

ارزیابی عملکرد نوارهای پیچیده شده داخل یک اواپراتور در افزایش انتقال حرارت جوششی و تأثیر آنها بر میزان افت فشار

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

گروه مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۱/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۲/۱۱)

چکیده

مطالعه حاضر به بررسی تجربی افزایش انتقال حرارت توسط نوارهای پیچیده شده داخل یک اواپراتور و تأثیر همزمان آنها بر میزان افزایش افت فشار جوششی مبرد R-134a می‌پردازد. هدف از این آزمایش رسیدن به بالاترین میزان انتقال حرارت و کمترین میزان افت فشار به طور همزمان است. دستگاه مورد استفاده در این بررسی سیستم تبرید تراکمی بخار مجهز به کلیه وسایل اندازه‌گیری مورد نیاز، مانند ترمو کوپل، فشار سنج و دستگاه اندازه‌گیری افت فشار، می‌باشد. این سیستم شامل سه اواپراتور گرم شونده با هیتر الکتریکی است که به ترتیب اواپراتور اولیه، تست اواپراتور و اواپراتور ثانویه نامیده می‌شوند. در این مطالعه، داده‌های تجربی برای لوله‌های صاف و لوله‌های با نوار پیچیده شده با چهار نسبت پیچش متفاوت (۶، ۹، ۱۲ و ۱۵) جمع‌آوری گردید. پس از جمع‌آوری کلیه داده‌ها و بررسی آن‌ها مشاهده شد که نوارهای پیچیده شده از داخل در بهترین حالت (نسبت پیچش ۶) میزان انتقال حرارت را تا ۶۸٪ افزایش داده و میزان افت فشار را نیز در بدترین حالت (نسبت پیچش ۶) تا ۱۸۰٪ افزایش می‌دهند. همچنین، مشاهده شد که بین نوارهای با نسبت پیچش‌های مختلف، نوار با نسبت پیچش ۱۲ در سرعت‌های جرمی پایین و نوار با نسبت پیچش ۹ در سرعت‌های جرمی بالا عملکرد بهتری نسبت به دیگر نوارها دارد.

کلید واژه‌ها: افت فشار، انتقال حرارت، نوار پیچی داخل لوله‌ها، اواپراتور، مبرد R-134a

Performance Evaluation of Twisted Tape Inserts inside an Evaporator on Flow Boiling Heat Transfer Enhancement and their Effect on Pressure Drop

M. Jamali-Ashtiani, A. Mohammadpour, and M.A. Akhavan-Behabadi

Mech. Eng. Group, School of Eng., Univ. of Tehran

ABSTRACT

In the present study, experimental investigations on flow boiling heat transfer enhancement (using twisted tape inserts inside an evaporator) and on its simultaneous effect on pressure drop were carried out. The main goal of this research was to obtain the maximum heat transfer enhancement with the least increase in pressure drop. The experimental set-up used was a well instrumented vapor compression refrigeration cycle. This set-up consisted of a test-evaporator as well. In addition, there were a pre-evaporator and an after-evaporator to achieve the required vapor quality. Refrigerant R-134a was electrically heated by the coil around it. The experimental investigation was carried out for a plain tube and for four twisted tapes inserted tubes with different twist ratios of 6, 9, 12, and 15. The results showed that the twisted tapes, in the best condition (twist ratio of 6), enhanced the heat transfer coefficient up to 68%, and in the worst condition (again twist ratio of 6), increased the pressure drop up to 180% above the plain tube values on a nominal area basis. Also, it was observed that among the tapes with different twist ratios, the tape with twist ratio of 12 in low mass velocities and the tape with twist ratio of 9 in high mass velocities, had the best performances.

Key Words: Pressure Drop, Heat Transfer, Twisted Tape Inserts, Evaporator, Refrigerant R-134a.

۱-دانشیار(نویسنده پاسخگو): akhavan@ut.ac.ir

۲-کارشناس ارشد

۳-کارشناس ارشد

۱- مقدمه

و مؤثر در افزایش انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی است. البته برای طراحی بهینه مبدل‌های حرارتی مجهز به نوار پیچیده شده، نیاز به داده‌های توأم انتقال حرارت و افت فشار در جریان دو فازی مبردهای مختلف است [۲].

رید و همکارانش [۳] آزمایش‌هایی را برای مقایسه پتانسیل سه روش مختلف افزایش انتقال حرارت در جوشش درون لوله ای مبرد R-113 صورت دادند: لوله‌های با فین بلند، لوله‌های با فین کوتاه، و لوله‌های مجهز به نوار پیچیده شده. لوله‌های با فین داخلی بین ۸۰٪-۱۰٪ و لوله‌های مجهز به نوار پیچیده حدود ۵۰٪ ضریب انتقال حرارت را نسبت به لوله صاف افزایش می‌دادند. آگروال و همکارانش [۴]، تحقیقاتی تجربی را در مورد میزان افزایش ضریب انتقال حرارت توسط نوار پیچیده شده در اواپراتور افقی با مبرد R-12 انجام دادند و افزایش متوسط ضریب انتقال حرارت را بین ۱۳۳٪-۲۷٪ گزارش کردند.

-افت فشار

بالات و همکارش [۵] براساس داده‌های آزمایشگاهی روی آب و مبرد R-11 در جوشش داخل لوله‌های دارای نوار پیچیده شده، رابطه‌ای به شکل زیر ارائه کردند:

$$\frac{\Delta P_s}{\Delta P_p} = \frac{C}{Y^n} \quad (1)$$

که در آن، ΔP_p افت فشار کل لوله صاف و ΔP_s افت فشار کل لوله با نوار پیچیده شده است. گام نوار پیچیده شده برای یک چرخش 180° با H نشان داده شده است. نسبت پیچش^۴ به صورت نسبت گام نوار به قطر داخلی لوله تعریف می‌شود (Y). ثابت‌های C و n نیز با توجه به داده‌های آزمایشگاهی تعیین می‌شوند.

