

افزایش انتقال حرارت در مبدل های حرارتی خنک کننده روغن توربین با استفاده از نصب بهبود دهنده های داخل لوله های مبدل

امیر اسمعیل کبیری حرمی: کارشناس مهندسی مکانیک حرارت و سیالات از دانشگاه کاشان، شرکت کیانا پترو انرژی
تینا اردشیری نیا: کارشناسی ارشد مهندسی شیمی از دانشگاه آزاد تهران جنوب، شرکت کیانا پترو انرژی
ae.kabiri@gmail.com

چکیده

در این مقاله به بررسی یک مبدل حرارتی خنک کننده روغن توربین (از نوع کولر هوایی) و راههای بهبود انتقال حرارت آن پرداخته شده است. به منظور مقابله با محدودیتهای ابعادی از انواع مختلف بهبود دهنده های انتقال حرارت در داخل تیوبها برای کاهش ابعاد و افزایش ضریب انتقال حرارت داخل لوله ها استفاده شده است. پس از طراحی با دو نوع مختلف از بهبود دهنده ها، نواری تابیده و شبکه ای سیمی، و مقایسه آن با طرح قبلی بدون استفاده از بهبود دهنده، مشخص شد که آنها به صورت قابل ملاحظه ای قابلیت انتقال حرارتی مبدل را افزایش میدهند. پس از بررسی نتایج معلوم گردید نوع نواری تابیده باعث افزایش شدید افت فشار در سیال لوله شده لذا برای روغن مناسب به نظر نمیرسد همچنین ابعاد آنها تا حدود یک سوم کاهش یافت. در پایان اثرات عدد رینولدز، لزجت و سایر پارامترها با آن بررسی شد و برخی اثرات ابعاد هندسی بهبود دهنده ها تشریح گردید.

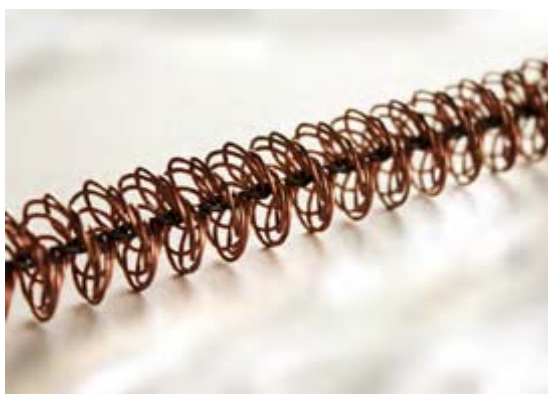
واژه های کلیدی: بهبود دهنده های داخل لوله، بهبود دهنده های نواری تابیده، بهبود دهنده های شبکه ای سیمی، رینولدز

امروزه مبدل‌های حرارتی نقش بسیار مهمی را در فرآیندهای نفت و گاز، پتروشیمی و صنایع شیمیایی ایفا می‌کنند. از بزرگترین چالش‌های پیش رو در این حوزه ابعاد بزرگ، رسوب بالا و توان انتقال حرارت آنها می‌باشد که باعث افزایش قابل ملاحظه هزینه‌های مستقیم و غیر مستقیم خواهد شد. برای ارتقای عملکرد مبدل‌های حرارتی، مطالعات و تحقیقات بسیاری انجام شده که باعث بهبود انتقال حرارت، کاهش سطح حرارتی، فشرده شدن ابعاد مبدلها و کاهش رسوب گذاری سیال شده است. این مقاله به بررسی افزایش انتقال حرارت و افت فشار بر اثر استفاده از بهبود دهنده‌های داخل لوله‌ها در یک خنک کننده روغن توربین پالایشگاه گاز شهید هاشمی نژاد خواهد پرداخت.

