

بررسی انتقال حرارت جریان چرخشی جوششی مبرد R-۱۳۴a در لوله افقی

محمد علی اخوان بهابادی^۱، امیر محمد پور^۲، مسعود جمالی آشتیانی^۳

akhavan@ut.ac.ir
amir_mp61@yahoo.com
m.jamali@bhrc.ac.ir

^۱ دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک- پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
^۲ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک- پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
^۳ کارشناس ارشد مهندسی مکانیک- پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

چکیده

زیرا علاوه بر CFC ها، HCFC ها نیز در حال کنار گذاشته شدن می‌باشند. در این راستا در این بررسی از مبرد R-۱۳۴a به عنوان سیال عامل استفاده شده است که دارای کاربرد های زیادی در صنایع برودتی می باشد و بعنوان جایگزین مبرد R-۱۲ انتخاب گردیده است. مطالعات زیادی بر روی اثر نوار پیچیده شده بر نرخ افزایش انتقال حرارت در مبدلهای حرارتی انجام شده است. اکثر این مطالعات به بررسی ضرایب انتقال حرارت در جریان تک فاز پرداخته اند [۱-۵] و مطالعات محدودی بر روی جریان دو فاز انجام شده است [۶-۸]. داده های موجود بر روی جوشش جریان چرخشی مبردها بسیار نادر است. به همین علت تصمیم گرفته شد که مطالعه ای بر روی اثر نوار پیچیده شده بر ضریب انتقال حرارت در اواپراتور افقی و با مبرد جدید R-۱۳۴a انجام شود.

دستگاه آزمایش

دستگاه مورد آزمایش یک سیکل تبرید تراکمی بخار مجهز به کلبه وسایل اندازه گیری مورد نیاز است. در شکل (۱) نمای شماتیک دستگاه آزمایشگاهی نشان داده شده است که شامل: اواپراتور اولیه، تست اواپراتور، اواپراتور ثانویه، کمپرسور، کندانسور، شیر انبساط و وسایل لازم برای اندازه گیری و کنترل می باشد.

اواپراتور مورد آزمایش (تست اواپراتور) شامل یک لوله مسی به قطر داخلی ۷/۵ mm و قطر خارجی ۹/۵۴ mm و طول ۱۲۶۰ mm می باشد. گرمای مورد نیاز تست اواپراتور توسط یک هیتر الکتریکی که به طور یکنواخت (شار ثابت) دور لوله مسی پیچیده شده تامین می شود. مقدار توان مطلوب هیتر الکتریکی توسط یک دیمتر صنعتی^۶ ۲kW تنظیم می گردد.

از آنجا که طول لوله مورد آزمایش محدود است، دامنه کمی از تغییرات کیفیت بخار در تست اواپراتور قابل حصول می باشد. بنابراین به منظور پوشش دادن کل دامنه جوشش، سیستم به گونه ای طراحی شده که کیفیت های متفاوت بخار، در ورود به تست اواپراتور قابل دستیابی باشد، این کار با نصب یک اواپراتور اولیه پیش از تست اواپراتور محقق شده و با تغییر ولتاژ ورودی به هیتر الکتریکی بر روی اواپراتور اولیه، می توان کیفیت بخار را در ورود به تست اواپراتور تنظیم کرد. اواپراتور اولیه یک لوله مسی با طول ۱۲۰۰ mm و قطر داخلی ۱۰ mm می باشد، که گرمای آن توسط یک دیمتر صنعتی ۳kW تامین شده است. برای سوپر هیت کردن مبرد و جلوگیری از

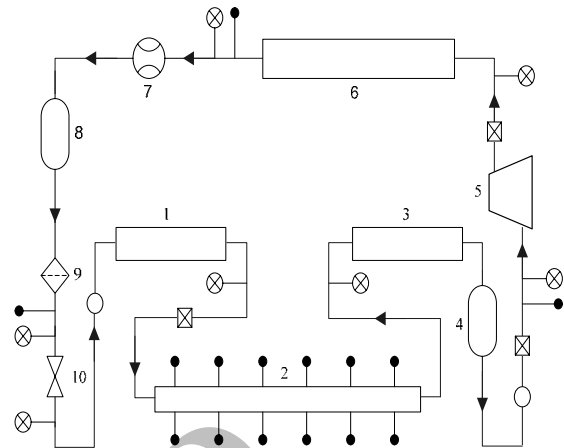
در این تحقیق بررسی انتقال حرارت جریان جوششی مبرد R-۱۳۴a درون لوله افقی صاف و همچنین لوله های افقی با جریان چرخشی انجام می شود. برای ایجاد جریان چرخشی از نوارهای پیچیده شده به جنس فولاد زنگ نزن استفاده می گردد. دستگاه مورد استفاده در این بررسی، یک سیستم تبرید تراکمی بخار مجهز به کلبه وسایل اندازه گیری مورد نیاز است. این سیستم شامل سه اواپراتور گرم شونده با هیتر الکتریکی می باشد که به ترتیب اواپراتور اولیه، تست اواپراتور و اواپراتور ثانویه نامیده می شوند. در این تحقیق، داده های تجربی برای لوله صاف و همچنین لوله های با نوار پیچیده شده با چهار نسبت پیچش متفاوت ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ جمع آوری گردید. داده های آزمایشگاهی در بازه شار حرارتی $5200-1800 \text{ W/m}^2$ ، سرعت جرمی $136-54 \text{ kg/m}^3$ و کیفیت بخار $0/9 - 0/2$ می باشند. تحلیل داده ها نشان داد که نصب نوار پیچیده شده در داخل لوله افقی می تواند ضریب انتقال حرارت جابه جایی را تا حداکثر ۶۸٪ نسبت به لوله صاف افزایش دهد. براساس داده های جمع آوری شده در این تحقیق، رابطه ای برای محاسبه ضریب انتقال حرارت در جوشش جریانی در داخل لوله های با نوار پیچیده شده بدست آورده شده است.