آگروال و همکارانش [۶] نیز براساس داده‌های آزمایشگاهی مبرد R-12 در جوشش داخل لوله‌های دارای نوار پیچیده شده، رابطه‌ای به همان شکل برای پیشگویی داده‌های آزمایشگاهی‌شان انتخاب کردند و افزایش متوسط افت فشار را بین ۱۴۰٪-۳۵٪ گزارش کردند.

با توجه به از رده خارج شدن مبردهای CFCs که مخرب لایه اوزون هستند و نقش مهمی که مبرد جدید R-134a به عنوان یکی از مبردهای جایگزین پیدا نموده

داشتن یک اواپراتور با عملکرد مطلوب به معنی ماکزیمم انتقال حرارت در افت فشار بهینه است. این امر ضرورت اصلی در طراحی یک اواپراتور و به طور کلی مبدل‌های حرارتی است. با توجه به محدودیت منابع انرژی و نیاز به صرفه‌جویی در مصرف آن و با عنایت به کاربرد فراوان اواپراتورها در صنایع تهویه مطبوع، تبرید، سردخانه و ...، نقش عملکرد مطلوب یک اواپراتور در یک سیستم از ضرورت‌های غیرقابل صرف‌نظر در طراحی آن است.

به منظور افزایش میزان انتقال حرارت در صنعت از روش‌های فعال و غیرفعال^۱ مختلفی استفاده می‌شود. استفاده از روش‌های غیرفعال به ویژه نوار پیچیده شده^۲ به دلیل هزینه پایین و همچنین سهولت نصب و جایگزینی آن‌ها در داخل لوله، قابل توجه است. مطالعه حاضر روی مبرد R-134a صورت گرفت زیرا پتانسیل تخریب لایه ازن (ODP)^۳ این گاز صفر بوده و به همین دلیل استفاده از آن رو به افزایش است.

۲- تاریخچه استفاده از نوارهای پیچیده شده در

جریان جوششی

- انتقال حرارت

سابقه استفاده از نوار پیچیده شده برای افزایش انتقال حرارت به قرن نوزدهم برمی‌گردد. از این نوارهای پیچیده شده در بویلرهای بخار برای کاهش مصرف زغال‌سنگ استفاده می‌شد. از همان زمان تحقیقات روی عملکرد آن آغاز شده و در تحقیقاتی که در ایستگاه راه‌آهن فیلادلفیا صورت گرفت، وایتهم [۱] نشان داد که استفاده از این نوار باعث ۱۸/۴٪ صرفه‌جویی در مصرف سوخت زغال سنگ در بویلر افقی می‌شود.

در حال حاضر، تحقیقات کمی در زمینه استفاده از نوار پیچیده شده در جریان‌های دو فاز صورت گرفته است. از سوی دیگر، تحقیق در زمینه استفاده از مبردهای جایگزین در لوله‌های مجهز به نوار پیچیده شده بسیار نادر است. با وجود این، اکنون جوامع علمی به این باور رسیده‌اند که استفاده از نوار پیچیده شده راهی بسیار ارزان

1- Active and Passive Techniques

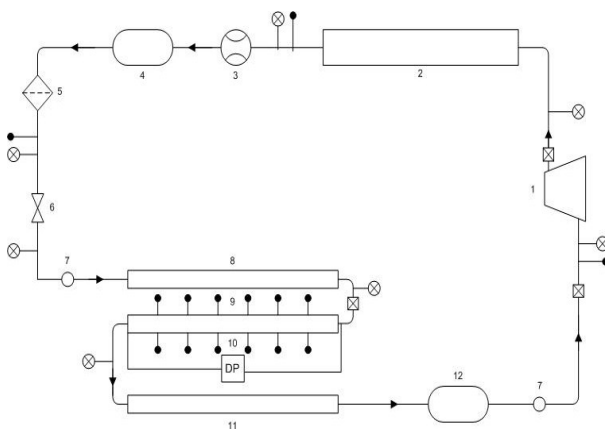
2- Twisted Tape

3- Ozone Depletion Potential

4- Twist Ratio

ترموکوپل‌های استفاده شده از نوع سری T بوده که با دقت 0.1°C کالیبره شده‌اند، فشار سنجه‌ها نیز با دقت kPa ۲ کالیبره گردیده‌اند. برای اندازه‌گیری افت فشار جریان عبوری از تست اوپراتور، از یک دستگاه اندازه‌گیری اختلاف فشار که قادر به اندازه‌گیری اختلاف فشار تا 3bar بوده و برای ۰ تا 150kPa توسط شرکت سازنده کالیبره گردیده است استفاده شد.

نوار پیچیده شده از جنس فولاد زنگ نزن با ضخامت 0.41mm و پهنای $7/3\text{mm}$ (کمی کمتر از قطر داخلی لوله) است. در این مطالعه نوارهای پیچیده شده با چهار نسبت پیچش متفاوت ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ مورد بررسی قرار گرفته‌اند، در شکل ۳ پارامترهای مشخصه لوله با نوار پیچیده شده نشان داده شده است.



- | | |
|----------------------|---------------------------------|
| ۱- کمپرسور | ۷- شیشه رؤیت |
| ۲- کندانسور | ۸- اوپراتور اولیه |
| ۳- دبی سنج | ۹- تست اوپراتور |
| ۴- دریافت کننده مایع | ۱۰- دستگاه اندازه‌گیری افت فشار |
| ۵- فیلتر درایر | ۱۱- اوپراتور ثانویه |
| ۶- شیر انبساط | ۱۲- جمع کننده مایع |
| فشار سنج | ترموکوپل |
| جهت جریان | شیر قطع و وصل |

شکل (۱): نمای شماتیک دستگاه آزمایشگاهی.

است، در تحقیق حاضر به بررسی تجربی افزایش انتقال حرارت و افت فشار R-134a با استفاده از نوار پیچیده شده در اوپراتور پرداخته می‌شود.

-شرح دستگاه آزمایش

سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده یک سیکل تبرید تراکمی بخار مجهز به کلیه وسایل اندازه‌گیری مورد نیاز است. در شکل ۱ نمای شماتیک و در شکل ۲ نمای سه بعدی این دستگاه نشان داده شده است.

