V.1.- Se bombea aceite de motor sin usar a 60ºC, a través de 80 tubos que tienen un diámetro de 2,5 cm, y una longitud de 10 m a una velocidad media de 0,6 m/s.
Calcular:
a) La caida de presión a lo largo de los tubos y potencia de bombeo
b) Si cada tubo se calienta eléctricamente a razón de q/A=1000 W/m², hallar la temperatura media de la pared en contacto con el fluido.
Propiedades térmicas del aceite de motor sin usar a 60ºC:
$\rho = 864\ kg/m^3$; $c_{pF} = 2{,}047\ kJ/kg^oC$; $k = 0{,}14\ W/m^oK$; $\nu = 84 \times 10^{-6}\ m^2/seg$; $Pr = 1050$

RESOLUCION

$$Re = \frac{u\,d}{\nu} = \frac{0{,}6 \times 0{,}025}{84.10^{-6}} = 178{,}58 \text{ (laminar)} \qquad \lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64}{178{,}58} = 0{,}3584$$

a) Caída de presión a lo largo de los tubos.

$$P = \frac{\lambda}{d}\,\frac{u_F^2}{2}\,\rho\,L = \frac{0{,}3584}{0{,}025} \times \frac{0{,}6^2}{2} \times 864 \times 10 = 22295\ \frac{kg}{m\ seg^2} = 2275\ \frac{kg}{m^2}$$

Potencia de bombeo total en CV

$$N = G\,P = \left| G = \frac{\pi d^2}{4}\,u_F\,n = \frac{\pi \times 0{,}025^2}{4} \times 0{,}6 \times 80 = 0{,}02356\ \frac{m^3}{seg} \right| = 0{,}02356\ \frac{m^3}{seg} \times 2275\ \frac{Kg}{m^2} =$$

$$= 53{,}56\ \frac{Kgm}{seg} = 0{,}7147\ CV$$

o también, considerando que la resistencia al avance para 1 tubo es:

$$F_{avance} = P\,\frac{\pi d^2}{4} = 2275 \times \frac{\pi \times 0{,}025^2}{4} = 1{,}116\ kg$$

$$N = F_a\,n\,u_F = 1{,}116 \times 80 \times 0{,}6 = 53{,}56\ \frac{Kgm}{seg}$$

Coeficiente de resistencia al avance del aceite:

$$F_a = 1{,}116\ kg = \frac{1}{2}\,C_w\,\rho\,u_F^2\,A_L = \frac{C_w}{2} \times 864\ \frac{kg}{m^3} \times 0{,}6^2\ \frac{m^2}{seg^2} \times (\pi\,d\,L)\ m^2 \times \frac{1}{g\ (m/seg^2)} = 12{,}46\ C_w$$

$$C_w = \frac{1{,}116}{12{,}46} = 0{,}08946$$

También se podía obtener sabiendo que: $\left| \begin{array}{l} 2\,\pi_2 = C_w \\ 8\,\pi_2 = \lambda \end{array} \right|$ $\qquad \lambda = 4\ C_w \ ;\ C_w = \frac{\lambda}{4} = \frac{0{,}3584}{4} = 0{,}0896$

b) Cada tubo se calienta eléctricamente a razón de q/A=1000 W/m²; la temperatura media de la pared en contacto con el fluido se determina en la siguiente forma.- Para flujo completamente desarrollado en tubo circular $L \to \infty$, con flujo de calor constante desde la pared:

$$\frac{L}{d} = \frac{10}{0{,}025} = 400 >>$$

Para Q/A uniforme y distribución de velocidades parabólica (régimen laminar):

$$Nu = 4{,}3636 = \frac{h_C\,d}{k} \ ;\ h_C = \frac{4{,}3636 \times 0{,}14}{0{,}025} = 24{,}43\ \frac{W}{m^2.^oC}$$

$$T_{pi} = T_F + \frac{q/A}{h_C} = 60 + \frac{1000\ (W/m^2)}{24{,}43\ (W/m^2\ ^oC)} = 100{,}9^oC$$

****

V.2.- Agua, a una temperatura media de 20ºC, se utiliza para refrigerar un flujo de vapor. Si el agua circula a 2 m/seg por el interior de los tubos de 3/4" de diámetro, determinar el coeficiente de transmisión de calor
$\rho = 998{,}2\ kg/m^3$; $c_{pF} = 4{,}182\ kJ/kg^oC$; $k = 0{,}597\ W/m^oK$; $\nu = 1{,}006.10^{-6}\ m^2/seg$; $Pr = 7$

