

بررسی تجربی ضریب انتقال حرارت بطریقه جابجائی در جریان آرام تکفاز با استفاده از سیم پیچ

محمد علی اخوان بهابادی *

استاد یار گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

رضا عظیمی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۷۹/۶/۱۹، تاریخ تصویب ۸۰/۱۱/۳۰)

چکیده

در مقاله حاضر مطالعات آزمایشی روی افت فشار ایزوترمال و ضریب انتقال حرارت جابجائی روغن برای جریان آرام در لوله صاف و هفت لوله با سیم پیچ داخلی با قطر و گامهای مختلف انجام شده است. دستگاهی که در این بررسی مورد استفاده قرار گرفته است، در واقع یک سیکل روغن مجهز به کلیه وسائل اندازه گیری مورد نیاز می باشد. گرم کن (هیتر) این سیستم یک تبادل گر حرارتی دولوله ای با جریان مخالف می باشد که در لوله داخلی روغن توسط بخار جاری در پوسته گرم می شود. آنالیز و بررسی نتایج بدست آمده نشان می دهد که نصب سیم پیچ در داخل لوله (که کاملاً به جداره داخلی آن می چسبد) باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجائی بمیزان حداکثر 230% نسبت به مقدار مربوط به لوله های صاف می شود. براساس داده های تجربی جمع آوری شده در این تحقیق، رابطه ای برای محاسبه ضریب انتقال حرارت در گرمایش روغن در داخل لوله های مجهز به سیم پیچ داخلی بدست آورده می شود.

واژه های کلیدی: افزایش انتقال حرارت، گرمایش، تک فاز، سیم پیچ، رابطه تجربی، جریان آرام

مقدمه

انتقال حرارت جریان آرام در بسیاری از کاربردهای مهندسی وجود دارد و برای مایعات لزجی که گرم یا سرد می شوند از اهمیت ویژه ای برخوردار است. چونکه ضریب انتقال حرارت در این نوع جریانات معمولاً پائین می باشد روشی برای افزایش نرخ آن مورد نیاز است. بدین منظور از روشهای مختلف فعال و غیرفعال^۱ بمنظور افزایش نرخ انتقال حرارت استفاده می گردد. یکی از روشهای غیرفعال که معمولاً مورد توجه است استفاده از تجهیزات داخل لوله ای مانند نوار پیچیده شده^۲، شبکه سیم یا برس^۳ و سیم مارپیچ^۴ می باشد. این نوع وسائل دارای قیمت نسبتاً پائینی بوده و براحتی در داخل لوله ها قرار می گیرند، از اینرو بطور وسیعی در صنعت استفاده می شوند.

تجهیزات داخل لوله ای می تواند ترکیبی از یک یا چند حالت زیر، که برای افزایش انتقال حرارت مناسب می باشند را به همراه افزایش ضریب اصطکاک جریان بوجود آورند:

۱ - جلوگیری از توسعه لایه مرزی جریان و افزایش اغتشاش آن

۲ - افزایش سطح مؤثر انتقال حرارت (در صورتیکه تماس این نوع وسائل با دیواره لوله خوب باشد)

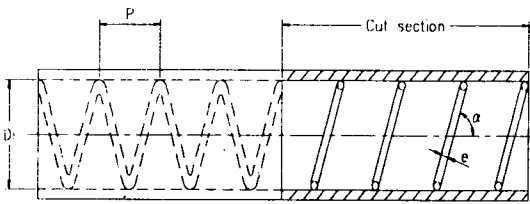
۳ - تولید جریان گردابه ای یا ثانویه

با توجه به اینکه رژیم بیشتر جریانات موجود در مبدلهای صنعتی مغشوش می باشد، تمام توجهات به افزایش نرخ ضریب انتقال حرارت این نوع جریان معطوف شده است. از اینرو مقالات کمی در زمینه افزایش انتقال حرارت در جریان آرام موجود می باشد [۱-۵]. با توجه به توضیحات فوق تحقیقات حاضر بمنظور جمع آوری داده های تجربی انتقال حرارت و اصطکاک برای گرمایش روغن در لوله های مجهز به سیم پیچ انجام گرفته است.

شرح دستگاه

دستگاه آزمایش یک سیکل روغن مجهز به کلیه وسائل اندازه گیری مورد لزوم می باشد که نقشه شماتیک آن در شکل (۱) نشان داده شده و شامل اجزاء زیر است: مخزن ذخیره روغن،

فیزیکی آن در جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل ۲: نقشه شماتیک لوله‌های مجهز به سیم پیچ داخلی.

