

TRANSFERENCIA DE CALOR DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR

Problema:

Diseñe un intercambiador de calor de tubo y carcasa para enfriar aceite de 55°C, flujo de 4200kg/h y debe salir del intercambiador a 28°C. El agua esta disponible en suficiente cantidad a una temperatura de 26°C y no debe salir del intercambiador a mas de 40°C. La presión manométrica de entrada es de 100kPa (agua) y de 500kPa (aceite).

DATOS	Valor	Unidad
Temperatura aceite entrada	328	K
Temperatura aceite salida	301	K
Temperatura agua entrada	299	K
Temperatura agua salida	313	K
Presión manométrica agua	100000	Pa
Presión manométrica aceite	500000	Pa
Flujo masico (m) del aceite	1.166666667	kg/s
Velocidad máxima	1.8288	m/s
σ_Y acero	2.40E+08	Pa

Propiedades del agua a la temperatura promedio

$$T_m = \frac{T_{ent} + T_{sal}}{2} \quad (1)$$

$$T_m = \frac{299 + 313}{2}$$

$$T_m = 306 \text{ K}$$

Interpolación

PROPIEDADES AGUA	TEMPERATURA PROMEDIO T_m
T	305
κ	0.62
μ	0.000769
ρ	995.0248756
C_p	4178
Pr	5.2

PROPIEDADES AGUA	TEMPERATURA PROMEDIO T_m
T	306
κ	0.6216
μ	0.00075
ρ	994.629
C_p	4178
Pr	5.084

Nota: (Lo resaltado en amarillo constituye los resultados de la interpolación)

Propiedades del agua a la temperatura de entrada

La temperatura de entrada es: 299 K

PROPIEDADES AGUA		Temperatura Entrada	
	295	299	300
ρ	998.003992	997.805	997.008973

Propiedades del aceite a la temperatura promedio

$$T_m = \frac{T_{ent} + T_{sal}}{2}$$

$$T_m = \frac{328 + 301}{2} K$$

$$T_m = 314.5 K$$

PROPIEDADES ACEITE		Temperatura promedio Tm	
	310	314.5	320
κ	0.145	0.144	0.143
μ	2.53E-01	0.203	1.41E-01
ρ	877.9	875.155	871.8
Cp	1951	1969.9	1993
Pr	3.4	2.754	1.965

Cálculos:

$$\dot{Q}_{aceite} = \dot{Q}_{agua} \quad (2)$$

$$\dot{m}_{aceite} * C_{p_{aceite}} * (T_{aceite_{ent}} - T_{aceite_{salida}}) = \dot{m}_{agua} * C_{p_{agua}} * (T_{agua_{sal}} - T_{agua_{ent}}) \quad (3)$$

Caudal del aceite

$$caudal \text{ del aceite} = \frac{m}{\rho}$$

$$caudal \text{ del aceite} = \frac{1.1667 \text{ Kg/s}}{875.155 \text{ Kg/m}^3}$$

$$caudal \text{ del aceite} = 0.0013 \text{ m}^3 / s$$

Así

$$\dot{Q}_{aceite} = \dot{m}_{aceite} * c_{p_{aceite}} * (T_{aceite_{ent}} - T_{aceite_{sal}})$$

$$\dot{Q}_{aceite} = (1.1667 \text{ Kg/s}) * (1969.9 \text{ J/Kg K}) * (328 \text{ K} - 301 \text{ K})$$

$$\dot{Q}_{aceite} = 62051.85 \text{ W/s}$$

Empleando la ecuación (2) y sustituyendo en (3)

$$\dot{Q}_{aceite} = \dot{Q}_{agua} \quad (2)$$

$$\dot{m}_{agua} * c_{p_{agua}} * (T_{agua_{sal}} - T_{agua_{ent}}) = 62051.85 \text{ W/s}$$

$$\dot{m}_{agua} = \frac{62051.85 \text{ W/s}}{c_{p_{agua}} * (T_{agua_{sal}} - T_{agua_{ent}})}$$

$$\dot{m}_{agua} = \frac{62051.85 \text{ W/s}}{4178 \text{ J/KG K} * (313 - 299) \text{ K}}$$

$$\dot{m}_{aceite} = 1.061 \text{ Kg/s}$$

Se propone como modelo

Un intercambiador de 4 pasos por coraza y 16 pasos por tubos.

