

METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL PERÍODO ÓPTIMO DE LIMPIEZA DE INTERCAMBIADORES DE CALOR UTILIZANDO EL CRITERIO DEL COSTO MÍNIMO

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE OPTIMAL CLEANING PERIOD OF HEAT EXCHANGERS BY USING THE CRITERIA OF MINIMUM COST

Yanileisy Rodríguez Calderón¹, Rafael Goytisoló Espinosa^{2}
y Carmen Lillian Rodríguez Pérez²*

¹ Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez" Cuatro Caminos, Cienfuegos 59430, Cuba.

² Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cuatro Caminos, Cienfuegos 59430, Cuba.

Recibido: Noviembre 24, 2014; Revisado: Enero 6, 2015; Aceptado: Febrero 7, 2015

RESUMEN

Uno de los problemas más serios que presenta la Industria de Procesos en general es que no se aplican al planificar los mantenimientos de los Equipos Intercambiadores de Calor en general, metodologías basadas en criterios económicos para optimizar los períodos de limpieza de las superficies de transferencia de estos, lo que ocasiona gastos complementarios para la Empresa y para el país. En el trabajo se desarrolla y propone una metodología basada en el Criterio del Costo Mínimo para la determinación del período óptimo de limpieza. Se da un ejemplo de aplicación de este criterio para el caso de los enfriadores intermedios de un compresor centrífugo con un nivel elevado de ensuciamiento, pues se utiliza agua de mar con presencia de numerosos microorganismos como agente enfriante lo que incrusta severamente las superficies de transferencia del lado del agua. La metodología empleada puede ser generalizada en otras aplicaciones

Palabras clave: intercambiadores de calor, ensuciamiento, período óptimo de limpieza.

Copyright © 2015. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Rafael Goytisoló, Email: ragoyti@ucf.edu.cu

ABSTRACT

One of the most serious problems of the Process Industry is that when planning the maintenance of the heat exchangers is not applied the methodologies based on economic criteria to optimize periods of cleaning surfaces resulting in additional costs for the company and for the country. This work develops and proposes a methodical based on the criterion of Minimum Cost for determining the optimal cleaning period. It is given an example of application of this method to the case of intercoolers of a centrifugal compressor with a high fouling level. It occurs this because is used sea water with many microorganisms as cooling agent which severely embeds transfer surfaces of side water. The methodology employed can be generalized to other applications.

Key words: heat exchangers, fouling, cleaning optimum period.

1. INTRODUCCIÓN

En el Programa de Desarrollo de las Fuentes Nacionales de Energía (C.N.E. 1993) se recalca la necesidad de elevar la eficiencia energética y la apropiada explotación de los equipos e instalaciones, así como los mantenimientos oportunos y de mayor calidad, ya que estas medidas pueden dar resultados con inversiones menores y de rápida recuperación. En la Industria en General uno de los problemas que se presenta es el ensuciamiento de las superficies de los intercambiadores enfriadores de calor tanto del lado del gas como del agente enfriante. Este proceso de incrustaciones de las superficies conduce a la disminución de la capacidad de los enfriadores y en el fluido a enfriar se eleva la temperatura lo que representa generalmente un incremento de la energía consumida en el proceso. La mayoría de los trabajos de investigación que abarcan la dinámica del proceso de ensuciamiento han sido investigados para los derivados del petróleo: Fassbender (1985); Crittenden (1987). Con agua han sido desarrollados modelos por: Aleksandrov (1973); Dungi (1986); (Lahm y Knudsen, 1986); Knudsen (1984); (Berman y col. 1984). Se han desarrollado investigaciones asociadas al proceso de ensuciamiento provocado por productos de la corrosión Collier (1986); Somerscales (1987). En la literatura más reciente se trabaja la optimización económica pero no se hace ningún énfasis en el ensuciamiento en este sentido Taborek (2002); (Caputo et al., 2008); (Guo et al., 2009).

Cuando se evalúa la explotación y el mantenimiento de una instalación industrial cualquiera, como regla se considera que cada una de las alternativas a evaluar responde a un diseño técnico económicamente óptimo. Sin embargo, la determinación del diseño técnico económico óptimo es por sí mismo un problema que requiere cuidadosa atención, tanto por el ingeniero de mantenimiento como por aquellos que realicen la evaluación económica de las alternativas, ya que en ocasiones no son dos o tres, sino un número muy grande de alternativas las que deben compararse. Numerosos casos en la práctica involucran simultáneamente costos que aumentan y otros que disminuyen con un mismo tipo de variación de la magnitud de una variable común. Si existe una relación entre esos costos y la variable, como el costo total está constituido por la suma de esos costos, es lógico pensar que existirá un valor de la variable para la cual el costo total sea mínimo y esta será la alternativa óptima (Portuondo, 2006).