جدول ۱: مشخصات روغن بهران حرارت.

Property	Temperature			
	30 °C	50 °C	70 °C	90 °C
Viscosity (Pa.S)	0.0379	0.0192	0.011	0.007
Sp. heat (KJ/Kg.K)	1925.65	1999.8	2074	2148.2
Thermal cond. (W/M.K)	0.1621	0.16	0.1585	0.1568
Density (Kg/M ³)	855.6	841.1	826.6	812.1

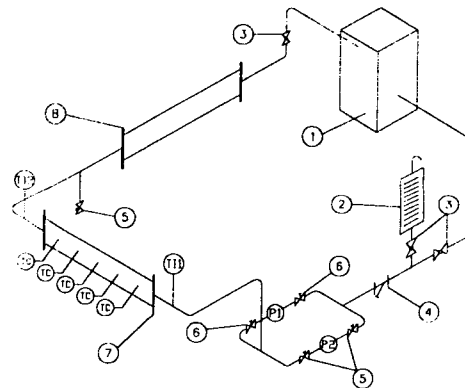
جدول ۲: مشخصات ابعادی لوله‌های مجهز به سیم پیچ.

Tube no.	D _i (mm)	D _o (mm)	e (mm)	p (mm)	D _h (mm)	L (mm)	α (degree)
0	26.04	28.58	0	∞	26.035	2000	
1	26.04	28.58	2	65	22.9553	2000	51.5257
2	26.04	28.58	2	47	22.2915	2000	60.1169
3	26.04	28.58	2	28	20.6625	2000	71.1022
4	26.04	28.58	2	12	16.3363	2000	81.6534
5	26.04	28.58	3.5	69	20.9418	2000	49.8487
6	26.04	28.58	3.5	49	19.9135	2000	59.0748
7	26.04	28.58	3.5	26	16.9602	2000	72.3655

روش آزمایش

بعد از طراحی و ساخت دستگاه آزمایش، کلیه وسایل اندازه‌گیری طبق روشهای استاندارد متداول کالیبره شده و

دبی‌سنج روغن، پمپهای انتقال روغن (چرخ دنده‌ای و سانتریفیوژ)، گرم‌کن روغن، کولر روغن، مانومتر L شکل جهت اندازه‌گیری افت فشار، ترموکوپلهایی به منظور اندازه‌گیری دمای سطح روغن و دماسنج هائی برای قرائت دمای ورود و خروج روغن. قسمت گرم کن روغن (واحد آزمایش) دستگاه یک تبادل گر حرارتی دو لوله‌ای جریان مخالف می‌باشد که یک لوله مسی به قطر خارجی ۱/۸ اینچ (قطر داخلی ۲۶/۰۳۵ میلی‌متر) لوله داخلی و یک ژاکت استیل به قطر ۶ پوخته آن را تشکیل می‌دهد. بمنظور کسب مقادیر متوسط دقیق تر، دمای سطح خارجی لوله مسی در ۱۰ نقطه توسط ترموکوپل قرائت می‌گردد. همچنین بمنظور کاهش افت حرارتی واحد آزمایش با محیط سطح خارجی آن کاملاً توسط پشم شیشه ایزوله شده است.



ITEM	DESCRIPTION	PRECISION	ITEM	DESCRIPTION	PRECISION
7	1ST SECTION	---	TC	THERMOCOUPLE (TYPE J)	1 °C
6	NEEDLE VALVE	---	TI2	OUTLET TEMP INDICATOR	1 °C
5	1/2" NEEDLE VALVE	---	TI1	INLET TEMP INDICATOR	1 °C
4	Y-TYPE STRAINER	---	P2	CENTRIFUGAL PUMP	---
3	1" BALL VALVE	---	P1	GEAR PUMP	---
2	CALIBRATION 1ST	0.001m ³ /s	R	OIL COOLER	---
1	STORAGE TANK	---			

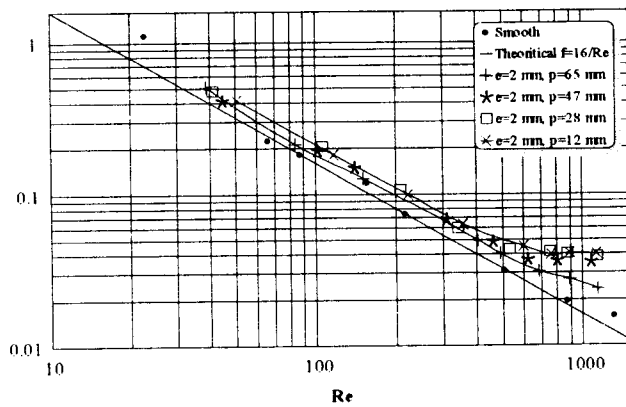
شکل ۱: شماتیک دستگاه آزمایش.