بهبود دهنده‌های داخل لوله‌ها (Tube Inserts Promoters) بطور قابل ملاحظه‌ای ضریب انتقال حرارت داخل لوله‌های مبدل را بخصوص در جریان لایه‌ای (Laminar) بهبود می‌بخشند همچنین باعث کاهش شدید رسوب گذاری سیال داخل لوله‌ها خواهند شد. بیشترین کاربرد آنها در سیالات با لزجت بالا، عدد رینولدز پایین، روغن‌ها و برخی از گازها در لوله‌ها می‌باشد. نسل اول بهبود دهنده‌ها به نام نواری تابیده (Twisted Tape) شکل شماره ۱، باعث چرخشی شدن جریان و در نتیجه بهبود انتقال حرارت می‌شدند، نسل دوم بهبود دهنده‌ها، به نام شبکه‌ای سیمی (Wire Matrix) شکل شماره ۲، باعث ایجاد جریان شعاعی از دیواره‌ها به سمت مرکز و ضمن حذف لایه مرزی اطراف دیواره لوله‌ها باعث بهبود انتقال حرارت خواهد شد. در مجموع با استفاده از این فن آوری می‌توان به بهبود سامانه‌های مورد نظر بویژه در تاسیساتی که فضای مورد نیاز در دسترس نمی‌باشد از جمله سکوها‌های نفتی کمک موثری رساند.



شکل شماره ۱: بهبود دهنده نواری تابیده (Twisted Tape)



شکل شماره ۲: بهبود دهنده شبکه‌ای سیمی (Matrix Wire)

۲- طراحی مبدل حرارتی خنک کننده روغن توربین بدون استفاده از بهبوددهنده

۲-۱- شرایط عملیاتی مبدل حرارتی

این مبدل به منظور خنک کردن روغن توربین های گازی با دبی معادل 40 ton/hr در فشار 6.8 bar و برای کاهش دما از 66.6°C به 54.4°C بکار برده میشود. در این فرایند روغن 43 tesso داخل لوله های مبدل که از نوع کربن استیل و با فین های از نوع آلومینیومی می باشند با استفاده از هوای محیط دمیده شده بر روی لوله ها خنک می شود. مشخصات ترموفیزیکی روغن در جدول شکل شماره ۳ آورده شده است.

Temperature $^{\circ}\text{C}$	Specific Heat Kj/Kg.K	Thermal Conductivity W/m.K	Density Kg/m ³	Viscosity cp
۳۷.۷	۲.۲۲	۰.۱۲	۸۳۹	۳۴
۹۸.۸	۲.۲۲	۰.۱۲	۸۳۷	۴.۵

شکل شماره ۳: جدول اطلاعات ترموفیزیکی روغن

۲-۲- نتایج طراحی مبدل حرارتی بدون استفاده از بهبوددهنده

با در نظر گرفتن شرایط بالا و با استفاده از نرم افزار ASPEN B-JAC مبدل حرارتی مذکور با توجه به دمای هوای محیط 40°C طراحی شده است. این مبدل به صورت سه Bay که هر کدام شامل یک تیوب باندل به ابعاد $1.3 \times 6 \text{ m}$ است طراحی شده است. هر باندل دارای ده ردیف لوله و به صورت ده گذر (Pass) و ۲۱ لوله در هر گذر و هر لوله از نوع 14 BWG ۱" به طول 5.2 m می باشد. مشخصات فرآیندی عملکردی سیال سمت لوله که موضوع اصلی مورد مطالعه در این مقاله می باشد در جدول شکل شماره ۴ آورده شده است.

Total heat exchanged	BTU/h	1024738	Size	5428.6 x 4147.2	mm
Overall coef. - dirty	W/(m ² K)	3.2	Bays	3 par 3 ser 1	
Effective surface area	m ²	5587.9	Fin	394 #/m OD	mm
MTD corrected	$^{\circ}\text{C}$	17.05	Tube OD	25.4 Tks 2.11	mm
MTD correction factor		0.99	Tube passes	10 hor	

Thermal Details - Thermal Resistances

		Clean	Spec. foul	Max. foul
Area reqd.	m ²	5484.4	5524.2	5587.9
Excess surface	%	1.89	1.15	
Overall coefficient	W/(m ² K)	3.2	3.2	3.2
Overall resistance	m ² K/W	0.31145	0.31371	0.31733
Outside fouling	m ² K/W	0.0		
Tube side fouling (at tube ID)		0.0	0.00009	0.00023
Distribution of overall resistance				
Outside film	%	8.29	8.23	8.14
Outside fouling	%			
Tube wall	0.00004	%	0.27	0.26
Tube side fouling	%	0.0	0.72	1.85
Tube side film	%	91.44	90.78	89.75

