EFECTOS TERMICOS PRODUCIDOS POR LAS INCRUSTACIONES

Considerando la transferencia térmica en u
intercambiador de calor de tubos concéntricos (Fig. 3), s
pueden mencionar tres tipos en mecanismos de transmisión
de calor, cuando el equipo está limpio:

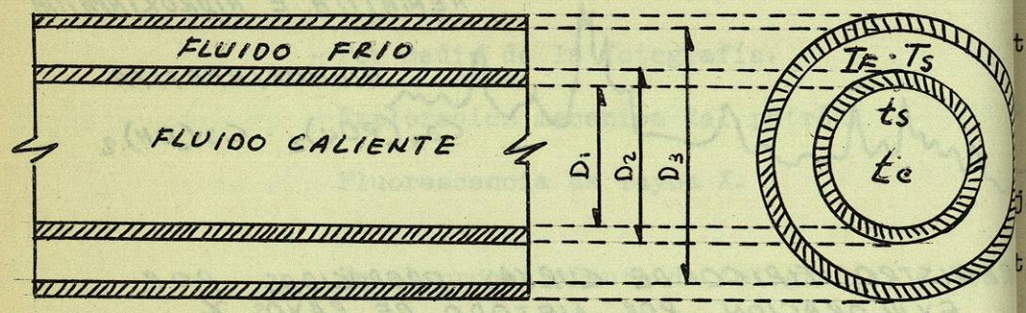

Figura No. 3 Sección Longitudinal de un
Cambiador de Calor de Tubos Concéntricos.

1.- Convección para fluídos viajando dentro de tubos con cambio de fase o sin ella: Ecuación de Newton.

$$q_1 = h_1 dA_1 (t_c - t_s) \qquad (A)$$

2.- Conducción a través del material de la pared del tubo.

$$q_{COND} = \frac{k_m dA_{mlog} (t_s - T_s)}{X} \qquad (B)$$

3.- Convección para fluídos viajando fuera de tubos -- con cambio de fase o sin ella.

$$q_2 = h_2 dA_2 (T_s - T_f) \qquad (C)$$

Tomando en cuenta un régimen permanente de - transferencia térmica se establece:

$$q_1 = q_{cond} = q_2 = q$$

De las ecuaciones anteriores se pueden despe jar las diferentes caídas de termperatura que operan en la transferencia térmica.

De la ecuación A:

$$t_c - t_s = q \left(\frac{1}{h_1 dA_1} \right)$$

De la ecuación B:

$$t_s - T_s = q \left(\frac{X}{k_m dA_{mlog}} \right)$$

De la ecuación C:

$$T_s - T_f = q \left(\frac{1}{h_2 dA_2} \right)$$

Si se suman las deltas T de las ecuaciones - , B, C, se tendrá la siguiente ecuación:

$$t_c - T_f = q \left[\frac{1}{h_1 dA_1} + \frac{X}{k_m dA_{mlog}} + \frac{1}{h_2 dA_2} \right] \qquad (D)$$

De la anterior ecuación se despeja la velo
dad de transferencia térmica en el equipo:

$$q = \frac{t_c - T_f}{\frac{1}{h_1 dA_1} + \frac{X}{k_m dA_{mlog}} + \frac{1}{h_2 dA_2}} \qquad (E$$

La anterior ecuación corresponde a un mode
flujo, es decir cumple con la condición de que todo flujo
de energía es igual al cociente entre un potencial guiado
y una resistencia. Se deduce que:

Flujo Calorífico = q

Potencial Térmico = $t_c - T_f = \Delta T$

Resistencia Térmica total = $\frac{1}{h_1 dA_1} + \frac{X}{k_m dA_{mlog}} + \frac{1}{h_2}$

Considerando que:

Resistencia total = Suma de la resistencias
arciales. Se deduce de la anterior ecuación, tres tipos de
esistencia térmica:

$R_1 = \frac{1}{h_1 dA_1}$ =

$R_{cond} = \frac{X}{k_m dA_{mlog}}$ = Resistencia térmica a la conducción.

$R_2 = \frac{1}{h_2 dA_2}$ = Resistencia térmica a la convección para fluí
dos viajando fuera de tubos.

abiendo que U es una conductancia térmica global, esta se-
á igual a la inversa de la suma de la resistencias térmicas:

$$U = \frac{1}{R_1 + R_{cond.} + R_2} \qquad (F)$$

Por lo tanto, en equipo de transferencia tér
ica limpio cuando menos hay tres resistencias. Pero cuando
os fluídos en operación han logrado ensuciar e incrustar -
as superficies del equipo, se generan nuevas resistencias
érmicas ocasionadas por las costras de incrustación deposi

tadas tanto en las superficies internas y externas de los tubos.