در این مطالعه لوله‌هایی با هفت نوع سیم‌پیچ مختلف و یک لوله صاف مورد آزمایش قرار گرفته‌اند که از اطلاعات لوله صاف برای کالیبره کردن دستگاه و همچنین مقایسه افزایش بدست آمده در انتقال حرارت و اصطکاک استفاده می‌گردد. جنس سیم پیچ‌های مورد استفاده کربن استیل بوده و مشخصات ابعادی آنها به‌مراه نقشه شماتیک مربوط به ترتیب در جدول (۲) و شکل (۲) نشان داده شده است و بگونه‌ای تهیه گردیده‌اند که محکم به دیواره داخلی لوله بچسبند.

روغن مورد استفاده، روغن بهران حرارت می‌باشد که مخصوص سیستم‌های انتقال حرارت بوده و حداکثر تا دمای ۲۹۵ درجه سلسیوس در سیستم‌های بسته قابل استفاده است و خواص

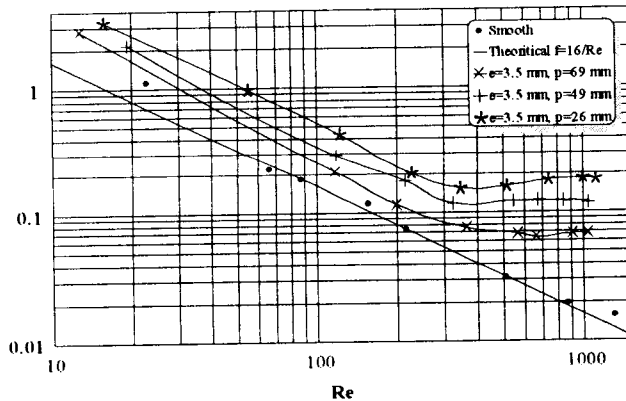
البته دستگاه برای حالت $Re < 50$ دارای خطای زیادی می باشد که علت آن پائین بودن دبی و عدم کارکرد صحیح پمپ در آن می باشد) ضرایب اصطکاک جریان آرام برای سیم های مارپیچ داخلی اصولاً در مقایسه با لوله های صاف بیشتر می باشد. اشکال (۳-ا) (سیم های ۴ و ۳) و (۳-ب) (سیم های ۵ و ۶) تغییرات f را برحسب عدد رینولدز نشان می دهند. از اشکال فوق کاملاً مشهود است که در اعداد رینولدز پائین افزایش نرخ ضرایب اصطکاک نسبتاً کم بوده و در مقادیر بالاتر رینولدز این افزایش نرخ زیاد می گردد.

FRICTION FACTOR



(a)

FRICTION FACTOR



(b)

شکل ۳: نحوه تغییرات ضریب اصطکاک با عدد رینولدز برای جریان آرام روغن بهران حرارت داخل لوله صاف و لوله های با سیم پیچ.

علت آن را می توان بدین صورت تشریح کرد که در مقادیر پائین

هنگامیکه اطمینان حاصل شد که عملکرد سیستم پایدار گردیده و جمع آوری داده ها قابل اطمینان است، اینکار انجام گردید. مطالعات بر روی ضریب اصطکاک ایزوترمال در دمای $32^\circ C$ برای سیم پیچ های نشان داده شده در جدول (۲) و لوله صاف در جریان آرام روغن انجام شد، که D قطر داخلی لوله، D_o قطر خارجی لوله e ضخامت سیم، p گام سیم پیچ و D_H قطر هیدرولیکی معادل می باشد. همچنین مطالعات ضریب انتقال حرارت برای حالت گرمایش روغن جاری در لوله داخلی واحد آزمایش، توسط بخار اشباعی (بمنظور ثابت نگه داشتن دمای سطح) که در پوسته جریان دارد، صورت گرفته است. علاوه بر دمای ورود و خروج روغن، دمای سطح لوله مسی بمنظور محاسبه ضریب انتقال حرارت داخلی (سمت لوله) اندازه گیری می شود.