CORAZA	4	TUBOS	16
AGUA POR TUBOS			
ACEITE POR CORAZA			
ti	299 K	Ti	328 K
to	313 K	To	301 K

$$P = \frac{(to - ti)}{(Ti - ti)}$$

$$P = \frac{(313 - 299)K}{(328 - 299)K}$$

$$R = \frac{(Ti - To)}{(to - ti)}$$

$$R = \frac{(328 - 301)K}{(313 - 299)K}$$

$$R = 1.928$$

De la grafica se toma

0.775	2
0.94	1.8

$$F = 0.94 - \frac{(1.8 - R) * (0.94 - 0.775)}{(1.8 - 2)}$$

$$F = 0.94 - \frac{(1.8 - 1.92857143) * (0.94 - 0.775)}{(1.8 - 2)}$$

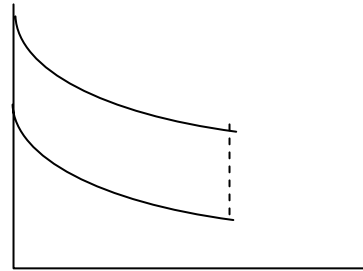
$$F = 8.339E - 01$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{aire\ sal} - T_{agua\ ent}) - (T_{aire\ ent} - T_{agua\ sal})}{\ln\left(\frac{T_{aire\ sal} - T_{agua\ ent}}{T_{aire\ ent} - T_{agua\ sal}}\right)}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{(301 - 299) - (328 - 313)}{\ln\left(\frac{301 - 299}{328 - 313}\right)}$$

$$\Delta T_{ml} = 6.452 \text{ K}$$



Para los intercambiadores aceite- agua el coeficiente global de transferencia de calor ha de estar entre:

$$110 \text{ W/m}^2 \text{ K} \ll U \ll 350 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

Seleccionando en este caso un valor de $U = 82.345 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

Ahora calculamos el área convectiva.

$$\dot{Q} = UAF\Delta T_{ml} \Rightarrow A = \frac{\dot{Q}}{UF\Delta T_{ml}}$$

$$A = \frac{62051.85 \text{ W/s}}{(82.345 \text{ W/m}^2) * (8.339E - 01) * (6.452 \text{ K})}$$

$$A = 140.056 \text{ m}^2$$

Seleccionamos

BWG	D ext	D int	
24	0.00635m	0.0054356	

Para calcular el número de tubos por paso:

$$Caudal \text{ del aceite} = Nt * \frac{\pi}{4} D_i^2 * V_{\max} \Rightarrow Nt = \frac{4Caudal}{\pi * D_i^2 * V_{\max}}$$

$$Nt = \frac{4 * 0.0013 \text{ m}^3 / \text{s}}{\pi * (0.0054356 \text{ m})^2 * 1.828 \text{ m} / \text{s}}$$

$$Nt = 31.41$$

seleccionamos 114

velocidad

$$V = \frac{V_{\max} * Nt}{114}$$

$$V = \frac{1.828 \text{ m} / \text{s} * 31.41}{114}$$

$$V = 0.504 \text{ m/s}$$

Verificación mecánica de los tubos

Según Hamrock

$$\frac{D_i}{t} < 40$$

$$\frac{2D_I}{(D_e - D_i)} = \frac{2 * 0.0054356}{(0.00635 - 0.0054356)} = 11.89 \text{ ES PARED GRUESA}$$

$$\sigma_R = \frac{P_{\text{agua}} * D_{\text{int}}^2 - P_{\text{aceite}} * D_{\text{ext}}^2 + (P_{\text{aceite}} - P_{\text{agua}}) * \left(\frac{D_{\text{ext}} * D_{\text{int}}}{D}\right)^2}{D_{\text{ext}}^2}$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_{\text{agua}} * D_{\text{int}}^2 - P_{\text{aceite}} * D_{\text{ext}}^2 - (P_{\text{aceite}} - P_{\text{agua}}) * \left(\frac{D_{\text{ext}} * D_{\text{int}}}{D}\right)^2}{D_{\text{ext}}^2}$$