کلمات کلیدی: انتقال حرارت - جریان دوفاز - جوشش - نوار پیچیده شده - R-۱۳۴a

مقدمه

صنایع تبرید، تهویه مطبوع و پمپ های حرارتی قدم در راه درازی برای تبدیل از مبردهای کلروفلوئورو کربن ها CFC، به هیدروکلروفلوئورو کربن ها HCFC، به هیدروفلوئورو کربن ها HFC، و به مبردهای طبیعی (مانند هیدروکربن ها و آمونیاک) گذارده اند. این تغییر نه تنها طراحی، بهینه سازی و آزمایش مجدد تمامی تجهیزات اصلی جدید را می طلبد بلکه نیاز به ایجاد تغییرات اساسی در بسیاری از دستگاه های موجود را نیز طلب می کند. ترکیب این مراحل با هدف توسعه روش های دقیق تر و سیکل های با بازده انرژی بیشتر، باعث شده که انتقال حرارت تبرید به یک زمینه تحقیقاتی فعال تبدیل شود. در قرن حاضر تحقیقات زیادی بر روی HFC ها انجام گرفته است.

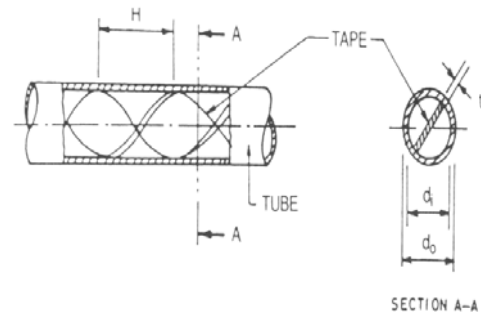
ورود مایع به کمپرسور از یک اواپراتور ثانویه و یک جمع کننده مایع استفاده گردیده است.



- | | | |
|---------------------|---------------------|--------------------|
| 1- Pre-Evaporator | 6- Condenser | ← - Flow Direction |
| 2- Test Evaporator | 7- Rotameter | ● - Thermocouple |
| 3- After Evaporator | 8- Receiver | ⊗ - Pressure Gauge |
| 4- Accumulator | 9- Filter-Drier | ○ - Sight Glass |
| 5- Compressor | 10- Expansion Valve | ⊠ - Shut off Valve |

شکل ۱- نمای شماتیک دستگاه آزمایشگاهی

ترمو کوپل های استفاده شده از نوع سری T می باشند که با دقت °C ۰/۱ کالیبره شده اند ، فشار سنج ها نیز با دقت ۲ kPa کالیبره گردیده اند.



شکل ۲- پارامترهای مشخصه نوارهای پیچیده شده و تصویر نوار های پیچیده شده استفاده شده در آزمایشات

نوار پیچیده شده از جنس فولاد زنگ نزن با ضخامت ۰/۴۱mm و پهنای ۷/۳ mm (کمی کمتر از قطر داخلی لوله) می باشد. گام نوار پیچیده شده برای یک چرخش ۱۸۰° ، با H نشان داده شده است.

نسبت پیچش به صورت نسبت گام نوار به قطر داخلی لوله تعریف می شود ($Y = H/d_i$). در این مطالعه نوار های پیچیده شده با چهار نسبت پیچش متفاوت ۶ ، ۹ ، ۱۲ و ۱۵ مورد بررسی قرار گرفته اند ، در شکل ۲ نمایی از چهار نوار پیچیده شده که در آزمایشات مورد استفاده قرار گرفته اند، نشان داده شده است.

جمع آوری و آنالیز داده ها

مجموعاً ۱۶۰ آزمایش مختلف با چهار سرعت جرمی متفاوت kg/m^2s ۱۳۶ ، ۸۵ ، ۱۱۴ ، ۱۲۶ و ۵۴ برای لوله های صاف و لوله های دارای نوار پیچیده شده صورت گرفت. حدود تغییرات پارامترهای کاری بصورت زیر می باشند :

- | | |
|---------------------|------------------------------------|
| R-۱۳۴a | سیال: |
| ۵۴ تا ۱۳۶ kg/m^2s | سرعت جرمی مبرد : |
| -۱۹ °C تا -۳ | درجه حرارت جوشش متوس |
| ۰/۲-۰/۹ | کیفیت بخار ورودی به تست اواپراتور: |
| ۰/۳-۱ | کیفیت بخار خروجی از تست اواپراتور: |
| ۱۸۰۰-۵۳۰۰ W/m^2 | شار حرارتی: |
| ۱۲۵۰-۳۵۰۰ | عدد رینولدز مایع: |
| ۴۱۰۰۰-۹۶۰۰۰ | عدد رینولدز بخار: |
| ۶-۱۵ | نسبت پیچش $Y = \frac{H}{d_i}$: |

برای محاسبه درجه حرارت های اشباع و انتالی های اشباع و سوپر هیت R-۱۳۴a از [۹] و سایر خواص از جمله ویسکوزیته از [۱۰] استفاده شده است.