جمع آوری داده ها

در مجموع ۱۲۰ آزمایش بادی های مختلف برای جریان آرام داخل لوله صاف و جریان داخل لوله زیر (با سیم پیچ) انجام گرفت. که محدوده آزمایشات به شرح زیر می باشد:

- عدد رینولدز : $10 < Re < 1500$
- عدد پرانتل : $120 < Pr < 300$
- زاویه پیچش : $49^\circ < \alpha < 82^\circ$
- نسبت قطر سیم به قطر لوله : $0.1077 < e/d_i < 0.134$
- نسبت گام به قطر لوله : $0.461 < p/d_i < 2/65$

خواص روغن برای هر حالت با استفاده از منحنی های موجود در کاتالوگ شرکت بهران [۶] قابل محاسبه می باشد.

نتایج و بحث و بررسی ضریب اصطکاک

ضریب اصطکاک فانینگ توسط رابطه زیر قابل محاسبه می باشد:

$$f = \frac{\Delta p d}{2 \rho u_m^2 L} \tag{1}$$

که Δp افت فشار بوجود آمده در واحد آزمایش، u_m سرعت متوسط سیال و L طول واحد آزمایش می باشد. همچنین ضرایب اصطکاک برای جریان آرام داخل لوله صاف توسط رابطه $f = 16/Re$ قابل محاسبه می باشد، که برای محدوده مورد مطالعه، $10 < Re < 1500$ ، با در نظر گرفتن خطائی حدود $\pm 5\%$ می تواند به منظور کالیبره کردن (صحت عملکرد) دستگاه آزمایشی بکار رود.

سیم پیچ) تعریف می‌گردد و توسط رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$d_h = \frac{(d_i^2 - \pi e^2 d_c/p)}{(d_i + \pi e d_c/p)} \quad (2)$$

که d_i قطر داخلی لوله، e قطر سیم، p گام محوری سیم پیچ و d_c قطر سیم پیچ بوده که از رابطه $d_c = \frac{d_i}{\sin \alpha}$ محاسبه می‌گردد.

انتقال حرارت

ضریب انتقال حرارت داخلی (سمت لوله) برای حالت دمایی سطح ثابت از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد: (لازم به یادآوری است که کلیه خواص سیال می‌بایست در میانگین دمایی ورود و خروج محاسبه گردند).

$$h = \frac{Wc_p (\Delta T_i - \Delta T_o)}{\pi d_i L \Delta T_{lm}} \quad (3)$$

که در آن W دبی جرمی سیال و ΔT_{lm} اختلاف دمایی متوسط لگاریتمی می‌باشد. مقادیر محاسبه شده به صورت عدد نوسلت ($h d_i/k$)، در اشکال (۵-ا) (سیم های ۳، ۲، ۱ و ۴) و (۵-ب) (سیم های ۵، ۶ و ۷) برحسب Re_{d_h} برای جریان آرام روغن رسم شده‌اند (لازم به یادآوری است از آنجا که طول لوله گرم شده تنها $5/9$ برابر قطر آن است جریان کاملاً توسعه یافته نمی‌باشد). مقادیر آزمایشی بدست آمده برای عدد نوسلت جریان آرام روغن در لوله صاف تقریباً با مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه سیدر - تیت^۶ (رابطه ۴) مطابقت دارند که خود نشانگر صحت عملکرد دستگاه آزمایشی می‌باشد.

$$Nu_d = 1.86 \left(\frac{Re_d Pr}{L/D} \right)^{1/3} (\mu/\mu_w)^{0.14} \quad (4)$$

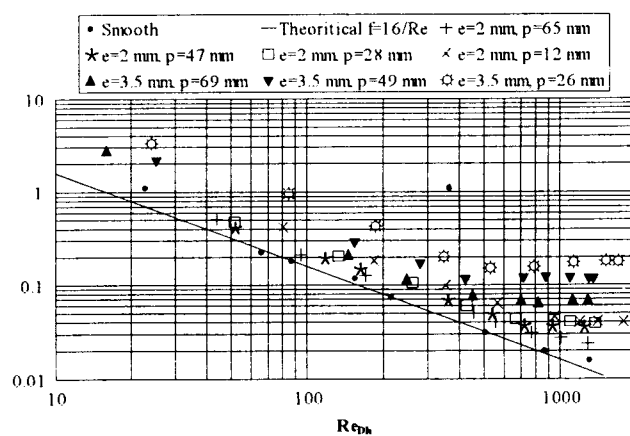
که μ_w لزجت دینامیکی سیال در دمایی دیواره می‌باشد. همانگونه که از اشکال فوق می‌توان مشاهده کرد. افزایش عدد نوسلت روغن برای سیم مارپیچ اول ۱۸۰٪، برای سیم مارپیچ سوم و چهارم ۲۱۰٪ و برای سیم مارپیچ هفتم ۲۳۰٪ می‌باشد.