شکل شماره ۴: جدول اطلاعات فرآیندی عملکردی مبدل بدون بهبود دهنده

۳- طراحی مبدل حرارتی با استفاده از بهبوددهنده انتقال حرارت

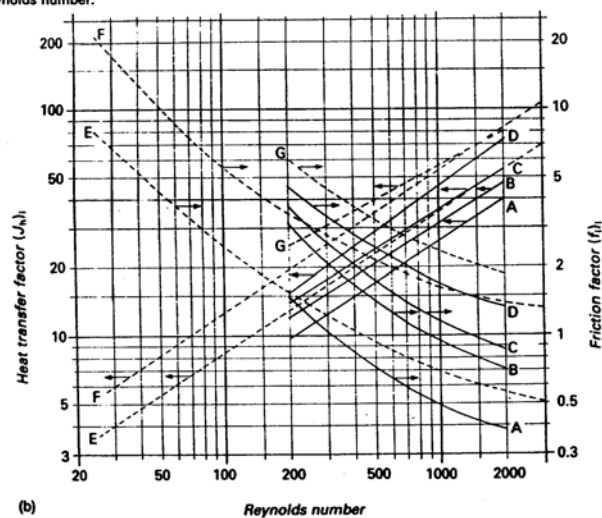
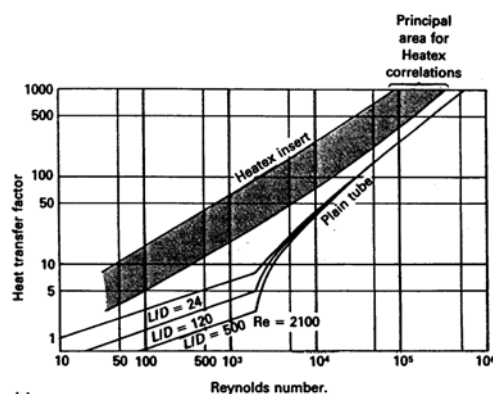
۳-۱- کلیات

همانطور که در بخش ۲ توضیح داده شد، در نتیجه طراحی بدون استفاده از بهبود دهنده میبایستی از سه Bay استفاده گردد که با توجه به فضای در دسترس، نامناسب و غیر کاربردی می باشد. در این قسمت از بهبود دهنده نوع نواری تابیده و شبکه ای سیمی برای طراحی خنک کننده روغن توربین استفاده شده است. مهمترین پارامتر در بهبود دهنده های نواری تابیده گام آنها می باشد که به نسبت فاصله بین دو تابیدگی مجاور و قطر داخلی لوله گفته می شود و نقش تعیین کننده ای در محاسبات مبدل دارد. هر چه گام کمتر باشد، میزان انتقال حرارت بهتر خواهد شد ولی از طرف دیگر منجر به افزایش افت فشار نیز می گردد. در مورد بهبود دهنده های شبکه ای سیمی، فشردگی و هندسه آنها عامل تعیین کننده شرایط آنها می باشد. فرمولهای زیر محاسبه انتقال حرارت و افت فشار در داخل لوله ها پس از استفاده از آنها را نشان می دهد کرد [2][1].

$$h_n = h \times j_n \quad (1)$$

$$\Delta P_n = \Delta P \times f_i \quad (2)$$

پارامترهای j_n و f_i در هر نوع از بهبود دهنده های انتقال حرارت متفاوت است که برای برخی از انواع آنها میتوان از نمودار شکل شماره ۵ استفاده کرد [1].



Key — Insert types: A, B, C, D - 25.4 mm tubes
 - - - - - Insert types: E, F, G - 19 mm tubes

شکل شماره ۵: منحنی عملکرد بهبود دهنده های مختلف

۳-۲- طراحی با استفاده از بهبود دهنده های نواری تابیده

در این مرحله با استفاده از نرم افزار ASPEN B-JAC و با توجه به فضای در دسترس مبدل حرارتی برای یک سوم فضای مرحله قبل طراحی می گردد. کولر هوایی با 140 لوله و به صورت 4 ردیف و 4 گذر به طول 5.4 m می باشد که مشخصات فرآیندی عملکردی سیال سمت لوله در شکل شماره ۶ نمایش داده شده است. بمنظور ایجاد شرایط مطلوب انتقال حرارت ناگزیر از استفاده از بهبود دهنده نواری تابیده باگام 1.6 شده ایم که منجر به 7bar افت فشار شده که عملاً باعث غیر قابل استفاده شدن مبدل گردید.