El Objetivo del trabajo es ilustrar la aplicación del Criterio del Costo Mínimo en la determinación del período óptimo de limpieza de los enfriadores de un compresor centrífugo con enfriamiento externo (Figura 1). En este caso si los enfriadores no se limpian sistemáticamente, el consumo de energía aumenta con el tiempo de explotación ya que la temperatura del aire comprimido aumenta y esto implica mayor demanda de energía en el compresor, sin embargo, el costo de mantenimiento disminuye con el tiempo pues simplemente se gasta menos en limpieza. El costo total de explotación del compresor, que es la suma de ambos costos, tendrá un mínimo para un determinado período de tiempo que será precisamente el período óptimo de limpieza de los enfriadores.

Esto se muestra en la Figura 1, donde la Curva I muestra precisamente el incremento del costo de producción del aire comprimido y la Curva II la disminución de los costos de limpieza. El costo total, curva III, que es la suma de ambos tiene su mínimo en la que constituye el período óptimo de Limpieza de los enfriadores del compresor.

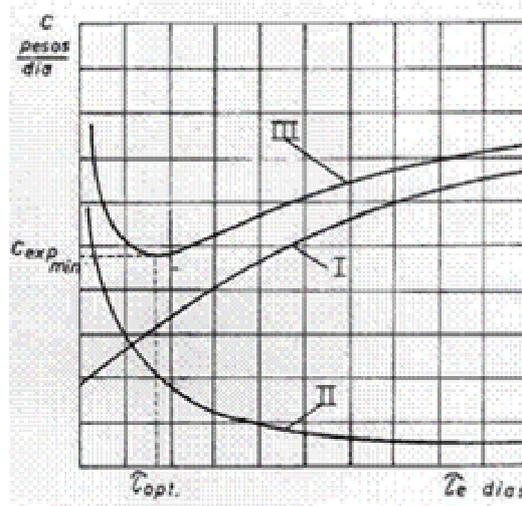


Figura 1. Determinación del período óptimo de limpieza de los enfriadores intermedios de un compresor centrífugo utilizando el criterio del Costo Mínimo

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Cálculo del costo promedio diario de explotación.

Uno de los factores que más incide en la economía de las instalaciones de compresión es la insuficiencia del enfriamiento del aire en los enfriadores intermedios, a causa de las incrustaciones depositadas en las superficies de transferencia, tanto del lado del aire como del agua. El ensuciamiento de los enfriadores se refleja directamente en el incremento del costo de explotación, de aquí la necesidad de determinar los plazos racionales para su limpieza.

El procedimiento para determinar el período óptimo de limpieza de un intercambiador de calor se ilustrará para el caso de los 3 enfriadores intermedios de un compresor centrífugo accionado por turbina de vapor y enfriado por agua de mar. Para poder hallar el período óptimo de limpieza de los enfriadores intermedios de un compresor se necesita calcular el costo promedio diario de explotación y para poder determinar el costo promedio diario de explotación es necesario conocer cómo se modifican los parámetros de entrega y consumo del compresor en el tiempo de explotación τ_e , o sea,

es necesario conocer las dependencias del flujo de gas en kg/día, entregado por el compresor: $G' = f(\tau_e)$ y su consumo específico de energía en kW-hr/día: $\omega = f(\tau_e)$ a causa del ensuciamiento de los enfriadores. Es evidente que si durante la explotación el compresor puede ser regulado para abastecer los requerimientos de la red en condiciones de ensuciamiento de los enfriadores, la potencia consumida por éstos se incrementará a causa de las deficiencias en el enfriamiento del gas, sin embargo, tal como se refleja en la literatura (Berman y col. 1984) y como lo demuestran los experimentos realizados por Aleksandrov (1973), el espesor de la capa de incrustaciones tiende a estabilizarse con el tiempo de explotación, de aquí que las funciones $G' = f(\tau_e)$ y $\omega = f(\tau_e)$ tendrán este mismo comportamiento. En general se puede suponer que las dependencias anteriores tienen el carácter que se muestra en la Figura 2.