افزایش عدد نوسلت بمیزان ۲۳۰-۱۸۰٪ با استفاده از سیم‌های مارپیچ داخلی را نمی‌توان تنها به حساب افزایش سطح انتقال حرارت گذاشت که از مرتبه ۴۰-۱۰٪ می‌باشد، بلکه تغییر پروفیل دما در ناحیه دیواره عامل این افزایش محسوس انتقال حرارت است. از آنالیز نتایج آزمایشی مشخص می‌گردد که سهم جابجایی

عدد رینولدز که مطابق با دبی‌های پائین می‌باشد، سیال فقط از روی سیم پیچ‌ها عبور می‌کند و افزایش ضریب اصطکاک بعلت وجود گردابه‌های^۵ کوچکی است که در پشت سیم تشکیل می‌شود (جدائی لایه مرزی در سیم پیچ‌ها). لیکن هنگامیکه دبی جریان (و در نتیجه Re) افزایش می‌یابد، بعلت وجود سیم پیچ‌ها یک جریان ثانویه و در نتیجه اغتشاشی در جریان القاء می‌شود، که منجر به افزایش بیشتر ضریب اصطکاک می‌گردد. همانگونه که از شکل (۳) می‌توان مشاهده کرد افزایش ضریب اصطکاک برای سیم مارپیچ اول حدود ۲۲٪، برای سیم مارپیچ سوم حدود ۳۴٪ و برای سیم مارپیچ هفتم حدود ۲۲۰٪ می‌باشد و همچنین مشخص می‌گردد که انتقال از جریان آرام به جریان مغشوش برای حالت سیم‌های مارپیچ داخلی در عدد رینولدز پائین‌تری ($Re=300$) نسبت به لوله‌های صاف رخ می‌دهد.

هنگامیکه نتایج بدست آمده را برحسب Re_{d_h} (عدد رینولدز براساس قطر هیدرولیکی) ترسیم کنیم مشخص می‌شود که مقادیر ضریب اصطکاک تا $Re_{d_h}=600$ به خط لوله صاف، $f=16/Re$ ، نزدیکتر می‌شوند (شکل ۴).

FRICTION FACTOR



شکل ۴: نحوه تغییرات ضریب اصطکاک با عدد رینولدز براساس قطر هیدرولیکی برای جریان آرام روغن بهران حرارت در لوله صاف و لوله‌های با سیم پیچ

از اینرو با توجه به اینکه لوله‌های با سیم پیچ داخلی اصولاً در دبی‌های پائین مانند لوله صاف رفتار می‌کنند پیشنهاد می‌شود که در محاسبه عدد رینولدز از قطر هیدرولیکی استفاده گردد. قطر هیدرولیکی (d_h) در این حالت بصورت ۴ برابر نسبت حجم فضای آزاد موجود برای جریان سیال به کل سطح تر شده (دیواره لوله و

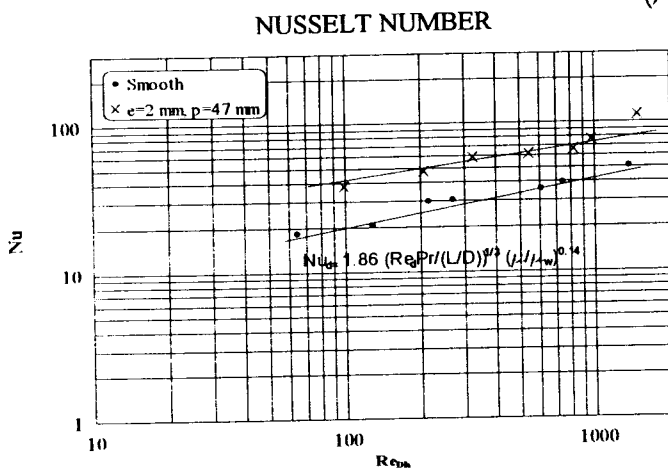
آزاد در انتقال حرارت به علت لزجت بالای روغن و عدد گراشف^۷ $(g\beta(T_s - T)d^3/\nu^2 =)$ پائین، ناچیز می‌باشد.