CASO 1 : Cuando r = Dext

$$\sigma_R = \frac{P_{\text{agua}} * D_{\text{int}}^2 - P_{\text{aceite}} * D_{\text{ext}}^2 + (P_{\text{aceite}} - P_{\text{agua}}) * \left(\frac{D_{\text{ext}} * D_{\text{int}}}{D}\right)^2}{D_{\text{ext}}^2}$$

$$\sigma_R = \frac{10000 \text{ Pa} * (0.0054356)^2 - 50000 \text{ Pa} * (0.00635)^2 + (50000 - 10000) * \left(\frac{0.00635 * 0.0054356}{0.00635}\right)^2}{D_{\text{ext}}^2}$$

$$\sigma_R = -500000 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_{\text{agua}} * D_{\text{int}}^2 - P_{\text{aceite}} * D_{\text{ext}}^2 - (P_{\text{aceite}} - P_{\text{agua}}) * \left(\frac{D_{\text{ext}} * D_{\text{int}}}{D}\right)^2}{D_{\text{ext}}^2}$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{10000 \text{ Pa} * (0.0054356)^2 - 50000 \text{ Pa} * (0.00635)^2 - (50000 - 10000) * \left(\frac{0.00635 * 0.0054356}{0.00635}\right)^2}{D_{\text{ext}}^2}$$

$$\sigma\theta = -2693295.019 \text{ Pa}$$

CASO 2: Cuando $r = D_{int}$

$$\sigma R = \frac{P_{agua} * D_{int}^2 - P_{aceite} * D_{ext}^2 + (P_{aceite} - P_{agua}) * \left(\frac{D_{ext} * D_{int}}{D}\right)^2}{D_{ext}^2}$$

$$\sigma R = \frac{10000 Pa * (0.0054356)^2 - 50000 Pa * (0.00635)^2 + (50000 - 10000) * \left(\frac{0.00635 * 0.0054356}{0.0054356}\right)^2}{D_{ext}^2}$$

$$\sigma R = -100000 Pa$$

$$\sigma\theta = \frac{P_{agua} * D_{int}^2 - P_{aceite} * D_{ext}^2 - (P_{aceite} - P_{agua}) * \left(\frac{D_{ext} * D_{int}}{D}\right)^2}{D_{ext}^2}$$

$$\sigma\theta = \frac{10000 Pa * (0.0054356)^2 - 50000 Pa * (0.00635)^2 - (50000 - 10000) * \left(\frac{0.00635 * 0.0054356}{0.0054356}\right)^2}{D_{ext}^2}$$

$$\sigma\theta = -3093295.019 Pa$$

De lo anterior se obtiene:

$\sigma R \text{ MAX}$	-100000	Pa
$\sigma\theta \text{ MAX}$	-3093295.019	Pa
σ_1	0	Pa
σ_2	-100000	Pa
σ_3	-3093295.019	Pa

Esfuerzo cortante máximo

$$\sigma_1 - \sigma_3 < \frac{S_y}{N_s}$$

$$N_s = \frac{2.40E + 08}{3093295.019}$$

$$N_s = 77.58$$

$$0 - (-3093295.019) < \frac{2.40E + 08}{77.58}$$

$$3093295.019 < 3093580.82$$

Satisface la condición mecánica.

Estimamos la longitud del tubo

$$A = N_t * N_p * \pi * D_i * L \Rightarrow L = \frac{A}{N_t * N_p * \pi * D}$$

$$L = \frac{140.056 m^2}{114 * 16 * \pi * 0.0054356 m}$$

$$L = 4.497 m$$

Se utiliza una disposición de triángulo equilátero

$$\frac{St}{D_{ext}} = \frac{0.00793}{0.00635} = 1.25$$

St	0.0079375	SI	0.00687
		2*SI	0.01375

Estimamos el diámetro de la carcasa

$$D_c = St \sqrt{\frac{4N}{\pi}}$$

$$D_c = 0.0079375 \sqrt{\frac{4 * 16 * 114}{\pi}}$$

$$D_c = 0.383m$$

CORREGIDO

$$D_c = 0,42m$$

Tomamos una distribución de 10 tubos y 9 tubos.

Ls	0.172m
Nbaffle	42
Ls	0.105m
Vaceite	0.16m/s
Vmax	0.803m/s
Red	22.027

Cálculos:

$$L_s = 0.45 * D_c$$

$$L_s = 0.45 * 0.42$$

$$L_s = 0.172 \text{ m}$$

$$N_{baffle} = \frac{L_{tubo}}{L_s}$$

$$N_{baffle} = \frac{4.497m}{0.172}$$

$$N_{baffle} = 25.122$$

seleccionamos 42

$$L_s = \frac{L_{tubo}}{166} - \text{espesor baffle}$$

$$L_s = \frac{4.497m}{166} - 3.00E - 03m$$

$$L_s = 0.105m$$

$$V_{aceite} = \frac{m_{aceite}}{\rho_{aceite} * St * 8 * L_s}$$

$$V_{aceite} = \frac{1.167 \text{ Kg / s}}{875.155.63 \text{ Kg / m}^3 * 0.00793 * 8 * 0.105m}$$