Luego el valor de U se verá disminuído y por lo tanto la velocidad de transferencia térmica también.

El nuevo valor de U será:

$$U = \frac{1}{R_1 + R_{i1} + R_{cond.} + R_{i2} + R_2} \qquad (G)$$

Los valores de las resistencias térmicas producidas por las costras de incrustación interior y exterior serán:

$$R_{i1} = \frac{1}{f_1 da_1}$$

$$R_{i1} = \frac{1}{f_2 da_2}$$

De la ec para calcular la velocidad de transferencia térmica:

$$q = \frac{A \Delta T}{\frac{1}{U}} \qquad (H)$$

Se deduce que la resistencia térmica global, en el equipo sucio sería:

$$\frac{1}{U} = R_1 + R_{i1} + R_{cond} + R_{i2} + R_2 \qquad (I)$$

McCabe 12, presentó uno de los primeros estudios para relacionar el coeficiente global de transmisión de calor, con el tiempo, la ecuación de McCabe fué desarrollada para describir el fenómeno de ensuciamiento de los tubos de un evaporador, partiendo de la consideración de que el espesor de la incrustación era proporcional al calor total transferido.

La ecuación de McCabe es:

$$\frac{1}{U} = b + a\theta$$

$$\left.\begin{matrix} a \\ b \end{matrix}\right\} = constantes. \qquad (J)$$

Conjuntamente con McAdams, Sieder sugiere el uso de un coeficiente de ensuciamiento ó incrustación el cual es escogido suficientemente grande, tomando en cuenta la probable resistencia térmica de la incrustación que se generará durante la vida útil del equipo. No se pretendió poner este coeficiente de incrustación en función del tiempo.

Kern 10, ha aproximado el problema considerando que el espesor de la incrustación aumenta a un valor finito asintoticamente y en una forma exponencial y, la ecuación resultante es:

$$\left(\frac{1}{U}\right)_{FINAL} = \left(\frac{1}{U}\right)_{INICIAL} + R^{*}\left(1 - e^{-B\theta}\right) \qquad (K)$$

El mecanismo propuesto por Kern es que la velocidad de depositación de la incrustación es razonablemente constante.

Al mismo tiempo que el espesor de la incrustación aumenta, parte de ella va siendo removida o arrastrada por la acción del corte del flujo de fluído sobre la película estacionaria en contacto con la pared del tubo.

Eventualmente la velocidad de remoción de la incrustación iguala la velocidad de depositación, así que la velocidad neta de formación de incrustación (es decir, el espesor de la incrustación ha aumentado a su valor constante). El valor asintótico del espesor de la incrustación sería una función inversa del nivel de turbulencia en el flujo de fluídos, puesto que la turbulencia es uno de los factores más importantes en determinar la velocidad de remoción de la incrustación.

Es por lo tanto, correcto, asegurar que el espesor de la incrustación será menor a mayores velocidades de flujo de fluído.

Luego si la conductividad térmica de la incrustación permanece aproximadamente constante, la resistencia global térmica final:

$$\left(\frac{1}{U}\right)_{FINAL} = \left(\frac{1}{U}\right)_{INICIAL} + m\theta \qquad (L)$$

Si la anterior ecuación es aplicable, el coeficiente "m" describe la velocidad de aumento de la —

resistencia térmica la cual es directamente proporcional a la velocidad de crecimiento de la incrustación.

Hay que aclarar, que la anterior ecuación da una idea aproximada y concisa de la relación de resistencia térmica global con el tiempo, es necesario comentar la existencia de otros factores que influyen como son la temperatura, pH, composición del fluído etc.

Para describir completamente la velocidad de cambio del coeficiente global de transferencia de calor, se requiere formular una ecuación que incluya todas las variables que afectan la incrustación y la corrosión, y no solamente la variable tiempo.

Se concluye que la presencia de incrustaciones en equipo de transferencia térmica ocasiona una disminución de la eficiencia de transmisión de calor y de la capacidad de flujo de fluídos.

Para lograr mantener un flujo de calor constante en equipo incrustado, es necesario incrementar el potencial térmico, pudiendo ser éste el origen de los sobrecalentamientos ocasionados en determinados puntos del equipo produciendo fracturas del material.