تغییر می‌کند. از نتایج بدست آمده مشخص می‌گردد که عدد نوسلت برای جریان در لوله‌های با سیم‌پیچ تابعی از عدد رینولدز Re_{dh} ، زاویه پیچش سیم α و عدد پرانتل است که شکل کلی آن بصورت زیر می‌باشد:

$$Nu_d = C(\alpha) Re_{dh}^m Pr^{0.33} \phi \quad (5)$$

که ϕ ضریب تصحیح بمنظور تأثیر تغییرات دما در عرض لایه مرزی بوده و رابطه آن $\phi = (\mu/\mu_w)^{0.14}$ می‌باشد. مقدار m در واقع شیب خطوط صافی می‌باشد که از رسم منحنی لگاریتمی Nu برحسب Re_{dh} (در شکل ۶ برای سیم پیچ ۲ نشان داده شده است) بدست می‌آید و می‌توان مقدار آن را به شکل رابطه‌ای برحسب زاویه پیچش سیم به صورت زیر درآورد:

$$m = 0.26(\tan\alpha)^{-0.37} \quad (6)$$



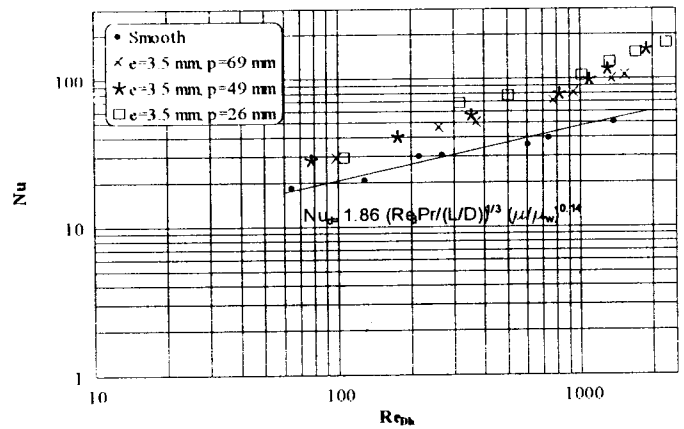
شکل ۶: خطی بودن تغییرات عدد نوسلت با عدد رینولدز براساس قطر هیدرولیکی برای سیم پیچ ۲.

بمنظور بدست آوردن رابطه‌ای برای $C(\alpha)$ کافی است که مقادیر متناظر آن را برحسب $\tan\alpha$ رسم کنیم که این امر در شکل (۷) صورت گرفته است و از آنجا رابطه زیر برای $C(\alpha)$ بدست می‌آید:

$$C(\alpha) = 1.63 \tan(\alpha) \quad (7)$$

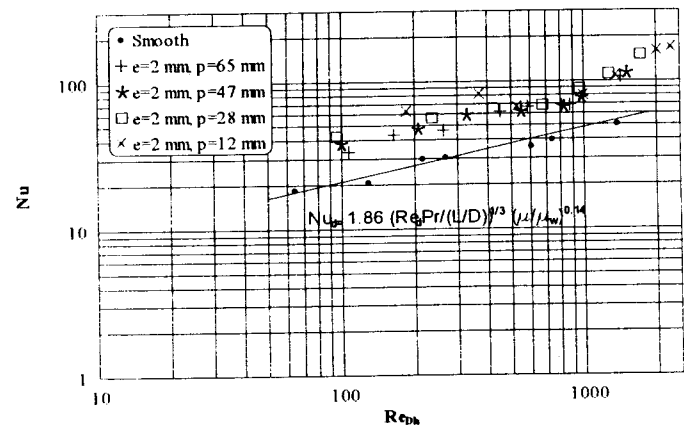
که با جایگذاری روابط ۶ و ۷ در معادله ۵ رابطه زیر برای عدد نوسلت سیم‌های مارپیچ بدست می‌آید:

NUSSELT NUMBER



(a)

NUSSELT NUMBER



(b)