با نوشتن رابطه انتالی ثابت دو سر شیر سوزنی کیفیت بخار ورودی به اواپراتور اولیه محاسبه می شود و همچنین برای محاسبه کیفیت بخار در ورودی و خروجی تست اواپراتور از موازنه حرارتی استفاده گردیده است. کیفیت بخار متوسط نیز به صورت میانگین کیفیت بخار ورودی و خروجی از تست اواپراتور محاسبه می گردد. ضرایب انتقال حرارت در هر مرحله در تست اواپراتور بر اساس گرمای داده شده توسط هیتر الکتریکی و اختلاف درجه حرارت بین دیواره و مبرد در حال جوشش بدست می آید. مراحل محاسبه بدین شرح است:

۱- درجه حرارت متوسط سطح خارجی دیواره تست اواپراتور در یک مقطع، t_{ws} ، توسط معادله (۱) بدست می آید :

$$t_{ws} = \frac{t_T + t_B}{2} \quad (1)$$

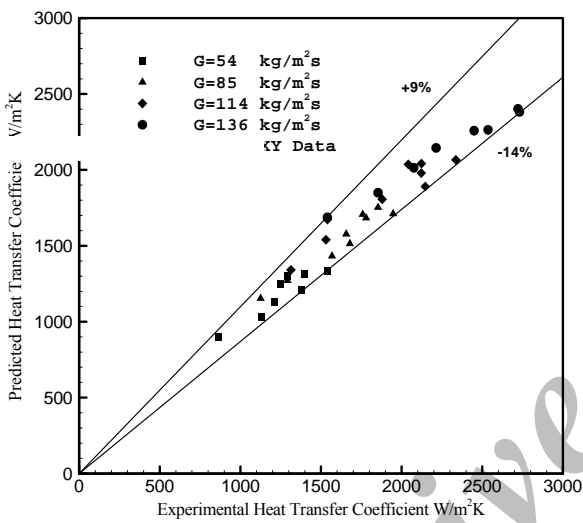
که، t_T و t_B به ترتیب درجه حرارت های فوقانی و تحتانی لوله می باشند که از ترموکوپل های سری T که بر روی سطح خارجی لوله جوش داده شده است، بدست می آیند.

$$Re_f = \frac{G(1-x)d_i}{\mu_f} \quad (10)$$

$$Bo = \frac{q}{Gh_{fg}}$$

که در آنها h_p ضریب انتقال حرارت دو فازی در لوله صاف، Bo عدد جوشش، X کیفیت بخار متوسط در تست اواپراتور، ρ_g و ρ_f بترتیب دانسیته فاز مایع و گاز، G سرعت جرمی، d_i قطر داخلی لوله، k_f ضریب هدایت حرارتی مایع، μ_f لزجت دینامیکی مایع، Pr_f عدد پراوتل مایع و h_{fg} انتالپی نهان تبخیر می باشند.

رابطه فوق نتایج آزمایشگاهی مطالعه حاضر را با ۱۴٪- الی ۹٪+ خطا پیش بینی می کند که برای مطالعات آزمایشگاهی قابل قبول است (شکل ۳). بنابراین از این رابطه جهت تحلیل های آتی استفاده خواهیم کرد.



شکل ۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی لوله صاف با رابطه جانگر و وینترتون (رابطه ۸)

قبل از بررسی نتایج لوله با نوار پیچیده شده لازم است نکاتی در مورد نوار پیچیده شده ذکر گردد:

الف) افزایش انتقال حرارت جوششی تحت جریان چرخشی عموماً ناشی از ترکیب پنج اثر زیر می باشد:

۱- طول موثر خط جریان و سرعت آن در جریان های پیچشی بیشتر از جریان مشابه در لوله صاف است. این قضیه از دو جهت بر ضریب انتقال حرارت تاثیر می گذارد، بالا بردن آشفستگی در انتقال حرارت جابجایی و سرعت مماسی بیشتر در نزدیک دیواره.

۲- حرکت چرخشی باعث ایجاد میدان شتاب گریز از مرکز، درون لوله می شود. برای جریان های چرخشی دوفاز که جوشش در دیواره لوله اتفاق می افتد، حباب های تشکیل شده در سطح داغ لوله بوسیله مایع چرخشی بطور سریع احاطه می شوند. بعلت اختلاف چگالی بین مایع و بخار، نیروی گریز از مرکز بیشتری به مایع نسبت به حباب ها وارد می شود. بنابراین حباب ها به سرعت از دیواره به سمت مرکز لوله منتقل شده و مایع جایگزین آنها می شود.

۲- میانگین درجه حرارت های سطح خارجی دیواره تست اواپراتور، t_{wo} ، از متوسط گیری درجه حرارت های شش نقطه محوری بدست می آید:

$$t_{wo} = \frac{\sum_{i=1}^6 t_{ws}}{6} \quad (2)$$

۳- گرمای داده شده به تست اواپراتور:

$$Q = VI \quad (3)$$

که V ولتاژ دو سر المنت حرارتی و I جریان عبوری از آن می باشد.

۴- شار حرارتی شعاعی q ، برای تست اواپراتور توسط رابطه زیر محاسبه می شود:

$$q = Q / (\pi d_i L) \quad (4)$$

۵- افت درجه حرارت در دیواره لوله، Δt_w ، از رابطه زیر با استفاده از شار حرارتی شعاعی، k_w ضریب هدایت حرارتی لوله مسی و قطر های داخلی و خارجی لوله محاسبه می شود:

$$\Delta t_w = \frac{q d_i \ln(d_o / d_i)}{2k_w} \quad (5)$$

۶- درجه حرارت متوسط سطح داخلی، t_{wi} ، با کاستن افت درجه حرارت در دیواره از درجه حرارت متوسط سطح خارجی محاسبه می شود:

$$t_{wi} = t_{wo} - \Delta t_w \quad (6)$$

۷- فشار استاتیک متوسط در تست اواپراتور بصورت میانگین فشارهای ورودی و خروجی مبرد در نظر گرفته می شود. درجه حرارت اشباع بخار متوسط، t_s ، درجه حرارت اشباع متناظر با این فشار استاتیک می باشد.