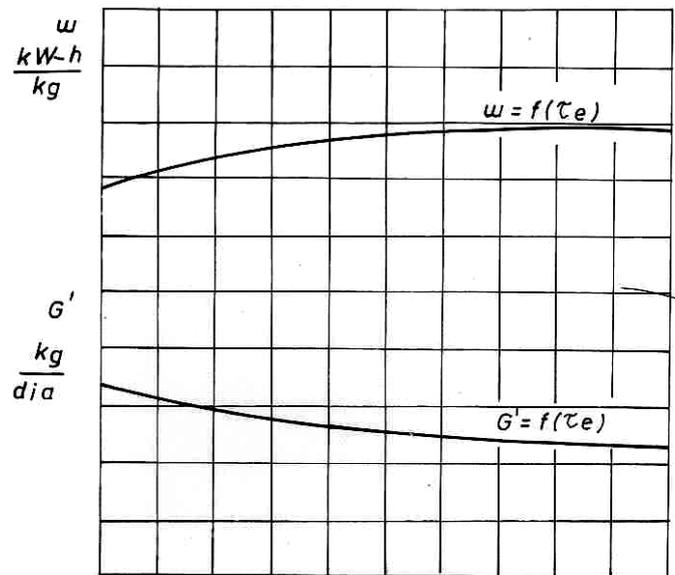


Figura 2. Dependencias del consumo específico de energía en kW – hr/kg y de la entrega de aire comprimido en kg/día del compresor

Para una función continua cualquiera:

$$\bar{y} = \frac{\int_a^b f(x)dx}{b-a} \tag{1}$$

La integral $\int_a^b f(x)dx$ independientemente del carácter de la función se puede obtener por el método de los trapecios. De aquí que los valores medios del consumo específico y el flujo medio del compresor se puedan hallar por las expresiones:

$$\omega_{d_m} = \frac{1}{2n} (\omega_0 + 2 \omega_1 + \dots + 2 \omega_{n-1} + \omega_n) \tag{2}$$

$$G'_{d_m} = \frac{1}{2n} (G'_0 + 2 G'_1 + \dots + 2 G'_{n-1} + G'_n) \tag{3}$$

Donde:

$\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_{n-1}, \omega_n$ y $G'_0, G'_1, \dots, G'_{n-1}, G'_n$ son los valores instantáneos del consumo específico y del flujo del compresor obtenidos para n intervalos igualmente espaciados de tiempo en el período de explotación τ_e .

Según Murzin (1980) el costo promedio diario de producción del aire comprimido se puede hallar, para los compresores centrífugos, por una expresión de la forma:

$$C_{\text{exp}_m} = G'_{dm} (\beta \cdot \omega_{dm} \cdot c_e + c_a) + \frac{Z_e \cdot c_l}{\tau_e} \quad \text{Pesos/día} \quad (4)$$

Donde:

- $G'_{dm} = f(\tau_e)$ - Flujo diario medio de aire entregado por el compresor en kg/día.
- $\omega_{dm} = f(\tau_e)$ - Consumo específico medio diario de energía en kW-hr/kg
- β - Coeficiente de ajuste del incremento del consumo específico medio diario con el tiempo de explotación.
- c_e - Costo del kW-hr de energía en Pesos/kW-hr
- c_a - Costo del aire comprimido en Pesos /kg
- Z_e - Número de enfriadores de aire del compresor.
- c_l - Costo de la limpieza de un enfriador en Pesos/enfriador
- τ_e - Tiempo de explotación en días

2.2 Determinación del período óptimo entre limpiezas.

La determinación del período óptimo entre limpiezas puede obtenerse analíticamente de las ecuaciones (1) a (4), si se conocen las funciones: $\omega = f(\tau_e)$ y $G' = f(\tau_e)$, determinando el tiempo τ_e para el cual el costo promedio diario de explotación es mínimo por la condición:

$$\partial C_{\text{exp}} / \partial \tau_e = 0$$

O por la vía gráfica construyendo la curva $C_{\text{exp}} = f(\tau_e)$ y determinando del gráfico el valor de τ_e para el cual se obtiene el $C_{\text{exp}_{\min}}$ como se muestra en la Figura 1.