N O M E N C L A T U R A

A = Area de Transferencia de Calor (piés^2)

dA_{mlog} = Diferencial del área media logarítmica (piés^2)

dA_1 = Diferencial del Area de Transferencia Térmica de la Superficie Interna del Tubo Interior (piés^2).

dA_2 = Diferencial del Area de Transferencia Térmica de la Superficie Externa de Tubo Interior (piés^2).

a = Un Exponente

B = Una Constante

c = Una Constante

c' = A Concentración de Suciedad en Consistencia con K_1

D_1 = Diámetro Interno del Tubo Interior (pulgadas)

D_2 = Diámetro Externo del Tubo Interior (pulgadas)

D_3 = Diámetro Interior del Tubo Exterior (pulgadas)

f = Factor de Fricción (Adimensional)

f_1 = Coeficiente de Ensuciamiento e Incrustación par
fluídos Viajando dentro de Tubos (BTU/hora-pié^2

f_2 = Coeficiente de Ensuciamiento de Incrustación pa
fluídos Viajando fuera de Tubos (BTU/hora-pié^2-

g = Constante Gravitacional (piés/horas^2)

h_1 = Coeficiente fílmico a la convección forzada para
fluídos viajando dentro de tubos (BTU/hora-pié^2

h_2 = Coeficiente fílmico a la convección forzada para
fluídos viajando fuera de tubos (BTU/hora-pié^2-

k_m = Conductividad térmica del material (BTU/hora-pié

K_1, K_2 = Constantes

K_f = Constante de Blasius

L = Longitud del Tubo (piés)

dL = Diferencial de Longitud

M, N = Términos de Sustitución

q = Velocidad de Flujo de Calor (BTU/hora)

q_1 = Velocidad de Transferencia Térmica por Convecció
para fluídos viajando dentro de tubos (BTU/hora).

q_{cond} = Velocidad de Transferencia Térmica por conducción a través de una pared (BTU/hora).

q_2 = Velocidad de Transferencia Térmica a la Convección para fluídos viajando fuera de tubos - (BTU/hora).

ΔP = Caída de Presión (Libras/pié^2)

$\Delta P_1^* \Delta P_2^*$ = Valores Comparativos de las Caídas de Presión (Libras/piés^2).

R = Resistencia de la Suciedad transitoria - $\frac{\text{(Hora-pié}^2\text{-°F)}}{\text{BTU}}$

t_c = Temperatura promedio del fluído caliente (°F)

t_s = Temperatura Promedio de la superficie interna del tubo interior (°F)

T_s = Temperatura promedio de la superficie externa del tubo interior (°F)

T_f = Temperatura promedio del fluído frío (°F)

ΔT = Diferencia de Temperatura (°F)

U = Coeficiente Global de Transferencia de Calor - (BTU/hr-pié^{2}F).

V = Velocidad (piés/hora)

W = Gasto en Masa Constante (Libras/hora)

x_1^*, x_2^* = Valores Comparativos del espesor de la película de Suciedad e incrustación.

X = Espesor de la pared del tubo (pulgadas)

θ = Tiempo

μ = Viscocidad (Libras/pié-hora)

ρ = Densidad (Libras/pié^3)

τ = Esfuerzo al Corte (Libras/pié^2)

Subíndices.-

0 = Tiempo 0

θ = Tiempo Finito

Exponente.-

* Característica de la Asíntota.

B I B L I O G R A F I A

1.- Badger Walter R. and Banchero Julius T. "Introduction to Chemical Engineering" P. 117-127. McGraw-Hill Book Company, Kogakusha (1965).

2.- Brown George G. y Asociados "Operaciones Básicas de la Ingeniería Química". Editorial Marín, S. A. p.- 437-481 (1963).

3.- Clarke, F.E. and Hopkins, Robert D. "Significance of Boiler Deposit Analysis", Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 46 No. 5, P. 979-982, (1954).

4.- Dewrance, John, "Corrosiòn of Boilers", Power Journal, Mar. 29, (1921) p. 525.

5.- de Schulten, A. "Sur la Reproduction de l'analcime, Bull, Soc. Franc. Mineral 5:7 (1882).

6.- Doelter, C. IV Minerogenese und Stabilitatsfelder - der Minerale die Analcimbildung, Mineralog. U. Pe-- trog, Mitt, 25: 111 (1906)