۸- ضریب انتقال حرارت تست اواپراتور با داشتن شار حرارتی، درجه حرارت جوشش متوسط و درجه حرارت سطح داخلی لوله، توسط معادله (۷) محاسبه می گردد.

$$h = \frac{q}{(t_{wi} - t_s)} \quad (7)$$

ارایه نتایج و بحث و بررسی

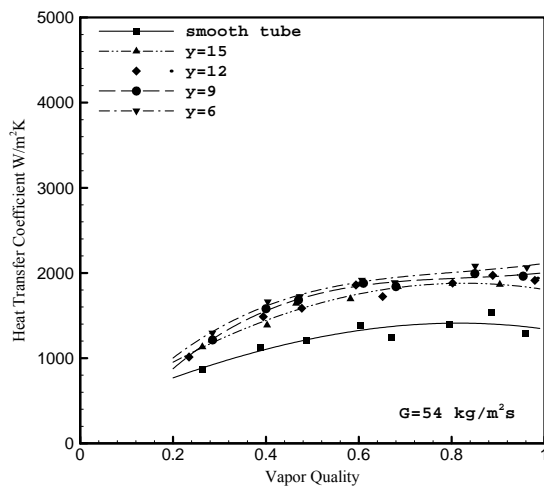
نخست ضرایب انتقال حرارت لوله صاف را بدست آورده با روابط متعدد موجود مقایسه کردیم. ملاحظه شد که این داده ها بهترین سازگاری را با رابطه پیشنهادی جانگر و وینترتون [۱۱] دارند. این رابطه به صورت زیر است:

$$h_p = h_f \left[1 + 3000Bo^{0.86} + 1.12 \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.75} \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{0.41} \right] \quad (8)$$

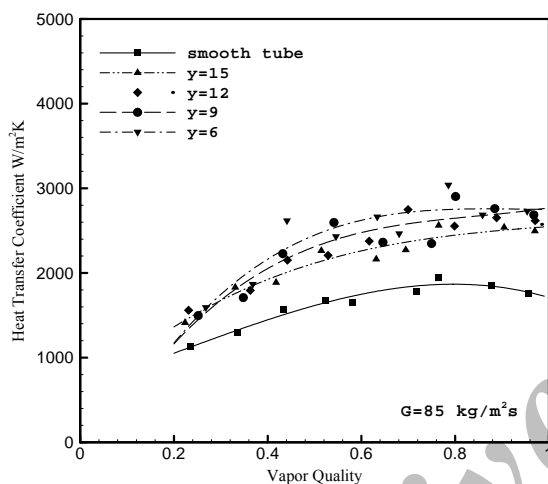
در رابطه فوق بصورت زیر محاسبه می شود:

$$h_f = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.4} \left(\frac{k_f}{d_i} \right) \quad (9)$$

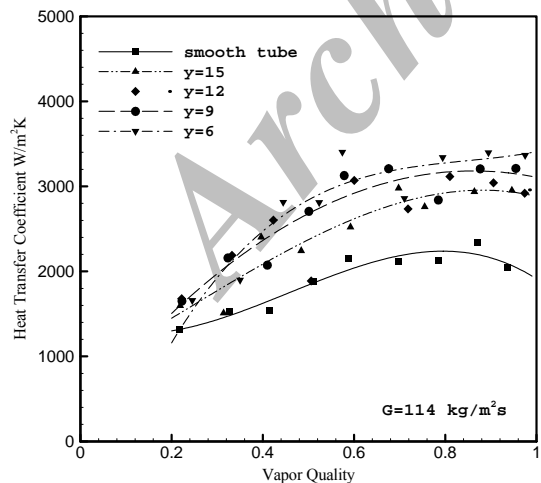
همچنین:



شکل ۵- تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای لوله های با نوار پیچیده شده در سرعت جرمی $54 \text{ kg/m}^2\text{s}$



شکل ۶- تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای لوله های با نوار پیچیده شده در سرعت جرمی $85 \text{ kg/m}^2\text{s}$

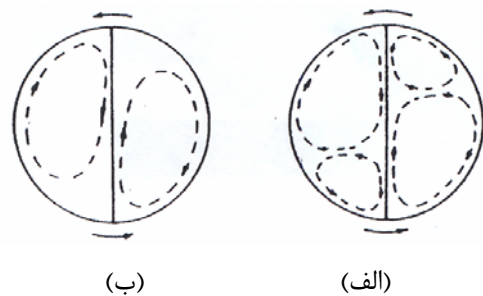


شکل ۷- تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای لوله های با نوار پیچیده شده در سرعت جرمی $114 \text{ kg/m}^2\text{s}$

۳- اثر فینی نوار باعث افزایش سطح انتقال حرارت می گردد چرا که رسانش گرما به نوار نیز انجام میشود. این مسئله تابعی از سطح تماس بین نوار و لوله، جنس نوار، مشخصات جریان و اندازه های نوار و لوله می باشد. اهمیت این مورد نسبت به موارد دیگر ناچیز است.