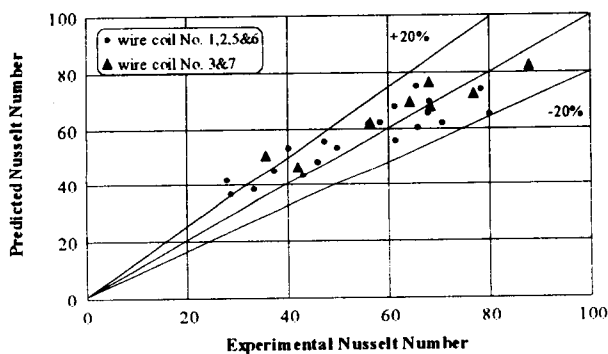
شکل ۵: نحوه تغییرات عدد نوسلت با عدد رینولدز براساس قطر هیدرولیکی برای گرمایش روغن بهران حرارت.

رابطه انتقال حرارت

به منظور مطالعه تأثیر عدد پرانتل روی عدد نوسلت، برای حالت سیم‌پیچ‌های ۲، ۳ و ۵ روغن با سه دمای متفاوت (۵۵° و ۶۵° و ۵۵، ۳۹) وارد تبادل گر حرارتی گردید، (لازم بذکر است که در هر سه حالت دمای سطح ثابت بود) تا دمای متوسط سیال و متناسب با آن عدد پرانتل تغییر کند. که پس از قرائت اطلاعات و محاسبه عدد نوسلت معلوم گردید که عدد نوسلت با توان 0.33 عدد پرانتل

مقادیر اندازه‌گیری شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. می‌توان دید که اکثریت ضرایب انتقال حرارت پیش بینی شده در محدوده $\pm 20\%$ مقادیر تجربی می‌باشند و از اینرو تطابق خوبی بین مقادیر مشاهده شده و روابط پیشنهادی وجود دارد.

در پایان لازم به یادآوری است که در این تحقیق پارامترهای متعددی بوسیله وسایل اندازه‌گیری با درجات دقت مختلف اندازه‌گیری شده‌اند. ضروری است که اثر ترکیب این خطاها بر روی مقادیر ضرایب انتقال حرارت محاسبه شده بررسی شود. با استفاده از روش ارائه شده در مرجع [۷]، آنالیز خطای وسایل اندازه‌گیری^{۱۰} بر روی نتایج محاسبه شده انجام گرفت و ملاحظه گردید که حداکثر خطا $7/5\%$ می‌باشد.



شکل ۸: مقایسه مقادیر تجربی با مقادیر محاسبه شده.

نتیجه‌گیری

نتایج زیر از این کار تحقیقی بدست آمد.

۱ - نصب سیم پیچ در لوله‌های افقی باعث افزایش ضرایب انتقال حرارت تا 230% نسبت به مقادیر مربوط به لوله صاف مشابه می‌گردد.

۲ - عدد نوسلت تابعی از زاویه پیچش، عدد رینولدز و عدد پرناتل می‌باشد.

۳ - افزایش ضریب اصطکاک در دبی‌های پائین کم بوده و با بالا رفتن مقدار دبی اغتشاش بوجود آمده در جریان باعث رشد سریع آن می‌گردد که مقدار آن برای سیم مارپیچ ۳ حدود 24% بوده و در مقایسه با افزایش انتقال حرارت به میزان 210% بسیار ناچیز می‌باشد.

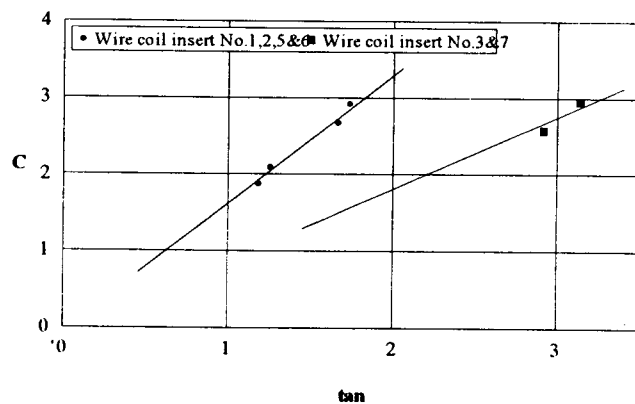
۴ - براساس داده‌های تجربی این تحقیق، روابطی بدست آورده شد

$$Nu_d = 1.63 \tan \alpha (Re_{d_h})^{[0.26 (\tan \alpha)^{-0.37}]} (Pr)^{0.33} (\mu/\mu_w)^{0.14} \quad (8)$$