اوپراتور مورد آزمایش (تست اوپراتور) شامل یک لوله مسی به قطر داخلی $7/5\text{mm}$ و طول 1260mm است. گرمای مورد نیاز تست اوپراتور توسط یک هیتر الکتریکی که به طور یکنواخت دور لوله مسی پیچیده شده است (شار ثابت) تأمین می‌گردد. مقدار توان مطلوب هیتر الکتریکی توسط دیمر صنعتی 2kW تنظیم می‌شود.

از آنجا که طول لوله مورد آزمایش محدود است، دامنه کمی از تغییرات کیفیت بخار در تست اوپراتور قابل حصول است. بنابراین به منظور پوشش دادن کل دامنه جوشش، سیستم به گونه‌ای طراحی شده، که کیفیت‌های متفاوت بخار، در ورود به تست اوپراتور قابل دستیابی باشد، این کار با نصب یک اوپراتور اولیه پیش از تست اوپراتور محقق شده و با تغییر ولتاژ ورودی به هیتر الکتریکی روی اوپراتور اولیه می‌توان کیفیت بخار را در ورود به تست اوپراتور تنظیم کرد. برای سوپر هیت کردن مبرد و جلوگیری از ورود مایع به کمپرسور از اوپراتور ثانویه و یک جمع کننده مایع استفاده شده است. برای جلوگیری از اتلاف حرارت المنت‌ها به محیط، مجموعه هر اوپراتور و المنت مربوطه به طور کامل عایق شده است. با وجود این، مقدار کمی از حرارت المنت‌ها به محیط انتقال می‌یابد که این مقدار به صورت زیر محاسبه گردیده و در محاسبات تأثیر داده شده است:

$$\eta = \frac{Q_{\text{موردنیاز}}}{Q_{\text{المنت}}} \quad (2)$$

که در آن، میزان η در کل آزمایش‌ها بین 0.9 تا 0.95 است.

عدد رینولدز مایع: ۱۲۵۰-۳۵۰۰

عدد رینولدز بخار: ۴۱۰۰۰-۹۶۰۰۰

نسبت پیچش $Y = \frac{H}{D}$: ۶-۱۵

برای محاسبه درجه حرارت اشباع و انتالپی‌های اشباع و سوپر هیت R-134a از [۷] و سایر خواص از جمله ویسکوزیته از [۸] استفاده شده است.

کیفیت بخار ورودی به اواپراتور اولیه با مساوی قرار دادن انتالپی دو سر شیر سوزنی، به دست می‌آید. به منظور محاسبه کیفیت بخار در ورودی و خروجی تست اواپراتور از موازنه حرارتی استفاده می‌شود.

کیفیت بخار متوسط در تست اواپراتور نیز به صورت میانگین کیفیت بخار ورودی و خروجی از آن محاسبه می‌شود. ضریب انتقال حرارت در تست اواپراتور از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{h} = \left[\frac{\pi d_i L (t_{wo} - t_s)}{VI} - \frac{d_i}{2k_w} \ln \left(\frac{d_o}{d_i} \right) \right]^{-1}, \quad (3)$$

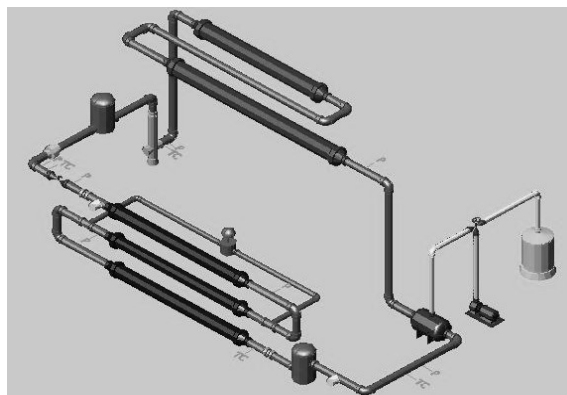
که در آن، \bar{h} ضریب انتقال حرارت متوسط، d_o و d_i به ترتیب قطرهای داخلی و خارجی لوله مسی، L طول تست اواپراتور، t_s درجه حرارت اشباع مبرد، t_{wo} متوسط دمای سطح خارجی دیواره لوله در شش مقطع، k_w ضریب هدایت حرارتی دیواره لوله، V ولتاژ دو سر المنت الکتریکی و I جریان عبوری از آن است.

۴- افزایش انتقال حرارت جوششی در جریان چرخشی

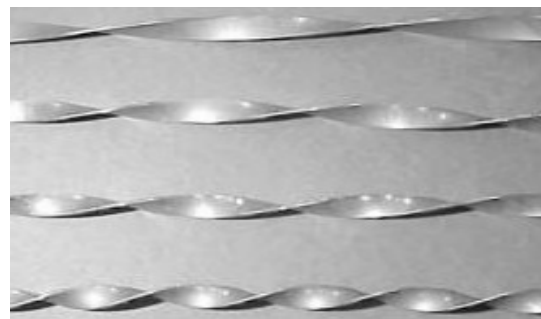
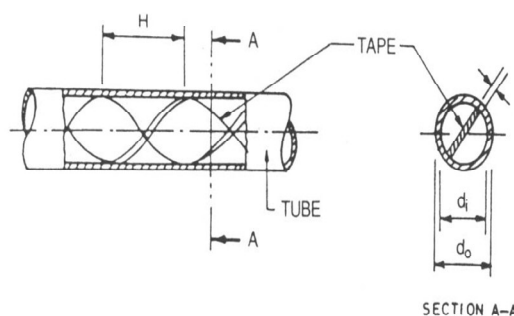
قبل از بررسی نتایج، لازم است نکاتی در مورد نوار پیچیده شده که عملاً جریان چرخشی ایجاد می‌کند ذکر شود:

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

- ۱- طول موثر خط جریان و سرعت آن در جریان‌های پیچشی بیشتر از جریان مشابه در لوله صاف است. این قضیه از دو نظر بر ضریب انتقال حرارت تأثیر می‌گذارد، بالا بردن آشفستگی در انتقال حرارت جابه‌جایی و سرعت بیشتر مماسی در نزدیک دیواره،



شکل (۲): نمای سه بعدی دستگاه آزمایشگاهی.