RESOLUCION

$$Re = \frac{u\ d}{\nu} = \frac{2\ (m/seg) \times 0{,}01905m}{1{,}006.10^{-6}\ (m^2/seg)} = 37872$$

$$h_C = 0{,}023\ (\frac{u^{0,8}}{d^{0,2}})\ f_1(T) = |\ f_1(T) = f_1(20ºC) = 74191\ | = 0{,}023\ (\frac{2^{0,8}}{0{,}01905^{0,2}}) \times 74191 = 6560{,}32\ \frac{W}{m^2.ºC}$$

ó también, Dittus-Boelter:

$$Nu = 0{,}023\ Re^{0,8}\ Pr^{0,3} = 0{,}023 \times 37872^{0,8} \times 7^{0,3} = 189{,}6 \qquad h_C = \frac{189{,}6 \times 0{,}597}{0{,}01905} = 5943\ \frac{W}{m^2\ ºC}$$

****

V.3.- Aire atmosférico a la temperatura T_F=285ºK y velocidad u_F=20 m/seg, fluye sobre una placa plana horizontal de longitud L =1,5 m, que se encuentra a una temperatura T_{pF}=341ºK.

Calcular:

a) Las propiedades físicas del aire

b) El coeficiente medio de transmisión de calor en la zona en que la capa límite es laminar.

c) El coeficiente medio de transmisión de calor para toda la placa.

d) La transferencia de calor por metro de anchura de la placa.

RESOLUCION

a)Propiedades físicas del aire, en el supuesto de que la formulación a utilizar requiera propiedades a la temperatura media de película

Propiedades físicas del aire a : $\frac{T_F + T_{pF}}{2} = \frac{285 + 341}{2} = 313ºK$

$$\rho = 1{,}092\ \frac{kg}{m^3}\ ;\ c_{pF} = 1{,}014\ \frac{kJ}{kgºC}\ ;\ \nu = 17{,}6.10^{-6}\ \frac{m^2}{seg}\ ;\ k = 0{,}0265\ \frac{W}{mºC}\ ;\ Pr = 0{,}71$$

b) Coeficiente medio de transmisión de calor en la zona en que la capa límite es laminar

$$x_C = \frac{\nu\ Re_C}{u_F} = \frac{17{,}6.10^{-6}\ (m^2/seg) \times 5.10^5}{20\ (m/seg)} = 0{,}44\ m$$

$$Nu_{medio} = \frac{h_C\ x_C}{k} = 0{,}664\ \sqrt{Re_C}\ Pr^{1/3} = 0{,}664\ \sqrt{5.10^5} \times 0{,}71^{1/3} = 418{,}86$$

$$h_C = \frac{418{,}86 \times 0{,}0265\ \frac{W}{m.ºC}}{0{,}44\ m} = 25{,}23\ \frac{W}{m^2.ºC} \qquad \text{(para: } 0 < x < 0{,}44)$$

c) Coeficiente medio de transmisión de calor para toda la placa.

$$Re_L = \frac{u_F\ L}{\nu_F} = \frac{20\ (m/seg) \times 1{,}5\ m}{17{,}6.10^{-6}\ (m^2/seg)} = 1{,}7045.10^6$$

Al ser la turbulencia desarrollada, se puede prescindir del sumando 9200 en la ecuación:

$$h_{cF} = 0{,}036\ Pr^{0,43}\ \frac{k}{L}\ (Re_L^{0,8} - 9200)\ (\frac{\eta_F}{\eta_{pF}})^{0,25} = \left|\ \text{Para el aire: } \frac{\eta_F}{\eta_{pF}} = 1\ \right| =$$

$$= 0{,}036 \times 0{,}71^{0,45} \times \frac{0{,}0265}{1{,}5} \times (1{,}7045.10^6)^{0,8} = 52{,}95\ \frac{W}{m^2\ ºK}$$

d) Transferencia de calor por metro de anchura de placa

$$q = h_{cF}\ A\ (T_{pF} - T_F) = 52{,}95\ \frac{W}{m^2.ºK} \times (1{,}5 \times 1)\ m^2 \times (341 - 285)ºK = 4450\ W$$

****

V.4.- Aire atmosférico a T_F= 400ºK fluye con una velocidad u_F= 4 m/seg a lo largo de una placa de longitud L= 1 m. La temperatura de la pared se mantiene constante a T_{pF} =300ºK.

El coeficiente medio de transferencia de calor es h_{cF} = 7,75 W/m²ºC

Estimar mediante la analogía de Reynolds-Colburn la fuerza de resistencia por 1 metro de anchura de placa plana.