۴- کاهش به وجود آمده در قطر هیدرولیکی به واسطه حضور نوار نیز باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می شود. ایجاد مانع در مسیر جریان در لوله صاف مقطع جریان را کاهش داده و لذا باعث افزایش سرعت می شود. استفاده از نوار، محیط تر شده مسیر جریان را نیز افزایش می دهد.

۵- ایجاد جریان ثانویه، اختلاط را در اثر حرکت پیچشی افزایش می دهد. اضافه شدن یک نیروی گریز از مرکز بر امتداد جریان مستقیم باعث ایجاد جریان چرخشی در دو سوی مانع موجود در جریان می گردد. مسیرهای این جریان ثانویه برای دو مشخصات مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است [۱]. این مسیرهای جریان در جریان تک فاز وجود دارند، گرچه تاثیر مشابهی نیز احتمالاً در جریان همراه با جوشش خواهند داشت. اولین نوع این جریان های ثانویه که شامل یک جریان پیچشی ساده در دو طرف نوار است، در اعداد رینولدز کم جریان یا نسبت پیچش بزرگ رخ می دهد. دومین نوع جریان ثانویه در اعداد رینولدز بالاتر یا نسبت پیچش کوچک روی داده که شامل دو ورتکس در جهت مخالف در هر یک از دو سوی نوار می باشد.

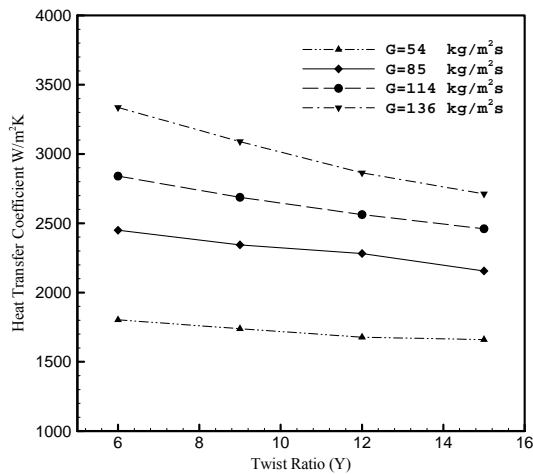


شکل ۴- الگوهای جریان ثانویه، منگلیک و برگلس [۱]

(ب) نوار پیچیده شده مانند دیگر وسایل افزایشی از جمله دنده، زبری و ... جریان را بهم نمی زند. جریان در یک مقطع صاف است و بوسیله یک سطح با هندسه صاف هدایت می شود. پس رفتار انتقال حرارت برای لوله با نوار پیچیده شده و لوله صاف تقریباً مشابه است. در شکل های ۵ تا ۸، ضرایب انتقال حرارت بدست آمده برای لوله صاف و لوله های با نوار پیچیده شده بر حسب کیفیت بخار ترسیم شده اند. هر کدام از این شکل ها برای یک سرعت جرمی بخصوص می باشد.

با مشاهده و بررسی شکل های ۵ الی ۸ موارد زیر نتیجه می شود: ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار افزایش می یابد. این پدیده بدین سبب است که در کیفیت بخار بالا لایه مایع روی دیواره داخلی لوله، نازکتر بوده و باعث مقاومت حرارتی کمتری می شود.

است، می توان نتیجه گرفت که اصولاً نوار پیچیده شده و وسایلی که جریان چرخشی درون لوله ایجاد می کنند، در اوپراتور عملکرد بهتری نسبت به کندانسور دارند.



شکل ۹- تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط با نسبت پیچش در سرعت های جرمی مختلف

رابطه پیشنهادی برای جریان داخل لوله با نوار پیچیده شده

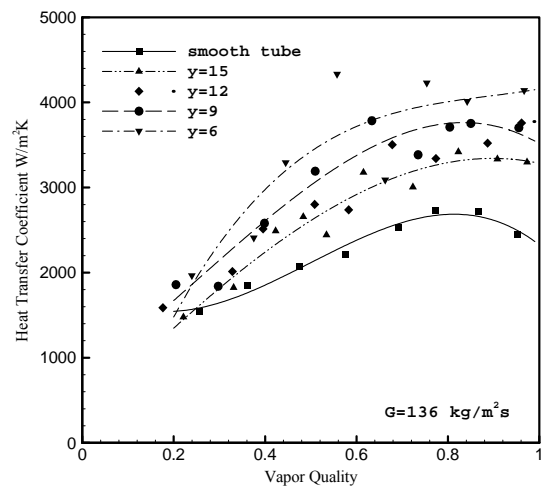
بر اساس مطالعات وسیع انجام شده بر روی منابع موجود، مشخص شد که روابط بسیار اندکی در زمینه انتقال حرارت در داخل لوله های افقی دارای نوار پیچیده شده وجود دارد [۷ و ۸]. با توجه به اینکه این روابط از تطابق چندان خوبی با داده های ما برخوردار نبودند تصمیم به پیشنهاد رابطه ای در این مورد گرفته شد. برای این کار از اصول و مدل رابطه آگروال [۷] استفاده شده و در نهایت دو رابطه بدست آمد. از آنجا که نسبت ضریب انتقال حرارت لوله با نوار پیچیده شده به لوله صاف (h_s/h_p)، تابعی از نسبت پیچش، کیفیت بخار، سرعت جرمی و شار حرارتی می باشد. وابستگی h_s/h_p به موارد ذکر شده فوق نشان می دهد که افزایش ضریب انتقال حرارت چرخشی تابعی از جابجایی اجباری و همچنین اثرات جریان چرخشی می باشد. بر اساس این مشاهدات، از دو پارامتر بی بعد عدد جوشش Bo و عدد رینولدز Re بمنظور اعمال نمودن تاثیر جابجایی اجباری، و همچنین نسبت پیچش Y برای لحاظ کردن اثر جریان چرخشی بر نسبت h_s/h_p استفاده شده است. بنابر این h_s/h_p را بصورت زیر می نویسیم:

$$\frac{h_s}{h_p} = f[Re, Bo, Y] \quad (11)$$

h_p در رابطه فوق از رابطه (۸) بدست می آید. از آنجا که آثار جابجایی گریز از مرکز و چرخشی مستقل نیستند پس بهتر است تابع f را بصورت ضرب پارامترهای ذکر شده تعریف کنیم:

$$\frac{h_s}{h_p} = a_1 Re^{a_2} Bo^{a_3} Y^{a_4} + a_5 \quad (12)$$

برای بهتر پوشش دادن داده ها توسط رابطه (۱۲)، ثابت a_5 بر رابطه فوق اضافه شده است. در نهایت با استفاده از داده های مربوط به لوله های دارای نوار پیچیده شده و آنالیز رگرسیون حداقل مربعات^{۱۳}، ضرایب فوق را بدست آورده و رابطه زیر حاصل می شود:



شکل ۸- تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای لوله های با نوار پیچیده شده در سرعت جرمی $136 \text{ kg/m}^2\text{s}$

ضریب انتقال حرارت با افزایش سرعت جرمی بخار، زیاد می شود. این مسأله براساس آثار جابجایی بزرگتر در سرعت جرمی بالاتر توجیه می شود. در جوشش جابجایی زمانی که سرعت سیال افزایش می یابد، گرمای دیواره لوله سریعتر توسط سیال گرفته می شود و در نتیجه انتقال حرارت افزایش می یابد. به عبارت دیگر سرعت بالا، عدد رینولدز بالا می دهد، بنابر این مانند جابجایی اجباری تک فاز، ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد. در حقیقت، سرعت جرمی بخار بالاتر باعث آشفتنی بیشتر در فیلم مایع می گردد و در نتیجه موجب افزایش میزان جوشش می شود. افزایش سرعت جرمی باعث تغییر الگوی جریان از جداشونده موجی به حلقوی می شود، که این نیز خود باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می گردد.

هر چه نسبت پیچش کوچکتر شود، ضریب انتقال حرارت بیشتر افزایش می یابد. در واقع با کاهش نسبت پیچش: طول موثر خط جریان، سرعت مماسی در نزدیک دیواره، نیروهای ناشی از شتاب گریز از مرکز و حرکت ثانویه جریان افزایش و در نتیجه ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد. در شکل ۹ نحوه تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط با نسبت پیچش در سرعت های جرمی مختلف نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می شود، با کاهش نسبت پیچش نوار، ضریب انتقال حرارت متوسط افزایش می یابد. این مقدار افزایش در ضریب انتقال حرارت متوسط با بالاتر رفتن سرعت جرمی قابل توجه می شود.

بهترین لوله با نوار پیچیده شده با نسبت پیچش ۶ (کمترین گام) در ناحیه با کیفیت بخار بالا ضریب انتقال حرارت را در نقاطی تا ۶۸٪ نسبت به لوله صاف افزایش می دهد. بیشترین مقدار میانگین تغییرات نسبت ضرایب انتقال حرارت لوله با نوار پیچیده شده به لوله صاف h_s/h_p برابر ۱/۴۶ می باشد که در گام ۶ و سرعت جرمی $114 \text{ kg/m}^2\text{s}$ و $85 \text{ kg/m}^2\text{s}$ روی می دهد.

در آزمایشات مشابهی که رجبی نجار [۱۴] بر روی کندانسور انجام داد، افزایش ضریب انتقال حرارت لوله با نوار پیچیده شده نسبت به لوله صاف را حداکثر ۴۳٪ گزارش نمود. با توجه به اینکه در تحقیق حاضر که بر روی اوپراتور انجام شده این افزایش به ۶۸٪ رسیده

در روابط فوق C_a سرعت محوری سیال، C_t سرعت مماسی سیال، C_s سرعت کل، ρ دانسیته سیال، M دبی جرمی، δ_H ضخامت و ν لزجت سینماتیکی مایع می‌باشند. اثر جابجایی گریز از مرکز را نیز می‌توانیم توسط عدد بی بعد F_{cc} که در پائین توضیح داده خواهد شد اعمال کنیم. رابطه (۱۱) را می‌توانیم به فرم رابطه (۲۰) که شامل اثر جابجایی گریز از مرکز و جابجایی چرخشی به طور جداگانه می‌باشد، نوشت.

$$\frac{h_s}{h_p} = b_1 Re_s^{b_2} Bo^{b_3} F_{cc}^{b_4} + b_5 \quad (20)$$

برای تعیین طبیعت تابع جابجایی گریز از مرکز F_{cc} در رابطه (۲۰)، تاتوم [۱۲] پیشنهاد کرد که اثر جابجایی گریز از مرکز را می‌توان با بهبود مناسب عدد فرود Fr اعمال کرد.

$$Fr = \frac{C_a}{gd_i} \quad (21)$$

عدد فرود Fr نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای گرانشی در جابجایی اجباری می‌باشد. در جریان چرخشی، مولفه مماسی سرعت سیال میدان نیروی گریز از مرکز تولید می‌کند و در سرعت‌های سیال بالا شتاب گریز از مرکز در دیواره لوله ممکن است از شتاب گرانشی تجاوز کند. این شرایط استفاده از یک عدد فرود اصلاح شده به نام عدد فرود چرخشی Fr_s داده شده بوسیله معادله (۲۲) را بجای F_{cc} مورد استفاده در معادله (۲۰) ایجاب می‌کند.