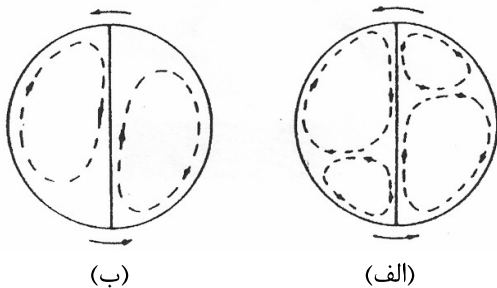
شکل (۳): پارامترهای مشخصه لوله با نوار پیچیده شده.

۳- جمع‌آوری و آنالیز داده‌ها

مجموعاً ۱۶۰ آزمایش مختلف با چهار سرعت جرمی متفاوت $0.136, 0.114, 0.085$ و $0.054 \text{ kg/m}^2\text{s}$ برای لوله صاف و لوله‌های دارای نوار پیچیده شده صورت گرفت. حدود تغییرات پارامترهای کاری به صورت زیر می‌باشند:

R-134a	سیال:
0.054 تا $0.136 \text{ kg/m}^2\text{s}$	سرعت جرمی مبرد:
19°C تا 3°C	درجه حرارت جوشش متوسط:
0.019 تا 0.02	کیفیت بخار ورودی به تست اواپراتور:
0.1 تا 0.3	کیفیت بخار خروجی از تست اواپراتور:
1800 تا 5300 W/m^2	شار حرارتی:

هدایت می‌شود. پس رفتار انتقال حرارت برای لوله با نوار پیچیده شده و لوله صاف تقریباً مشابه است [۱۰].



شکل (۴): الگوهای جریان ثانویه [۹].

۵- ارائه نتایج و بحث و بررسی

پس از انجام آزمایش‌ها، نتایج را بصورت زیر می‌توان جمع‌بندی نمود:

- نتایج انتقال حرارت

در شکل‌های ۸-۵، ضرایب انتقال حرارت به دست آمده برای لوله صاف و لوله‌های با نوار پیچیده شده بر حسب کیفیت بخار ترسیم شده‌اند. هر کدام از این شکل‌ها برای یک سرعت جرمی بخصوص می‌باشد. با مشاهده و بررسی شکل‌های ۸-۵ موارد زیر نتیجه می‌شود:

ضریب انتقال حرارت با افزایش کیفیت بخار افزایش می‌یابد. این پدیده بدین سبب است که در کیفیت بخار بالا لایه مایع روی دیواره داخلی لوله، نازکتر بوده و باعث مقاومت حرارتی کمتری می‌شود.

ضریب انتقال حرارت با افزایش سرعت جرمی بخار، زیاد می‌شود. این مسأله براساس آثار جابه‌جایی بزرگتر در سرعت جرمی بالاتر توجیه می‌شود. در جوشش جابه‌جایی زمانی که سرعت سیال افزایش می‌یابد، گرمای دیواره لوله سریعتر توسط سیال گرفته می‌شود و در نتیجه انتقال حرارت افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر سرعت بالا، عدد رینولدز بالا می‌دهد، بنابراین مانند جابه‌جایی اجباری تک فاز، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. در حقیقت، سرعت جرمی بخار بالاتر، باعث آشفستگی بیشتر در فیلم مایع می‌گردد و در نتیجه موجب افزایش میزان جوشش می‌شود. افزایش سرعت جرمی باعث تغییر الگوی جریان از جدانشونده موجی به حلقوی می‌شود، که این نیز خود باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می‌گردد.

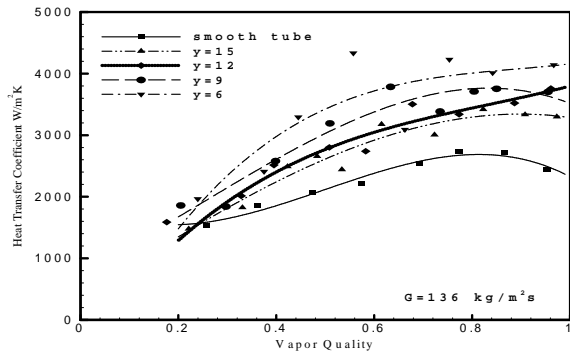
۲- حرکت چرخشی باعث ایجاد میدان شتاب جانب مرکز، درون لوله می‌شود. برای جریان‌های چرخشی دو فاز که جوشش در دیواره لوله اتفاق می‌افتد، حباب‌های تشکیل شده در سطح داغ لوله به وسیله مایع چرخشی به طور سریع احاطه می‌شوند. به علت اختلاف چگالی بین مایع و بخار، نیروی جانب مرکز بیشتری به مایع نسبت به حباب‌ها وارد می‌شود. بنابراین حباب‌ها به سرعت از دیواره به سمت مرکز لوله منتقل شده و مایع جایگزین آنها می‌شود.

۳- اثر فینی نوار باعث افزایش سطح انتقال حرارت می‌شود، زیرا رسانش گرما به نوار نیز صورت می‌گیرد. این مسئله تابعی از سطح تماس بین نوار و لوله، جنس نوار، مشخصات جریان و اندازه‌های نوار و لوله است. 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 می‌شود. ایجاد مانع در مسیر جریان در لوله صاف مقطع جریان را کاهش داده و لذا باعث افزایش سرعت می‌شود. استفاده از نوار، محیط تر شده مسیر جریان را نیز افزایش می‌دهد و