Está claro que para poder comparar entre sí diferentes condiciones de explotación hace falta tener la posibilidad de apreciar el cambio de los parámetros ω y G' del compresor con el tiempo de explotación, por la vía de la investigación experimental, o mediante el cálculo. Este análisis será realizado a modo de ejemplo para el compresor centrífugo de aire de proceso de fabricación italiana de la firma "Nuovo Pignone" que operaba en una Planta Química. Esta investigación se realizó con posterioridad al proceso de reparación general que se llevó a cabo en dicho compresor, donde se realizó la limpieza mecánica de los enfriadores intermedios del mismo. Se utilizaron los datos existentes en la misma acerca del costo de la limpieza mecánica realizada en los enfriadores. La instalación estaba adecuadamente equipada con instrumentos modernos de medición, de aquí que fuese posible medir todos los parámetros necesarios para obtener las dependencias de $G' = f(\tau_e)$ y $\omega = f(\tau_e)$ requeridas, tal como se explicó anteriormente. Las mediciones experimentales se realizaron durante un período de seis meses a partir del momento en que se inició la explotación del compresor con posterioridad a su reparación. Este compresor está accionado por turbina de vapor y es regulado mediante la variación de la velocidad de giro para mantener la presión de descarga constante durante la explotación. En el mismo el ensuciamiento de los enfriadores del lado del aire es prácticamente nulo

de aquí que la función $G' = f(\tau_e) = \text{const.}$, o sea, en la expresión $G'_{dm} = 711\ 120 \text{ kg/día} = \text{const.}$ Teniendo en cuenta que el costo de la energía consumida por un compresor que opera en el orden de 7 500 h/año es aproximadamente el 87 % del costo total de operación Kaesser (1996), la ecuación (4) para el caso analizado se puede escribir de la forma:

$$C_{\text{expm}} = G'_{dm} \cdot (\beta \cdot \omega_m \cdot \frac{c_e}{0.87} + c_a) + \frac{Z_e \cdot c_l}{\tau_e} \quad \text{Pesos/día} \quad (5)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se muestran los resultados del cálculo del costo unitario de la energía consumida por el compresor c_e y el costo unitario de la limpieza por enfriador c_l .

Tabla 1. Datos necesarios para el cálculo del período óptimo de limpieza de los enfriadores

| <i>Parámetro</i> | <i>Designación y fórmula</i> | <i>U/M</i> | <i>Magnitud del Parámetro</i> |
|---|---|--|----------------------------------|
| <i>Costo de la energía consumida por el compresor</i> | Capacidad del Generador de Vapor que alimenta la turbina | $G_{G.V.}$ | kg vapor/t fuel oil 13 000 |
| | Costo de una tonelada de fuel oil | $c_{t.f.o.}$ | Pesos/ t fuel oil 170,00 |
| | Costo del combustible por kg de vapor | $c_{\text{comb.}} = c_{t.f.o.} / G_{G.V.}$ | Pesos / kg vapor 0, 0131 |
| | Costo de producción de un kg de vapor | $c_{\text{vapor}} = c_{\text{comb}}/0,85$ | Pesos / kg vapor 0,0154 |
| | Consumo específico de la turbina en el período investigado | q_{mt} | kg vapor / kW - hr 4,596 |
| | Costo de la Energía consumida por el compresor | $c_e = c_{\text{vapor}} \cdot q_{mt}$ | Pesos / kW - hr 0,069 |
| <i>Costo de Producción del aire</i> | Salario de los Operadores del Compresor | S_{oc} | Pesos / día 32,88 |
| | Producción promedio diaria de aire comprimido en el período investigado | G'_{dm} | kg aire/día 711 120 |
| | Costo de producción del aire comprimido | $c_a = S_{oc} / 0,8 \cdot G'_{dm}$ | Pesos kg aire 0,0000578 |
| <i>Costo de Limpieza de un enfriador</i> | Salario de los obreros participantes en la limpieza | S_{ol} | Pesos / hr 11,77 |
| | Tiempo de duración de la limpieza | τ_l | hr 76,75 |

| | | | |
|--|------------------------------|-------------------|----------|
| Gastos en salarios en la limpieza de un enfriador | $c_{s.l.}$ | Pesos / enfriador | 903,34 |
| Gastos en barrenas rotas y otros materiales mas la energía consumida en la limpieza (Para el año 1996) | $c_{m y e}$ | Pesos / enfriador | 117,03 |
| Costo total de la limpieza de un enfriador | $c_1 = c_{s.l.} + c_{m y e}$ | Pesos / enfriador | 1 020,37 |

En el costo de producción por kg de vapor se tuvo en cuenta el hecho de que, para una Planta Generadora de vapor industrial, el costo del combustible es aproximadamente el 85% del costo total de operación de la planta. El consumo específico de la turbina se determinó experimentalmente y sobre la base de estos datos se obtuvo el costo de la energía consumida por la misma, sin embargo, para la determinación del consumo específico del compresor fue necesario combinar con cálculos los datos experimentales de presión y temperatura, antes y después de cada sección y de la entrega del compresor, pues al aumentar el tiempo de explotación la potencia consumida por la turbina crece no sólo a causa del ensuciamiento de la superficie de transferencia de los enfriadores, sino también, a causa del ensuciamiento de la superficie del condensador.