$$Fr_s = \frac{C_s^2}{\left(\frac{C_t^2}{R}\right) d_i} \quad (22)$$

با جایگزین کردن C_t از رابطه (۱۷) در رابطه (۲۲) دیده می‌شود که Fr_s متناسب با Y^2 می‌باشد. Fr_s را پارامتر جابجایی گریز از مرکز F_{cc} در رابطه (۲۰) نامیدیم، پس می‌توانیم F_{cc} را بصورت زیر تعریف کنیم:

$$F_{cc} = AY^B \quad (23)$$

با جایگزین کردن رابطه (۲۳) در رابطه (۲۰) رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{h_s}{h_p} = c_1 Re_s^{c_2} Bo^{c_3} Y^{c_4} + c_5 \quad (24)$$

و با توجه به داده‌های آزمایشگاهی و آنالیز رگرسیون حداقل مربعات، ضرایب فوق را بدست آورده و رابطه زیر حاصل می‌شود:

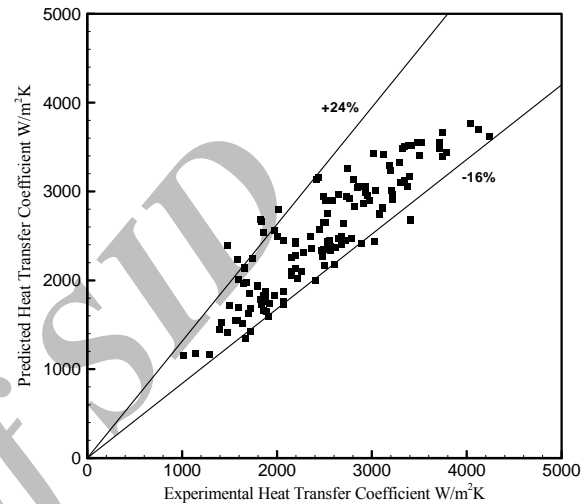
$$\frac{h_s}{h_p} = 0.0019 Re_s^{2.238} Bo^{1.546} Y^{-0.5} + 1.2261 \quad (25)$$

شکل ۱۱ مقایسه ای بین ضرایب انتقال حرارت محاسبه شده از رابطه پیشنهادی (رابطه ۲۵) و مقادیر اندازه گیری شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود این مقادیر در محدوده $\pm 20\%$ مقادیر تجربی قرار دارند. بنابراین روابط فوق تطبیق نسبتاً خوبی با مقادیر آزمایشگاهی دارد. انحراف میانگین و انحراف استاندارد ضرایب انتقال حرارت محاسبه شده توسط رابطه فوق از مقادیر آزمایشگاهی مطالعه حاضر به ترتیب $3/34\%$ و $12/85\%$ می‌باشد. همچنین آنالیز خطای وسایل اندازه گیری^{۱۸} با

$$\frac{h_s}{h_p} = 0.0056 Re^{2.214} Bo^{1.532} Y^{-0.5} + 1.2156 \quad (13)$$

شکل ۱۰ مقایسه ای بین ضرایب انتقال حرارت محاسبه شده از رابطه پیشنهادی (رابطه ۱۳) و مقادیر اندازه گیری شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود این مقادیر در محدوده 16% الی 24% مقادیر تجربی قرار دارند.

انحراف میانگین و انحراف استاندارد ضرایب انتقال حرارت محاسبه شده توسط رابطه فوق از مقادیر آزمایشگاهی مطالعه حاضر به ترتیب $14/65\%$ و $1/94\%$ می‌باشد.



شکل ۱۰- مقایسه نتایج آزمایشگاهی لوله‌های دارای نوار پیچیده شده با رابطه بدست آمده (رابطه ۱۳)

مدل فیزیکی: همانطور که در قسمت قبل هم بیان شد، اثر چرخش را می‌توان به دو فاکتور اثر جابجایی پیچشی و اثر گریز از مرکز تقسیم کرد. لوپینا و برگلز [۵] نشان دادند که اثر پیچشی نوار را می‌توان با جایگزین کردن عدد رینولدز چرخشی، Re_s به جای Re در رابطه (۱۲) اعمال کرد.

$$Re_s = \frac{C_s \cdot d_i}{\nu} \quad (14)$$

که در آن:

$$C_s = \sqrt{C_t^2 + C_a^2} \quad (15)$$

$$C_a = \frac{M}{\rho \left[\frac{\pi}{4} d_i^2 - \delta_H d_i \right]} \quad (16)$$

$$C_t = C_a \left(\frac{\pi}{2Y} \right) \quad (17)$$

در نتیجه:

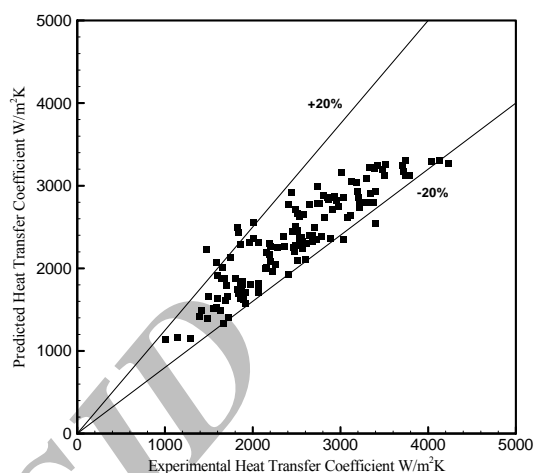
$$Re_s = Re \left[\frac{\sqrt{\pi^2 + 4Y^2}}{2Y} \right] \quad (18)$$