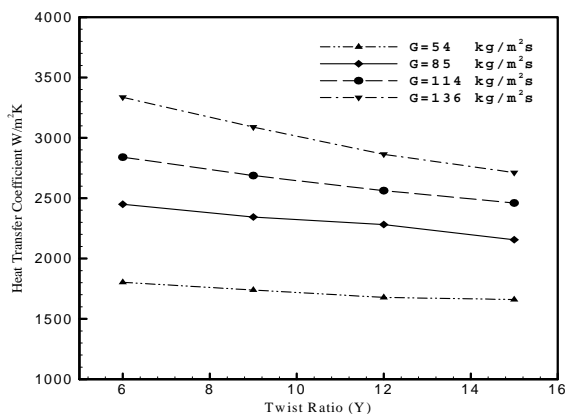
۵- ایجاد جریان ثانویه، اختلاط را در اثر حرکت پیچشی افزایش می‌دهد. اضافه شدن یک نیروی جانب مرکز بر امتداد جریان مستقیم باعث ایجاد جریان چرخشی در دو سوی مانع موجود در جریان می‌گردد. مسیره‌های این جریان ثانویه برای دو مشخصات مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است [۹]. این مسیره‌های جریان در جریان تک فاز وجود دارند، گرچه تأثیر مشابهی نیز احتمالاً در جریان همراه با جوشش خواهند داشت. اولین نوع این جریان‌های ثانویه که شامل یک جریان پیچشی ساده در دو طرف نوار است، در اعداد رینولدز کم جریان یا نسبت پیچش بزرگ رخ می‌دهد. 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 است.

(ب) نوار پیچیده شده مانند دیگر وسایل افزایشی از جمله دنده، زبری و... جریان را به هم نمی‌زند. جریان در یک مقطع صاف است و به وسیله یک سطح با هندسه صاف

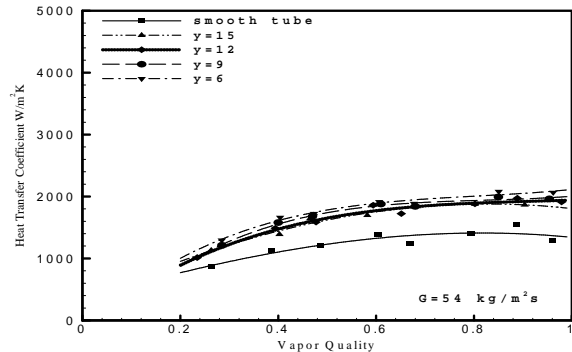


شکل (۸): مقایسه مقادیر آزمایشگاهی ضرایب انتقال حرارت لوله صاف و لوله‌های با نوار پیچیده شده در سرعت جرمی $136 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

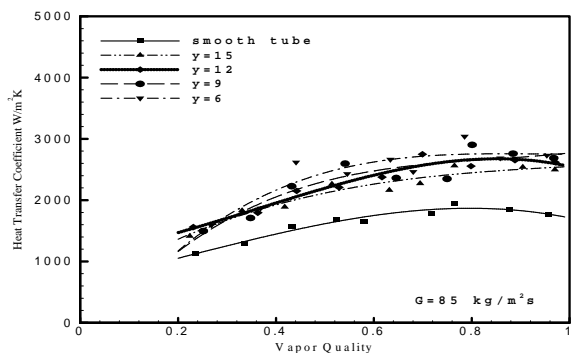
هر چه گام پیچش کوچکتر شود، ضریب انتقال حرارت بیشتر افزایش می‌یابد. در واقع با کاهش گام پیچش: طول موثر خط جریان، سرعت مماسی در نزدیک دیواره، نیروهای ناشی از شتاب جانب مرکز و حرکت ثانویه جریان افزایش و در نتیجه ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. در شکل ۹ نحوه تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط با نسبت پیچش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



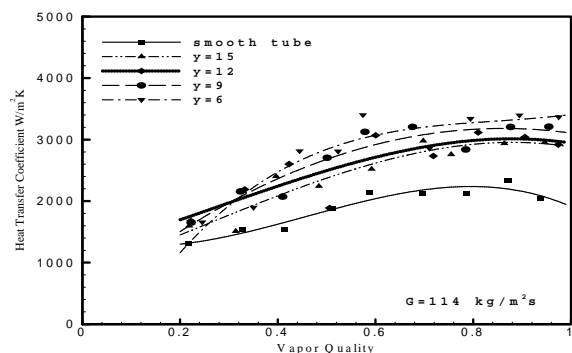
شکل (۹): تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط با نسبت پیچش نوار در سرعت‌های جرمی مختلف.



شکل (۵): مقایسه مقادیر آزمایشگاهی ضرایب انتقال حرارت لوله صاف و لوله‌های با نوار پیچیده شده در سرعت جرمی $54 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

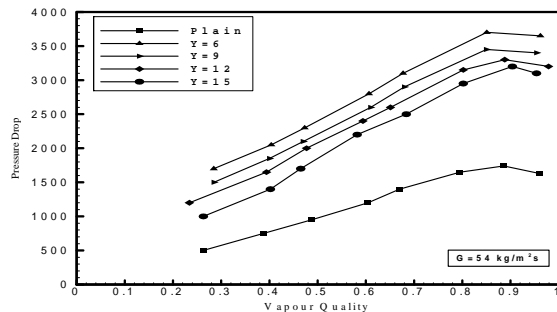


شکل (۶): مقایسه مقادیر آزمایشگاهی ضرایب انتقال حرارت لوله صاف و لوله‌های با نوار پیچیده شده در سرعت جرمی $85 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

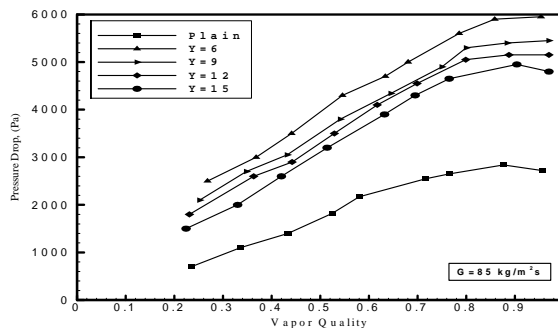


شکل (۷): مقایسه مقادیر آزمایشگاهی ضرایب انتقال حرارت لوله صاف و لوله‌های با نوار پیچیده شده در سرعت جرمی $114 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

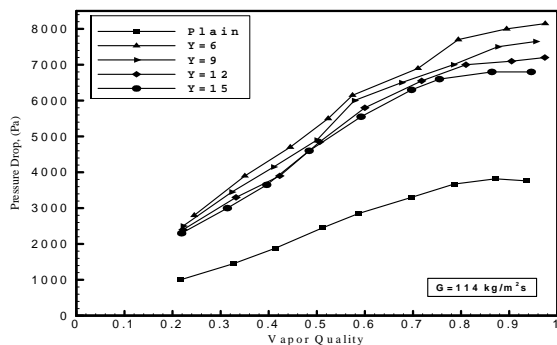
به لوله صاف مشابه افزایش یافته، این میزان افزایش در نسبت‌های پیچش کوچکتر، بیشتر است.