Pressure drop (allow./calc.)	Pa/ bar	270/254	1.37895/7.39911		
Total heat exchanged	BTU/h	1024738	Size	5628.6 x 2222.4 mm	
Overall coef. - dirty	W/(m ² K)	14	Bays	1 par 1 ser 1	
Effective surface area	m ²	1289.5	Fin	394 #/m	OD 57 mm
MTD corrected	°C	17.01	Tube OD	25.4 Tks	2.11 mm
MTD correction factor		1	Tube passes	4	hor

Thermal Details - Thermal Resistances

		Clean	Spec. foul	Max. foul
Area reqd.	m ²	1221.6	1261.4	1289.5
Excess surface	%	5.56	2.23	
Overall coefficient	W/(m ² K)	14.5	14	13.7
Overall resistance	m ² K/W	0.0692	0.07146	0.07305
Outside fouling	m ² K/W	0.0		
Tube side fouling (at tube ID)		0.0	0.00009	0.00015
Distribution of overall resistance				
Outside film	%	29.46	28.53	27.91
Outside fouling	%			
Tube wall	0.00004	1.2	1.17	1.14
Tube side fouling	%	0.0	3.16	5.27
Tube side film	%	69.33	67.14	65.68

شکل شماره ۶: جدول اطلاعات فرآیندی عملکردی مبدل با بهبود دهنده نواری تابیده

۳-۲- طراحی با استفاده از بهبود دهنده های شبکه ای سیمی

همانطور که در بخش قبل ذکر شد استفاده از بهبود دهنده های نواری تابیده برای افزایش انتقال حرارت مناسب می باشد اما افزایش شدید افت فشار در آنها باعث کارایی پایین توربین خواهد شد. لذا از بهبود دهنده های شبکه ای سیمی برای افزایش انتقال حرارت استفاده میکنیم. همانطور که در فرمول (۱) و (۲) ملاحظه میشود هر بهبود دهنده با توجه به شرایط هندسی و رینولدز پارامترهای n_z و f_i مخصوص به خود را دارا میباشد که باعث افزایش همزمان انتقال حرارت و افت فشار خواهد شد. در این بخش ضرایب n_z و f_i با توجه مشخصات ارائه شده شرکت Cal Gavin و عدد رینولدز داخل لوله ها به ترتیب 4.8 و 4 [3]، [4]، [5] میباشد و سپس با استفاده از نرم افزار Aspen Bjac طراحی انجام میشود. همانطور که در شکل شماره ۷ مشاهده میشود مشخصات فرآیندی عملکردی سیال سمت لوله از دیدگاه انتقال حرارت و افت فشار مناسب و مطلوب است و مقاومت حرارتی سمت لوله از ۸۹ درصد در مبدل حرارتی بدون بهبود دهنده به ۷۰ درصد کاهش یافته و ضریب انتقال حرارت کلی از ۳.۲ به ۱۱.۶ افزایش یافته است.

Film coefficients	W/(m ² K)	47.3	463.9
Fouling resistance	m ² K/W		0.00009
Velocity	m/s	9.51	0.99
Pressure drop (allow./calc.)	Pa/ bar	280/273	1.37895/1.34037
Total heat exchanged	BTU/h	1024738	Size 5791.2 x 2402.4 mm
Overall coef. - dirty	W/(m ² K)	11.8	Bays 1 par 1 ser 1
Effective surface area	m ²	1514.8	Fin 433 #/m OD 57 mm
MTD corrected	°C	17.16	Tube OD 25.4 Tks 2.11 mm
MTD correction factor		1	Tube passes 4 hor