$$V_{aceite} = 0.16 \text{ m/s}$$

$$V_{max} = \frac{V_{aceite} * St}{St - D_{ext}}$$

$$V_{max} = \frac{0.16m / s * 0.0079}{0.0079 - 0.00635}$$

$$V_{max} = 0.803 \text{ m/s}$$

$$R_{ED} = V_{max} * D_{int} * \frac{\rho}{\mu}$$

$$R_{ED} = 0.803m / s * 0.0054356m * \frac{875.155 \text{ Kg / m}^3}{0.203 \text{ Ns / m}^2}$$

$$R_{ED} = 22.027$$

Calculo de he		ZHUKAUSKAS	
C	0.9	m	0.4
Nud	4.465		
he	101.325		
Calculo de hi		GNIELINSKI	
Red	3612.389		
f	0.043		
Nud	15.337		
hi	1753.877		

$$Nud = C * Re d^{0.4} Pr^{0.36}$$

$$Nud = 0.9 * 22.027^{0.4} * 2.754^{0.36}$$

$$Nud = 4.465$$

$$he = \frac{Nud * K}{D_{ext}}$$

$$he = \frac{4.465 * 0.1441 W / mK}{0.006535 m}$$

$$he = 101.325 W/m^2 K$$

$$f = (0.79 * Ln(Re d) - 1.64)^{-2}$$

$$f = (0.79 * Ln(3612.389) - 1.64)^{-2}$$

$$f = 0.043$$

$$Nud = \frac{(f/8) * (Re d - 1000) Pr}{1 + 12.7 * (f/8)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)}$$

$$Nud = \frac{(0.043/8) * (3612.389 - 1000) 5.084}{1 + 12.7 * (0.043/8)^{1/2} * (5.084^{2/3} - 1)}$$

$$Nud = 15.337$$

$$hi = \frac{Nud * K}{D_{int}}$$

$$hi = \frac{15.337 * 0.6216 W / mK}{0.0054356 m}$$

$$hi = 1753.878 W/m^2 K$$

Rf agua	0.002
Rf aceite	0.0009
K acero	15.1

1/U	0.0118
U	84.627

Calculo del coeficiente global de transferencia de calor

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{hi} + \frac{R_{agua} * D_{int} * Ln(D_{ext}/D_{int})}{2K_{acero}} + \frac{R_{aceite} * D_{int}}{D_{ext}} + \frac{D_{int}}{D_{ext} * he}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{1753.878 W/m^2 K} + \frac{0.002 * 0.00544 m * Ln(0.00635 m / 0.00544 m)}{2 * 15.1} + \frac{0.0009 * 0.00544 m}{0.00635 m} + \frac{0.00544 m}{0.00635 m * 101.325 W/m^2 K}$$

$$\frac{1}{U} = 0.00682$$

$$U = 84.627 W/m^2 K$$

Para determinar el factor de fricción				
ε	4.60E-05	STREETER	PAG 293	ACERO COMERCIAL
f	4.1330E-02	ERROR COLEBROOK	4.3198E-01	
f	4.1400E-02	ERROR COLEBROOK	4.2737E-01	
interp	4.7901E-02	factor de fricción		

Perdidas dentro del agua

Perdida de altura por Darcy-Weisbach	
Longitud codo	7.0922E-02
Longitud union	0.04
longitud total tubo	4.6075E+00
hf	8.417233686 m
ΔP	82045.89446 Pa

$$hf = f \frac{L_{tubo_total} * N * V^2}{2 * g * D_{int}}$$

$$hf = 4.790E-02 \frac{4.607.m * 16 * (0.442m / s)^2}{2 * 9.8m / s^2 * 0.0054356m}$$

$$hf = 8.417m$$

$$\Delta P = hf * g * \rho$$

$$\Delta P = 8.417 m * 9.8 m / s^2 * 995.0249 Kg/m^3$$

$$\Delta P = 82045.894 Pa$$

Perdida de presion por metodo libro MECANICA TECNICA		
conv m-ft	3.2808	
conv kg/m^3-lb/ft^3	0.0624	
conv m/s-ft/h	11,811	
conv lb/ft^2-Pa	47.88	
ΔP	92.6800	lb/ft^2
ΔP	4,438	Pa
Eficiencia		
Cr	0.471493538	
NTU	5.854536202	
ε1	0.775045134	
ε4	0.984207166	