شکل (۱۱): مقایسه افت فشار لوله‌های با نوار پیچیده شده و لوله صاف در سرعت جرمی $54 \text{ kg/m}^2\text{s}$.



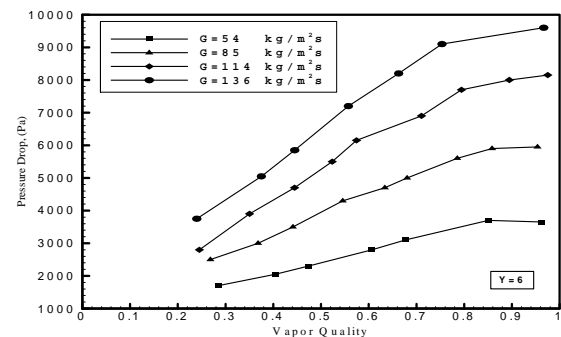
شکل (۱۲): مقایسه افت فشار لوله‌های با نوار پیچیده شده و لوله صاف در سرعت جرمی $85 \text{ kg/m}^2\text{s}$.



شکل (۱۳): مقایسه افت فشار لوله‌های با نوار پیچیده شده و لوله صاف در سرعت جرمی $114 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

نتایج افت فشار

در شکل ۱۰ نحوه تغییرات میزان افت فشار با کیفیت بخار در سرعت‌های جرمی مختلف برای نوار با نسبت پیچش ۶ نمایش داده شده است. شکل ۱۰ عموماً نشان دهنده این موضوع است که اگر سایر شرایط بدون تغییر باقی بماند، افت فشار با افزایش سرعت جرمی، زیاد می‌شود. این امر را می‌توان با توجه به رابطه مستقیمی که بین افزایش سرعت جرمی با افزایش تنش برشی و در نتیجه افزایش افت فشار وجود دارد، قابل توجیه است. از طرفی با توجه به شکل ۱۰ می‌توان افزایش افت فشار در مقابل افزایش کیفیت بخار را ملاحظه کرد. علت این امر را نیز بدین گونه تشریح کرد که با افزایش میزان کیفیت بخار، مقدار دانسیته کاهش یافته و طبق رابطه بقای جرم باعث افزایش سرعت جریان و در نتیجه افزایش تنش برشی بین سیال و دیواره لوله می‌شود.



شکل (۱۰): تغییرات افت فشار با کیفیت بخار برای لوله با نوار پیچیده شده با نسبت پیچش ۶ و در سرعت‌های جرمی مختلف.

در شکل‌های ۱۱-۱۴ نحوه تغییرات افت فشار با کیفیت بخار برای لوله صاف و لوله‌های با نوارهای با نسبت پیچش‌های مختلف در سرعت‌های جرمی متفاوت نشان داده شده است. از بررسی شکل‌های ۱۱-۱۴ می‌توان نتیجه گرفت که به طور کلی نصب نوار پیچیده شده در داخل لوله‌های افقی، افت فشار را به اندازه زیادی نسبت به لوله صاف افزایش می‌دهد.

با توجه به شکل‌های ۱۱-۱۴ نتیجه می‌شود زمانی که نوار پیچیده شده داخل اواپراتور قرار می‌گیرد، افت فشار نسبت

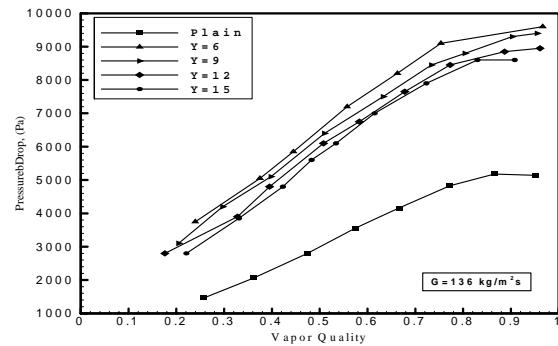
می‌دهد. بیشترین مقدار میانگین تغییرات نسبت ضرایب انتقال حرارت لوله با نوار پیچیده شده به لوله صاف، h_s/h_p برابر $1/46$ است که در گام ۶ و سرعت‌های جرمی kg/m^2s ۱۱۴ و ۸۵ روی می‌دهد. وارد کردن نوار پیچیده شده به داخل لوله صاف، افت فشار را نیز افزایش می‌دهد. در بدترین حالت افت فشار جوششی تا 180% و به طور متوسط تا 100% نسبت به افت فشار لوله صاف مشابه افزایش می‌یابد. حال باید دید که استفاده از نوارهای پیچیده شده با مقدار افزایش ضریب انتقال حرارت ذکر شده، در مقابل تولید این مقدار افت فشار به صرفه است یا خیر.

به علت اینکه ضریب انتقال حرارت و افت فشار با وجود تأثیرگذاری روی یکدیگر، دو عامل مستقل بوده که توسط رابطه‌ای خاص به یکدیگر مرتبط نمی‌شوند، مقایسه دو حالت مختلف مثلاً دو نسبت پیچش متفاوت با مشکل روبه‌رو می‌شود. بنابراین باید عامل سومی را در نظر گرفت که با هر دو، رابطه داشته و بتواند شرایط قیاس برای این دو عامل را برآورده سازد. این عامل سوم می‌تواند نسبت توان مصرفی کمپرسور در طول تست اوپراتور به ضریب انتقال حرارت $\left(\frac{HP}{h}\right)$ یا نسبت توان مصرفی کمپرسور در طول تست اوپراتور به گرمای مبادله شده از طریق تست اوپراتور $\left(\frac{HP}{Q}\right)$ باشد. علت این است که میزان افزایش افت فشار رابطه مستقیمی با میزان توان مصرفی در کمپرسور خواهد داشت.