En la Tabla 2 se muestran los resultados de los cálculos del costo medio diario de explotación, realizados para diferentes períodos entre limpiezas. Como se aprecia en la Tabla 2 el período óptimo entre limpiezas se corresponde a 60 días, para el cual el costo promedio diario de explotación es mínimo, e igual a: 9 911,01 pesos/día. Si la limpieza no se realiza durante un año, el costo promedio diario de explotación se eleva a 9 986,92 pesos/día, lo que significa que la empresa perderá diariamente 75,91 pesos/día, que implica en 300 días de operación en el año, una pérdida de 22 773 pesos/año. Si la limpieza se realiza con una frecuencia de dos años esta pérdida se eleva a 42 819 pesos/año.

Para establecer un plazo racional para la limpieza de los enfriadores, hay que evaluar estas pérdidas económicas en dependencia de las pérdidas que pueda representar la parada del compresor para realizar la limpieza de los mismos y es posible que convenga, desde el punto de vista técnico-económico modificar este plazo ajustándolo a las paradas programadas para mantenimiento general de la Planta.

Tabla 2. Costo promedio diario de explotación en función del período entre limpiezas de los enfriadores del compresor centrífugo “Nuovo Pignone”

| τ_e días | Potencia media demandada por el compresor en el período τ_e $N_{mc} - kW$ | Consumo específico medio del compresor ω_m kW-h / kg | Costo medio de producción del aire comprimido Pesos / día | Costo medio de la limpieza de los enfriadores del compresor Pesos / día | Costo total de explotación del compresor Pesos / día |
|------------------|---|--|--|--|---|
| 30 | 4 920,9 | 0,1661 | 9 636,30 | 102,04 | 9 938,34 |

| | | | | | |
|-----|---------|--------|-----------|-------|-----------|
| 60 | 4 934,1 | 0,1665 | 9 859,99 | 51,02 | 9 911,01 |
| 90 | 4 943,8 | 0,1669 | 9 883,67 | 34,01 | 9 917,68 |
| 120 | 4 951,8 | 0,1671 | 9 895,52 | 25,51 | 9 921,03 |
| 150 | 4 958,7 | 0,1674 | 9 913,28 | 20,41 | 9 933,69 |
| 180 | 4 064,9 | 0,1676 | 9 925,13 | 17,01 | 9 942,14 |
| 210 | 4 970,3 | 0,1677 | 9 931,03 | 14,59 | 9 945,63 |
| 240 | 4 975,3 | 0,1679 | 9 942,89 | 12,76 | 9 955,65 |
| 270 | 4 980,0 | 0,1681 | 9 954,74 | 11,34 | 9 966,08 |
| 300 | 4 984,3 | 0,1682 | 9 960,66 | 10,20 | 9 970,86 |
| 330 | 4 988,4 | 0,1684 | 9 972,50 | 9,28 | 9 981,78 |
| 360 | 4 002,3 | 0,1685 | 9 978,42 | 8,50 | 9 986,92 |
| 390 | 4 995,9 | 0,1686 | 9 984,35 | 7,85 | 9 992,20 |
| 420 | 4 999,4 | 0,1687 | 9 990,27 | 7,29 | 9 997,56 |
| 450 | 5 002,7 | 0,1688 | 9 996,19 | 6,80 | 10 003,00 |
| 330 | 4 988,4 | 0,1684 | 9 972,50 | 9,28 | 9 981,78 |
| 360 | 4 002,3 | 0,1685 | 9 978,42 | 8,50 | 9 986,92 |
| 390 | 4 995,9 | 0,1686 | 9 984,35 | 7,85 | 9 992,20 |
| 420 | 4 999,4 | 0,1687 | 9 990,27 | 7,29 | 9 997,56 |
| 450 | 5 002,7 | 0,1688 | 9 996,19 | 6,80 | 10 003,00 |
| 630 | 5 020,2 | 0,1694 | 10 031,72 | 4,86 | 10 036,58 |
| 660 | 5 022,8 | 0,1695 | 10 037,64 | 4,64 | 10 042,28 |
| 690 | 5 025,3 | 0,1696 | 10 043,58 | 4,44 | 10 048,00 |
| 720 | 5 027,7 | 0,1697 | 10 049,49 | 4,25 | 10 053,74 |