Calculo de perdida de presión. Perdidas en coraza. (aceite)

$$\Delta P = \frac{0.24 * L_{tubo} * D_{car} * \rho_{aceite} * (0.6 * V_{aceite})^2}{g_c * L_s * S_t}$$

$$\Delta P = \frac{0.24 * 0.42 * (815.155 * 0.0624) * [0.6 * (0.16 * 11.811)]^2}{417000000 * 0.105 * 0.0079}$$

$$\Delta P = 91,4940 lb/ft^2$$

$$\Delta P = 4.438 Pa$$

donde g_c corresponde a la constante gravitacional equivalente a $4.17E+08$ para la velocidad en pies/h y la densidad en lb/ft^3

$$Cr = \frac{Cp_{aceite} * m_{aceite}}{Cp_{agua} * m_{agua}} = \frac{1969.9J / KgK * 1.16kg / s}{4178J / KgK * 1.06kg / s}$$

$$Cr = 0.5185$$

$$NTU = \frac{UA_{conv}}{C_{min}} = \frac{82.3448W / m^2K * 140.055m^2}{1969.9J / kgK * 1.16kg / s}$$

$$NTU = 5.8545$$

$$\epsilon_1 = \frac{2 * (1 + Cr + (1 + Cr^2)^{1/2} * 1 + \exp(-Ntu * (1 - Cr^2)^{1/2}))}{(1 - \exp(NTU * (1 + NTU^2)))^{-1}}$$

$$\epsilon_1 = 0.75$$

$$\epsilon_4 = (((1 - \epsilon_1 * Cr) / (1 - \epsilon_1))^4 - 1 * (((1 - \epsilon_1 * Cr) / (1 - \epsilon_1))^4 - Cr)^{-1}}$$

$$\epsilon_4 = 0,98$$

COMENTARIOS

Se selecciono un intercambiador de cuatro carcasas, pues este me ofrece, a diferencia del intercambiador de tres carcasas, un coeficiente de corrección mayor, lo que me exige un área de convección mucho menor. Aunque es cierto, haría mas costoso el intercambiador

El valor de coeficiente global de transferencia de calor que se obtuvo no esta en el intervalo de valores que propone la bibliografía, que debe ser entre 110 y 350 W/mK. Para las condiciones iniciales planteadas no nos fue posible conseguir un diseño, que no solo cumpliera esas condiciones, sino que además, cumpliera las condiciones de caída de presión, que deben ser menores a las caídas de presión de cada fluido, además de tener una eficiencia lo mas elevada posible, que para nuestro caso fue excelente, de un 100%.

Además, de cumplir con las condiciones mecánicas, que las superamos de una forma holgada, como también la distancia entre los deflectores, que fue la variable mas influyente en nuestro diseño, que siguiendo la recomendación de Button, Hatter y Singleton en una recopilación de Heat Exchangers, realizada para la Gulf Science & Technology Company, la distancia mínima entre deflectores debe ser siempre mayor a 4 pulgadas, es decir, de 10,16cm, lo que nos reducía siempre nuestro valor de coeficiente global.

Se experimento disminuyendo la distancia entre los deflectores, y se obtenían valores de coeficiente globales de transferencia de calor, muy parecidos a la recomendada por la bibliografía, sin embargo, teníamos que cumplir con esa recomendación.

Igualmente se seleccionaron 114 tubos por paso, pues notamos que para valores menores a 100 tubos el valor de las perdidas de presión del agua (que pasa por los tubos) era muy grande, lo que era peligroso, pues si la perdida de presión era muy grande, corríamos el riesgo que el fluido quedara estancado dentro del intercambiador, mientras que para valores mas grandes de tubos, digamos mayores a 180-200, el valor de coeficiente global lograba un tope y este comenzaba a disminuir, lo que no beneficiaba nuestro diseño. La perdida de presión fue resuelta mediante la relación de Darcy – Weisbach. Se considero tanto la longitud del tubo, como también el efecto de los codos, aunque de una forma mucho mas genérica.

Para el estudio de la perdida de presión en la carcasa se utilizo una expresión tomada del libro de Mecánica Técnica. En este caso, obteníamos presiones relativamente bajas, lo que no nos trajo muchos problemas en el caso del diseño.

Nuestra recomendación seria cambiar alguna condición inicial del agua, ya sea la temperatura inicial, o también el flujo másico del agua, esto aumenta la capacidad calorífica del agua, lo que da al diseñador mas holgura en el momento de realizar el diseño. Una solución podría ser, la instalación de una bomba que introduzca el agua a una mayor velocidad.