در ارزیابی عملکرد مبرد R-12 در انتقال حرارت جوششی داخل لوله‌های افقی، آگراوال و همکارانش [۱۱] از نسبت توان پمپاژ^۱ به نرخ افزایش انتقال حرارت به عنوان یک شاخص ارزیابی استفاده کردند. آنها مقدار توان افزایش یافته پمپ که به علت حضور نوار در تست اوپراتور ایجاد می‌شود، از حاصل ضرب دبی حجمی و افت فشار ایجاد شده در تست اوپراتور به صورت زیر محاسبه کردند:

$$HP = \dot{V} \Delta P, \quad (4)$$

که در آن، HP مقدار توان افزایش یافته پمپ به علت حضور نوار در تست اوپراتور، \dot{V} دبی حجمی مبرد و ΔP میزان افت فشار مشاهده شده در تست اوپراتور است.

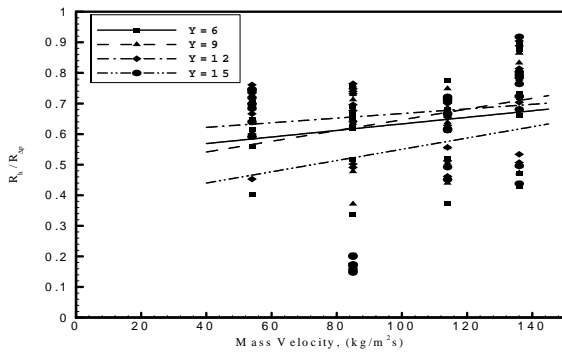


شکل (۱۴): مقایسه افت فشار لوله‌های با نوار پیچیده شده و لوله صاف در سرعت جرمی kg/m^2s ۱۳۶.

از شکل‌های ۱۴-۱۱ که هرکدام برای سرعت جرمی خاصی رسم شده، می‌توان دریافت که با کاهش نسبت پیچش، افت فشار افزایش می‌یابد. می‌توان علت آن را بدین صورت بیان کرد که هر چه نسبت پیچش کوچکتر باشد، میزان آشفستگی و چرخش القاء شده در لایه مایع و هسته بخار افزایش یافته، در نتیجه باعث افزایش افت فشار می‌شود. یکی از دلایل استفاده از نوار این است که وجود نوار در لوله موجب می‌شود که پدیده خشک‌شدگی جزئی به تعویق افتاده و در نتیجه باعث افزایش میزان انتقال حرارت شود. این امر به خوبی در شکل‌های ۱۴-۱۱ مشخص است. در سرعت‌های جرمی پایین به علت سرعت کم سیال مقدار نیروی گرانشی از جانب مرکز بیشتر بوده و این امر اتفاق نمی‌افتد. ولی در سرعت‌های جرمی بالا وجود نوار باعث می‌شود که خشک‌شدگی جزئی به تعویق افتاده و در نتیجه میزان انتقال حرارت و افت فشار در لوله افزایش یابد (خشک‌شدگی جزئی در محلی روی می‌دهد که ضخامت لایه مایع بسیار کم و کل مایع بخار می‌شود، در این حالت سطح داخلی لوله به جای مایع با بخار پوشیده می‌شود و در نتیجه ضریب انتقال حرارت به شدت کاهش می‌یابد).

۶- ارزیابی عملکرد نوارهای پیچیده شده

پس از تحلیل کلیه داده‌های فوق مشاهده شد که: بهترین لوله با نوار پیچیده شده با نسبت پیچش ۶ (کمترین نسبت پیچش) در ناحیه با کیفیت بخار بالا ضریب انتقال حرارت را در نقاطی تا 68% نسبت به لوله صاف افزایش



شکل (۱۵): نمودار عملکرد نوارهای پیچیده شده.

در شکل ۱۵ نمودار عملکردی نوارهای پیچیده شده نمایش

داده می‌شود. این نمودار مقادیر $\frac{R_h}{R_{\Delta p}}$ را در مقابل سرعت

جرمی مبرد برای نسبت های پیچش متفاوت نمایش می-دهد. همان طور که در این شکل نشان داده شده است،

نسبت $\frac{R_h}{R_{\Delta p}}$ بین ۰/۱۴ تا ۰/۹۱ تغییر می‌کند، که همان

طور که توضیح داده شد مطلوب نیست.

بین نوارهای با نسبت پیچش‌های مختلف، نوار با نسبت پیچش ۱۲ در سرعت‌های جرمی پایین و نوار با نسبت پیچش ۹ در سرعت‌های جرمی بالاتر عملکرد بهتری نسبت به دیگر نوارها دارند. البته روند بهبود عملکرد نوارهای پیچیده شده، از سرعت‌های جرمی پایین به سرعت‌های جرمی بالا در نسبت‌های پیچش ۶، ۹ و ۱۲ تقریباً یکسان است. با مقایسه نوار با نسبت پیچش ۱۵ با سه نسبت پیچش دیگر اشاره شده، مشاهده می‌شود که این نوار دارای عملکرد ضعیف‌تری است.