Thermal Details - Thermal Resistances

		Clean	Spec. foul	Max. foul
Area reqd.	m ²	1444.8	1488.1	1514.8
Excess surface	%	4.84	1.79	
Overall coefficient	W/(m ² K)	12.1	11.8	11.6
Overall resistance	m ² K/W	0.08257	0.08504	0.08657
Outside fouling	m ² K/W	0.0		
Tube side fouling (at tube ID)		0.0	0.00009	0.00014
Distribution of overall resistance				
Outside film	%	25.59	24.84	24.41
Outside fouling	%			
Tube wall 0.00004	%	1.11	1.07	1.05
Tube side fouling	%	0.0	2.91	4.62
Tube side film	%	73.31	71.18	69.92

شکل شماره ۷: جدول اطلاعات فرایندی عملکردی مبدل با بهبود دهنده شبکه ای سیمی

با مطالعه مشخصات عملیاتی اولیه مبدل شکل‌های شماره ۴، ۵، ۶ و ۷ و جدول شکل شماره ۳ در میابیم که با توجه به اینکه عدد رینولدز در محدوده ۱۱۹۲ میباشد و لزجت سیال بالا است استفاده از این نوع بهبود دهنده ها بدون اینکه با مشکل افزایش افت فشار مواجه شویم، مناسب میباشد.

۴- نتیجه گیری

با توجه به طراحی های انجام شده و نمودار شکل ۵ در صورتیکه سیال سمت لوله رینولدز پایین تر از محدوده 2100 داشت با در نظر گرفتن شرایط زیر و محدودیتهای عملیاتی توصیه می گردد از بهبود دهنده ها برای افزایش انتقال حرارت استفاده گردد:

- ۱- در صورتیکه سیال دارای لزجت و چگالی بالا باشد و به عبارت دیگر مشکلات افت فشار در آن چشمگیر باشد بهبود دهندهای شبکه ای سیمی ارجحیت دارند و میتوانند اغتشاش (Turbulence) سیال را بالاتر ببرند.
- ۲- در صورتیکه سیال گاز (لزجت و چگالی پایین تر) باشد طرحهای نواری تابیده به جهت ساختمان ساده، بویژه در بخشهایی که گاز دمای پایین تری دارد در اولویت قرار دارند.
- ۳- در صورت بالاتر بودن عدد رینولدز (بالاتر از محدوده ۲۱۰۰) این امکان وجود دارد که استفاده از این نوع بهبود دهنده ها کارساز و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نباشد.

در پایان میتوان از روشهای دیگر مثل طنابی کردن لوله ها (Roped Tubes)، شیار دار کردن داخل آنها برای بهبود انتقال حرارت سمت لوله ها نام برد.

۵- معرفی علایم و متغیرها در متن

h_n : ضریب انتقال حرارت سمت لوله پس از استفاده از بهبود دهنده ها

h : ضریب انتقال حرارت سمت لوله قبل از استفاده از بهبود دهنده ها

j_n : ضریب افزایش انتقال حرارت بهبود دهنده حرارتی

ΔP_n : افت فشار سمت لوله پس از استفاده از بهبود دهنده ها

ΔP : افت فشار سمت لوله قبل از استفاده از بهبود دهنده ها

f_i : ضریب افزایش افت فشار بهبود دهنده حرارتی

مراجع

1-Heat Exchangers: Selection, Design and Construction, E. A. D. Saunders, (2002) by Longman Scientific & Technical, John Wiley & Sons USA.

2-Heat Exchanger Design, Process Heat Transfer, Donald Q. Kern, (1950) by Mcgraw-Hill College.

3-Performance Upgrades for Air-Cooled Heat Exchangers, Martin J Gough Cal Gavin Ltd, U.K., Ian Gibbard Progressive Thermal Engineering, UK, Presented at Middle East Petrotech 2010, 7th Middle East Refining and Petrochemicals Conference.

4-Fluid Dynamics in a tube equipped with wire matrix inserts, Alex Smeethe, Peter Droegemueller, Joe Wood and Waldemar Bujalski, (2008) Cal Gavin Limited, Minerva Mill Technology Centre.

5-IMPROVING HEAT EXCHANGER RELIABILITY WITH HEAT TRANSFER ENHANCEMENT, Andrew Bailey, Ian Gibbard, (2003) Cal Gavin Limited, Process Intensification Engineering