوهای جریان کاملاً قابل تشخیص و تمیز دادن است.

5- نتیجه‌گیری

با افزایش شار جرمی سرعت سیال کاری افزایش پیدا می‌کند که با بهبود ترم جابه‌جایی موجب افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود. افزایش دبی در نواحی با کیفیت بخار بالا و با نزدیک شدن به الگوی جریان حلقوی تأثیر بیشتری در افزایش ضریب انتقال حرارت داشته و دو منحنی تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار در دو شار جرمی متفاوت 155 kg/m^2s و 420 kg/m^2s با شدت بیشتری از یکدیگر فاصله می‌گیرند. در مقابل زمانی که کیفیت بخار پایین و جوشش هسته‌ای پدیده غالب در مکانیزم انتقال حرارت است و ترم جابه‌جایی تأثیر چشم‌گیری ندارد.

در طول انجام آزمایش در شرایط یادشده تنها دو الگوی جریان تناوبی و حلقوی برای لوله دیمپل مشاهده شد، در حالی که سه نوع الگوی جریان جداشده موجی، تناوبی و حلقوی برای لوله صاف ثبت شد.

گذار از الگوی جریان تناوبی به حلقوی در لوله دیمپل در کیفیت بخارهای کمتری نسبت به لوله صاف اتفاق می‌افتد.

در یک شار جرمی ثابت و در ناحیه کیفیت بخاری که جریان در لوله صاف جداشده موجی است، در لوله دیمپل الگوی جریان تناوبی است.

با در اختیار داشتن داده‌های تجربی آزمایشگاهی می‌توان با تعریف معادلات تجربی که بتواند پارامترهای اساسی مسأله را در روابط وارد کند، معادلات مناسبی جهت تخمین رفتار پدیده‌های فیزیکی از جمله مبردها در سیکل‌های گرمایش و سرمایش ایجاد کرد. در این مقاله به معرفی روند آزمایش و راه‌کاری جهت یافتن معادلاتی برای مبرد R600-a براساس برازش داده‌های تجربی پرداختیم. از معادلات به این نتیجه رسیدیم که دیمپل‌دار کردن لوله‌ها موجب می‌شود در همان دبی و همان انتقال حرارت ما کیفیت

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.25.7]

بخار بیشتری داشته باشیم.

در لوله دیمپل و در کیفیت بخار $x = 0.15$ و شار جرمی 155 kg/m^{2}s دامنه موج‌ها به اندازه‌ای بلند است که سطح بالایی لوله را تر می‌کنند (الگوی جریان تناوبی)، در حالی که در لوله صاف و در کیفیت بخار $x = 0.15$ و شار جرمی 155 kg/m^{2}s دو فاز گاز و مایع بدون اختلاط زیاد محسوسی در یکدیگر به طور جداگانه و با دامنه موج به نسبت کمتر که به سطح بالایی لوله نمی‌رسد در جهت جریان از یکدیگر حرکت می‌کنند (جریان جدا شده موجی). در لوله دیمپل و در کیفیت بخار $x = 0.3$ و در شار جرمی 155 kg/m^{2}s جریان به سمت محیط لوله حرکت می‌کند و سطح بالایی لوله را کاملاً تر می‌کند و قسمت زیادی از فاز مایع نیز در پایین لوله در جریان است. در این حالت می‌توان دید که سطح مشترک فاز مایع و گاز اغتشاش قابل توجهی دارند. تقریباً در همین شرایط یعنی در کیفیت بخار $x = 0.31$ و شار جرمی 155 kg/m^{2}s در لوله صاف الگوی جریان هم‌چنان تناوبی است. درنهایت هنگامی که جریان در لوله دیمپل به کیفیت بخار $x = 0.61$ و شار جرمی 155 kg/m^{2}s می‌رسد و در لوله صاف به کیفیت بخار $x = 0.7$ و شار جرمی 155 kg/m^{2}s می‌رسد، الگوی جریان در هر دو لوله حلقوی است، اما با این تفاوت که فیلم مایع شکل گرفته در پایین لوله در لوله دیمپل نازک‌تر از لوله صاف است. در واقع حضور گودی و برآمدگی موجب افزایش اغتشاشات میان فازی و ورود بیشتر قطرات مایع هسته بخار مرکزی در الگوی جریان حلقوی می‌شود.

ارائه نقشه الگوهای جریان و بیان مرز بین رژیم‌های متفاوت در جوشش و چگالش جابه‌جایی اجباری R600-a داخل لوله دیمپل که تاکنون اطلاعاتی در این خصوص در دسترس نبوده است.