۷- نتیجه گیری

در این تحقیق افزایش انتقال حرارت توسط نوارهای پیچیده شده در داخل اواپراتور و تأثیر هم‌زمان آن بر میزان افزایش افت فشار جوششی (عملکرد نوارهای پیچیده شده) مبرد R-134a به طور تجربی و آزمایشگاهی بررسی شده است. از مطالعه فوق نتایج زیر حاصل شد:

۱- وارد کردن نوار پیچیده شده داخل لوله در حالی که در بهترین حالت (نسبت پیچش ۶) ضرایب انتقال حرارت را حدود ۶۸٪ نسبت به لوله صاف افزایش می‌دهد، در بدترین

در نهایت، آنها نموداری براساس این شاخص برای لوله‌های مختلف تهیه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که نسبت توان مصرفی پمپ در طول تست اواپراتور به ضریب انتقال حرارت لوله‌های با نوار پیچیده شده $\left[\frac{HP}{h}\right]_{TT}$ بزرگتر از مقدار متناظر آن برای لوله

صاف $\left[\frac{HP}{h}\right]_{Smooth}$ است، یعنی در حالت کلی استفاده از

نوار پیچیده شده به صرفه نیست. اما برای کاربردهای معین و خاص براساس سازش میان بهبود انتقال حرارت و تاوان انرژی حاصل از افزایش افت فشار می‌توان از لوله‌های مجهز به سطوح افزایش یافته به جای لوله صاف استفاده کرد. در اینجا ابتدا نسبت توان مصرفی کمپرسور در طول تست اواپراتور به ضریب انتقال حرارت لوله صاف

را $\left[\frac{HP}{h}\right]_{Smooth}$ محاسبه کرده و سپس میزان توان

مصرفی کمپرسور در طول تست اواپراتور به ضریب انتقال

حرارت مربوط به لوله با نوار پیچیده شده $\left[\frac{HP}{h}\right]_{TT}$

محاسبه می‌شود.

توان مصرفی کمپرسور در طول تست اواپراتور از رابطه ۴ محاسبه می‌شود. در نهایت نسبت اول به نسبت دوم تقسیم می‌شود (رابطه ۵). در صورتی که این

مقدار $\frac{R_h}{R_{\Delta p}}$ ، بزرگتر از ۱ باشد، استفاده از نوارهای پیچیده

شده کاملاً به صرفه است. در غیر این صورت همان طوری که توسط آگراوال و همکارانش توصیه شده بود، تنها تحت شرایط خاص و برای کاربردهای معین با در نظر گرفتن سازش مناسب میان بهبود انتقال حرارت و میزان تاوان انرژی حاصل از افت فشار می‌توان از نوارهای پیچیده شده استفاده کرد.

$$\frac{\left(\frac{\dot{V}\Delta P_{Test}}{h}\right)_{smooth}}{\left(\frac{\dot{V}\Delta P_{Test}}{h}\right)_{TT}} = \frac{\left(\frac{h_{TT}}{h_{smooth}}\right)}{\left(\frac{(\Delta P_{Test})_{TT}}{(\Delta P_{Test})_{smooth}}\right)} = \frac{R_h}{R_{\Delta p}} \quad (5)$$

- Heat Transfer, Vol. 104, No. 4, pp. 758-762, 1982.
7. Sonntag, R., Borgnakke, C., and Van Wylen, G. "Fundamentals of Thermodynamics.", John Wiley & Sons, New York, 1997.
 8. Collier, J. and Thome, J. "Convective Boiling and Condensation.", Oxford Univ. Press, Oxford, UK, 1994.
 9. Manglik, R.M. and Bergles, A.E. "Heat Transfer and Pressure Drop Correlations for Twisted Tape Inserts in Isothermal Tubes: Part I: Laminar Flows", ASME J. Heat Transfer, Vol. 115, No. 21, pp. 881-889, 1993.
 10. Shatto, D.P. and Peterson, G.P. "A Review of Flow Boiling Heat Transfer with Twisted Tape Inserts", J. Enhanced Heat Transfer, Vol.3, No. 4, pp. 233-257, 1996.
 11. Agrawal, K.N. and Varma, H.K., "Experimental Study of Heat Transfer Augmentation Versus Pumping Power in a Horizontal R-12 Evaporator", Int. J. Refrigeration, Vol. 14, No. 1 pp. 273-281, 1991.

حالت (نسبت پیچش ۶) افت فشار را در حدود ۱۸۰٪ نسبت به لوله صاف افزایش زیاد می‌کند،

۲- نسبت $\frac{R_h}{R_{\Delta p}}$ برای کلیه آزمایش‌ها کمتر از ۱ به دست

آمد، که نشان دهنده عملکرد نامطلوب نوار پیچیده شده است،

۳- بهترین عملکرد در سرعت‌های جرمی پایین مربوط به نوار با نسبت پیچش ۱۲ و در سرعت‌های جرمی بالاتر مربوط به نوار با نسبت پیچش ۹ است و

۴- در نهایت این نتیجه حاصل شد که استفاده از نوارهای پیچیده شده در حالت کلی به صرفه نیست و فقط در موارد خاص براساس سازش میان بهبود انتقال حرارت و تاوان انرژی حاصل از افزایش افت فشار، می‌توان از لوله‌های با نوار پیچیده شده به جای لوله صاف استفاده کرد.

مراجع

1. Whitham, J.M. "The Effect of Retarders in Fire Tubes of Steam Boilers", Street Railway J., Vol. 12, No. 6, pp. 374-380, 1896.
2. Kedzierski, M.A. and Kim, M.S. "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 & Eng. J., Vol. 6, No. 1, pp. 113-122, 1998.
3. Reid, R.S., Pate, M.B., and Bergles, A.E. "Comparison of Augmentation Techniques during in-Tube Evaporation of R-113", ASME J. Heat Transfer, Vol. 113, No. 2, pp. 451-458, 1991.
4. Agrawal, K. N., Varma, H.K., and Lal, S. "Heat Transfer during Forced Convection Boiling of R-12 under Swirl Flow", ASME J. Heat Transfer, Vol. 108, No. 2, pp. 567-573, 1986.
5. Blatt, T.A. and Adt., R.R. "The Effects of Twisted Tape Swirl Generators on the Heat Transfer Rate and Pressure Drop of Boiling Freon 11 and Water", ASME, Vol. 63, No. 1, pp. 63-71, 1963.
6. Agrawal, K.N., Varma, H.K., and Lal, S. "Pressure Drop during Forced Convection Boiling of R-12 Under Swirl Flow", ASME J.