که:

$$Re = \frac{C_a \cdot d_i}{\nu} \quad (19)$$

- 2- Manglik, R.M. and Bergles, A.E. (1993). "Heat transfer and pressure drop correlations for twisted tape inserts in isothermal tubes: Part II-transition and turbulent flows." J. Heat Trans., T. ASME, Vol. 115, PP. 890-896.
- 3- Sarma, P.K., Kishorea, V.D. and Subrahmanyam, T. (2005). "A combined approach to predict friction coefficients and convective heat transfer characteristics in a tube with twisted tape inserts for a wide range of Re and Pr." Int. J. Therm. Sci., Vol. 44, PP. 393-398.
- 4- Smithberg, E., and Landis, F. (1964). "Friction and forced convection heat transfer characteristics in tubes with twisted tape swirl generators." Trans ASME, J. Heat Transfer, Vol. 86, PP. 434.
- 5- Lopina, R. F. and Bergles, A. E. (1969). "Heat transfer and pressure drop in tape-generated swirl flow of single phase water." Trans. ASME, J. Heat Transfer, Vol. 91, PP. 434.
- 6- Blatt, T. A. and Adt., R., Jr. (1963). "The effects of twisted tape swirl generators on the heat transfer rate and pressure drop of boiling Freon 11 and water." ASME, Vol. 63, PP. 63-71.
- 7- Agrawal, K.N. and Varma, H.K. (1986). "Heat transfer during forced convection boiling of R-12 under swirl flow." ASME, Vol. 108, PP. 567-572.
- 8- Kedzierski, M.A. and Kim, M.S. (1998). "Convective boiling and condensation heat transfer with a twisted tape insert for R12, R22, R152a, R134a, R290, R32/R134a, R32/R152a, R290/R134a, R134a/R600a." Thermal Science & Engineering, Vol. 6, No. 1, PP. 113-122.
- 9- Sonntag, R., Borgnakke, C. and Van wylen, G. (1997). Fundamentals of thermodynamics. John wiley and sons, New York.
- 10- Collier, J. and Thome, J. (1994). Convective boiling and condensation. Oxford University Press.
- 11- Gungor, K.E. and Winterton, R.H. (1987). "Simplified general correlation for saturated flow boiling and comparison of correlations to data." Chem. Eng. Res. Des, Vol. 65, PP. 148-156.
- 12- Tatom, F.B. (1962). "An investigation of heat transfer and pressure drop with local boiling and swirl flow." M.Sc. Thesis, Auburn University, Alabama.
- 13- Schultz, R.R. and Cole, R. (1979). "Uncertainty analysis in boiling nucleation." AIChE Symp. Series, Vol. 75, No.189, PP. 32-38.
- 14- Rajabi Najjar, A. (2004). "Enhancement of heat transfer during condensation of R-134a vapor using twisted tape inserts." M.Sc. Thesis, Mechanical Engineering Faculty, Engineering College, University of Tehran.

استفاده از روش [۱۳] صورت گرفت که مقدار آن برای همه آزمایشات کمتر از ۱۰٪ بدست آمد. باید به این نکته توجه داشت که خواص فیزیکی مورد استفاده در روابط (۱۳) و (۲۵) برای مبرد R-۱۳۴a می باشد و برای کاربرد در مورد سایر گازها باید بررسی های جداگانه ای صورت پذیرد.



شکل ۱۱- مقایسه نتایج آزمایشگاهی لوله های دارای نوار پیچیده شده با رابطه بدست آمده (رابطه ۲۵)

نتیجه گیری

نتایج حاصل از این مطالعه عبارتند از:

- ۱- نصب نوار پیچیده شده در لوله ها باعث افزایش ضریب انتقال حرارت متوسط می شود. این افزایش بسته به شرایط آزمایش و نسبت پیچش نوار، حداکثر تا ۴۶٪ نسبت به لوله صاف مشابه می باشد.
- ۲- نسبت پیچش نوار، کیفیت بخار و سرعت جرمی بر ضریب انتقال حرارت چرخشی موثراند.
- ۳- هرچه نسبت پیچش نوار کوچکتر شود، ضریب انتقال حرارت افزایش بیشتری می یابد.
- ۴- داده های انتقال حرارتی لوله صاف حاصل از این مطالعه با روابط متعدد موجود مقایسه شد و مشخص شد که رابطه جانگر و وینترتون (۱۱) بهترین تطابق را با این داده ها دارد.
- ۵- بر اساس داده های تجربی این تحقیق، دو رابطه (۱۳) و (۲۵) برای تخمین ضریب انتقال حرارت در لوله های با نوار پیچیده شده بدست آمد. ضرایب انتقال حرارت محاسبه شده بوسیله این روابط در محدوده ۱۶٪ تا ۲۴٪+، و ۲۰٪± مقادیر تجربی می باشند.
- ۶- نوار پیچیده شده و اصولاً وسایلی که جریان چرخشی درون لوله ایجاد می کنند، در اواپراتور عملکرد بهتری نسبت به کندانسور دارند.

مراجع

- 1- Manglik, R.M. and Bergles, A.E. (1993). "Heat transfer and pressure drop correlations for twisted tape inserts in isothermal tubes: Part I-laminar flows." J. Heat Trans., T. ASME, Vol. 115, PP. 881-889.