4. CONCLUSIONES

1. Como se aprecia la Tabla 2 el período óptimo entre limpiezas corresponde a 60 días, para el cual el costo promedio diario de explotación es mínimo, e igual a 9 911,01 pesos/día. Si la limpieza no se realiza durante un año, el costo promedio diario de explotación se eleva a 9 986,92 pesos/día, lo que significa que la empresa perderá diariamente 75,91 pesos/día, que implica en 300 días de operación en el año, una pérdida de 22 773 pesos/año. Si la limpieza se realiza con una frecuencia de dos años esta pérdida se eleva a 42 819 pesos/año.
2. Para establecer el plazo racional entre limpiezas, hay que evaluar estas pérdidas económicas en dependencia de las pérdidas que pueda representar la parada del compresor para realizar la limpieza y es posible que convenga, desde el punto de vista técnico-económico modificar este plazo ajustándolo en lo posible a las paradas programadas para mantenimiento.

REFERENCIAS

Aleksandrov, M.B., Investigación del ensuciamiento de los aparatos intercambiadores de calor., Memorias de los Eventos Científicos del Instituto de Investigación "Khimasha", Rusia, No.7, 1973, pp. 97-102.

- Berman Ya. A., Mankovskii, O.N., Marr, Yu. N., Rafalovich A.N., Sistemas de enfriamiento de las instalaciones compresoras. Leningrado: Editorial Mashinostroenie, 1984, pp. 228.
- Caputo, A.C., Pelagagge, P.M., Salini, P., Heat exchanger design based on economic optimization., Applied Thermal Engineering, Vol. 28, No. 10, 2008, pp. 1151–1159.
- Collier, J.G., Ensuciamiento y corrosión en los intercambiadores de calor. / J.G. Collier En: Heat Exchanger Sources, Washington: Hemisphere Publ. Corp. 1986, pp.721-743.
- Crittenden, D.B., Modelación del ensuciamiento con hidrocarburos., Chemical Engineering Research and Design, Inglaterra, Vol.65, No.2, 1987, pp.171-179.
- C.N.E. Cuba., Comisión Nacional de Energía., Programa de Desarrollo de las Fuentes Nacionales de Energía, La Habana: Editado por C.N.E., Junio, 1993, pp. 78.
- Dungi, Xu., Correlación funcional de la temperatura superficial y velocidad del flujo durante el ensuciamiento de torres de enfriamiento de agua., Heat Transfer Engineering, USA, Vol. 7, No.1, 1986, pp.63-71.
- Fassbender, L., Base de datos sobre el ensuciamiento de los intercambiadores de calor en la industria., Proceedings of the Exposition and Symposium on Industrial Heat Exch. Tech. Pittsburgh, P.A, USA, Nov. 6-8. Publicado por: ASM Energy Div., Metals Park, OH, USA, 1985, pp.227-238.
- Guo, J. F., Xu M.T, Cheng L., The application of field synergy number in shell and-tube heat exchanger optimization design., Applied Energy, Vol. 86, 2009, pp. 2079 - 2087.
- Kaesser, T., Ahorro de recursos en el suministro de aire comprimido. Un problema del sistema., German Pumps, Compressors, Vacuum Pumps'96, 1996, pp.98-104.
- Knudsen, J.G., Ensuciamiento de intercambiadores de calor: ¿Estamos resolviendo el problema?., Chem. Eng. Progr. USA, Vol.80, No.2, 1984, pp.63-69.
- Lahm, L. and Knudsen J.G., Ensuciamiento por precipitación del agua de enfriamiento. En: Heat Exchanger Sources.Washington: Hemisphere Publ. Corp., 1986, pp.779-785.
- Murzin, V.A., Determinación de la efectividad de la limpieza periódica de los enfriadores intermedios de los turbocompresores de las minas., Proceedings Electromecánica y Automática de las Minas, Rusia, No.36, 1980, pp.65-68.
- Portuondo Pichardo, F., Economía de las Empresas Industriales., Segunda Parte, 2006, pp. 581-587.
- Somerscales, E.F., Ensuciamiento de las superficies de transferencia debido a los productos de la corrosión., Journal of Heat Transfer Trans. of the ASME, USA, Vol.109, No.1, 1987, pp.267-271.
- Taborek, J., Shell-and-tube heat exchangers design., Recommended method: principles and limitations, in: G.F. Hewitt (Ed.), HEDH, Begell House, New York, 2002.