و برای شرایط $49 < \alpha < 61$ ، $80 < Re_{d_h} < 900$ و $1/8 < p/d_i < 2/65$ قابل استفاده می‌باشد. بطریق مشابه می‌توان با استفاده از اطلاعات موجود برای سیم پیچ‌های ۳ و ۷ رابطه‌ای نظیر معادله (۸) به شکل زیر برای حالت $73 < \alpha < 61$ بدست آورد:

$$Nu_d = 0.91 \tan \alpha (Re_{d_h})^{[0.29 (\tan \alpha)^{-0.21}]} (Pr)^{0.33} (\mu/\mu_w)^{0.14} \quad (9)$$

که رابطه فوق برای شرایط $90 < Re_{d_h} < 950$ و $1/8 < p/d_i < 1$ معتبر می‌باشد. متأسفانه برای لوله با سیم پیچ-۴ با زاویه پیچش $\alpha = 82$ رابطه مناسبی حاصل نگردید. رابطه (۸) تقریباً مشابه رابطه‌ای می‌باشد که قبلاً توسط اوتاروار و راجا رائو [۱] برای سیم‌های مارپیچ داخلی برای حالت $32 < \alpha < 61$ بدست آمد. تا کنون رابطه‌ای برای حالت $\alpha > 61$ گزارش نشده است و رابطه ۹ برای $73 < \alpha < 61$ برای اولین مرتبه ارائه می‌شود.



شکل ۷: نحوه تغییرات $C(\alpha)$ برحسب $\tan(\alpha)$.

مقدار انحراف متوسط^۸ ضرایب انتقال حرارت محاسبه شده بوسیله روابط پیشنهادی بالا از مقادیر تجربی این بررسی به ترتیب $6/93\%$ و $7/97\%$ و مقدار انحراف استاندارد^۹ آنها به ترتیب $13/84\%$ و $15/42\%$ می‌باشد و تعداد نقاط داده‌ای که در بدست آوردن این روابط استفاده شده ۵۰ عدد می‌باشد. شکل (۸) مقایسه‌ای بین ضرایب انتقال حرارت محاسبه شده از روابط پیشنهادی (۸) و (۹) و

محترم پژوهشی گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و دانشگاه تهران که امکان انجام این کار تحقیقی تجربی را در چهارچوب یک طرح پژوهشی فراهم نمودند، اعلام می‌داریم.

که ضرایب انتقال حرارت محاسبه شده بوسیله این روابط در محدوده $\pm 20\%$ مقادیر تجربی برای بیشترین داده‌ها می‌باشد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله مراتب تشکر و سپاسگزاری خود را از معاونین

مراجع

- 1 - Uttarwar, S. B. and Raja Rao, M. (1985). "Augmentation of laminar flow heat transfer in tubes by means of wire coil inserts." *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 107, PP. 930-935.
- 2 - Chiou, J. P. (1987). "Experimental investigation of the augmentation of forced convection heat transfer in circular tube using spiral spring insert." *Transactions of The ASME*, Vol. 109, PP. 300-307.
- 3 - Manglik, F. M. and Bergles, A. E. (1994). "Influence of twisted tape generated swirl on single-phase heat transfer." *Proc. of First ISHMI-ASME Heat & Mass Transfer Conference (Bombay)*, PP. 249-256.
- 4 - Hong, S. W. and Bergles, A. E. (1978). "Augmentation of laminar flow heat transfer by means of twisted tape inserts." *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 98, PP. 251-256.
- 5 - Van RooYen, R. S. and Kroger, D. G. (1978). "Laminar flow heat transfer augmentation in internally finned tubes with twisted tape inserts, finned tubes with twisted tape inserts." *Proc. of sixth Int. Heat Transfer Conference(Toronto)*, Vol. 2, PP. 578-581.
- ۶ - راهنمای کاربرد و مشخصات محصولات شرکت نفت بهران.
- 7 - Schultz, R. R. and Cole, R. (1979). "Uncertainty analysis in boiling nucleation." *AICHE Symp. Series*, No. 189, Vol. 75, PP. 32-38.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Active and Passive Techniques
- 2 - Twisted Tape
- 3 - Wire Mesh Or Brush
- 4 - Coiled Wire
- 5 - Vortices
- 6 - Sieder-Tate
- 7 - Grashof Number
- 8 - Mean Deviation
- 9 - STandard Deviation
- 10 - Uncertainty Analysis