اصلاح روابط تجربی الگوی جریان در لوله حرارتی صاف برای مبرد R600-a برای نخستین بار است.

اصلاح روابط تجربی الگوی جریان در لوله حرارتی دیمپل و ارائه رابطه تجربی و تأثیر پارامترهای هندسی این لوله پیشنهادی برای مبرد R600-a برای نخستین بار است.

6- فهرست علائم

A	سطح (m^2)
D	قطر لوله (m)
e	قطر سیم (m)
F(q)	توان تجربی
Fr	عدد فرود
g	شتاب جاذبه (m/s^2)
G	شار جرمی (kg/m^{2}s)
h	ضریب انتقال حرارت (kW/m^{2}K)
H	طول کانال (mm)
L	طول لوله (m)
P	فشار (kPa)
q	شار حرارتی (kW/m^2)
T	دما (K)
We	عدد وبر
X	کیفیت بخار

علایم یونانی

μ	لزجت دینامیکی (kgm^{-1}s^{-1})
ρ	چگالی (kgm^{-3})
φ	ضریب تصحیح دوفازی (degree)

زیرنویس‌ها

vd	بخار
L	مایع
v	بخار
Ld	مایع

7- مراجع

[1] M. K. Chyu, Y. Yu, H. Ding, J. P. Downs, F. O. Soechting, Concavity enhanced heat transfer in an internal cooling passage, *International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition ASME*, paper No. 78705, pp. V003T09A080, 1997.

[2] H. K. Moon, T. O'Connell, B. Glezer, Channel height effect on heat transfer and friction in a dimpled passage, *Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 122, No. 2, pp. 307-313, 2000.

[3] G. I. Mahmood, M. L. Hill, D. L. Nelson, P. M. Ligrani, H. K. Moon, B. Glezer, Local heat transfer and flow structure on and above a dimpled surface in a channel, *Turbomachinery*, Vol. 123, No. 1, pp. 115-123, 2000.

[4] G. I. Mahmood, M. Z. Sabbagh, P. M. Ligrani, Heat transfer in a channel with dimples and protrusions on opposite walls, *Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 15, No. 3, pp. 275-283, 2001.

[5] G. I. Mahmood, P. M. Ligrani, Heat transfer in a dimpled channel: Combined influences of aspect ratio, temperature ratio, Reynolds number, and flow structure, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, No. 10, pp. 2011-2020, 2002.

[6] N. K. Burgess, P. M. Ligrani, Effects of dimple depth on channel nusselt numbers and friction factors, *Heat Transfer*, Vol. 127, No. 8, pp. 839-847, 2004.

[7] EPA Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2011. The National Service Center for Environmental Publications (NSCEP), U.S. Environmental Protection Agency, 1200 Pennsylvania Ave., N.W., Washington, DC 20460, U.S.A. Available on," [Online], (2003).

[8] EPA Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1987–2011. The National Service Center for Environmental Publications (NSCEP), U.S. Environmental Protection Agency, 1200 Pennsylvania Ave., N.W., Washington, DC 20460, U.S.A. Available on," [Online], (2003).

[9] M. Nasr, M. A. Akhavan-Behabadi, M. R. Momenifar, P. Hanafizadeh, Heat transfer characteristic of R-600a during flow boiling inside horizontal plain tube, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 66, No. 8, pp. 93-99, 2015.

[10] J. B. Copetti, M. H. Macagnan, F. Zinani, Experimental study on R-600a boiling in 2.6 mm tube, *Refrigeration*, Vol. 36, No. 2, pp. 325-334, 2013.

[11] Z. H. Ayub, A. H. Ayub, G. Ribatski, T. A. Moreira, T. S. Khan, Two-phase pressure drop and flow boiling heat transfer in an enhanced dimpled tube with a solid round rod insert, *Refrigeration 75*, Vol. 26, No. 8, pp. 1-13, 2017.

[12] O. Zurcher, J. R. Thome, D. Favrat, Evaporation of ammonia in a smooth horizontal tube: heat transfer measurements and predictions, *Heat Transfer*, Vol. 121, , No. 8, pp. 89-101, 1999.

[13] N. Kattan, J. R. Thome, D. Favrat, Flow boiling in horizontal tubes: part 1—development of a diabatic two-phase flow pattern map, *Heat Transfer*, Vol. 120, No. 1, pp. 140-147, 1998.

[14] E. W. Jassim, T. A. Newell, J. C. Chato, Probabilistic determination of two-phase flow regimes in horizontal tubes utilizing an automated image recognition technique, *Experiments in Fluids*, Vol. 42, No. 4, pp. 563-573, 2007.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.25.7]