RESOLUCION

$T = \frac{400 + 300}{2} = 350ºK \qquad \rho = 0{,}998\ \frac{kg}{m^3}\ ;\ c_{pF} = 1{,}009\ \frac{kJ}{kgºC}\ ;\ Pr = 0{,}697$

$$\frac{C_w}{2} = \frac{h_{cF}}{\rho\, c_{pF}\, u_F}\, Pr^{2/3} = \frac{7{,}75\ W/m^2\ ºC}{0{,}998\ (kg/m^3) \times 1{,}009\ (kJ/kgºC) \times 4\ (m/seg)} \times 0{,}697^{2/3} = 0{,}00151$$

$$F_a = \frac{\rho\, C_w u_F^2\ (L \times a)}{2} = 0{,}998\ \frac{kg}{m^3} \times 4^2 \frac{m^2}{seg^2} \times 1{,}51.10^{-3} \times (1 \times 1)\ m^2 = 0{,}024\ \frac{m\ kg}{seg^2} = 0{,}024\ N$$

****

V.5.- El cárter de un automóvil tiene las siguientes dimensiones: Longitud, 0,6 m; anchura, 0,2 m ; profundidad, 0,1 m

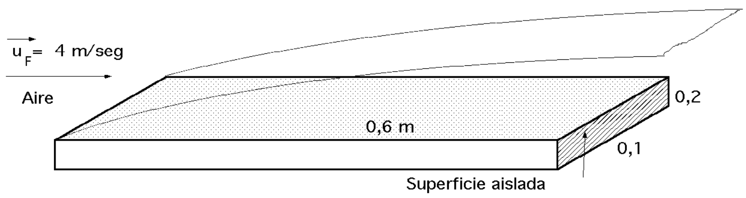
Suponiendo que el cárter tiene una temperatura superficial de 350°K, determinar la pérdida de calor a la atmósfera, por unidad de tiempo, sabiendo que ésta se encuentra a 3°C para una velocidad del vehículo de 30 m/seg.

Se supondrá que la capa límite es turbulenta en toda la superficie; el coeficiente de transferencia de calor h_C se supondrá constante para cualquier dirección.

RESOLUCION

Propiedades físicas del aire

$T = \frac{350 + 276}{2} = 313ºK \qquad \rho = 1{,}092\ \frac{kg}{m^3}\ ;\ \nu = 17{,}6.10^{-6}\ \frac{m^2}{seg}\ ;\ k = 0{,}0265\ \frac{W}{mºC}\ ;\ Pr = 0{,}71$



$$Re_L = \frac{u_F L}{\nu_F} = \frac{30\ (m/seg) \times 0{,}6\ m}{17{,}6.10^{-6}\ (m^2/seg)} = 1{,}0227.10^6 \quad \text{(Turbulencia desarrollada)}$$

Al ser la turbulencia desarrollada, se puede prescindir del sumando 9200 en la ecuación:

$$h_{cF} = 0{,}036\ Pr^{0{,}43}\ \frac{k}{L}\ (Re_L^{0{,}8} - 9200)$$

por lo que:

$$h_{cF} = 0{,}036\ .\ Pr^{0{,}43}\ \frac{k}{L}\ Re_L^{0{,}8} = 0{,}036 \times 0{,}71^{0{,}43} \times \frac{0{,}0265}{0{,}6} \times (1{,}0227 \times 10^6)^{0{,}8} = 88{,}15\ \frac{W}{m^2.ºK}$$

$$q = h_{cF}\ A\ (T_{pF} - T_F) = \left| A = 2\ [(0{,}6 \times 0{,}2) + (0{,}6 \times 0{,}1)] = 0{,}36\ m^2 \right| =$$

$$= 88{,}15\ \frac{W}{m^2.ºK} \times 0{,}36\ m^2 \times (350 - 276)ºK = 2348{,}4\ W$$

****

V.6.- Se utiliza una tubería horizontal de cobre, de diámetro 16 mm, para calentar una habitación por convección natural. Por su interior circula agua muy caliente de forma que la temperatura exterior de la tubería sea de 100°C, mientras que se desea que la habitación permanezca a 20°C.

Determinar la cantidad de calor que se disipará por metro lineal de tubería.

RESOLUCION

Temperatura media de la película de aire en la habitación: $T = \frac{100 + 20}{2} = 60ºC$

$\rho = 1{,}025\ \frac{kg}{m^3}\ ;\ c_{pF} = 1{,}017\ \frac{kJ}{kgºC}\ ;\ \nu = 19{,}4.10^{-6}\ \frac{m^2}{seg}\ ;\ k = 0{,}0279\ \frac{W}{mºC}\ ;\ \frac{g\,\beta}{\nu^2} = 0{,}782.10^8\ ;\ Pr = 0{,}71$

$$Gr = \frac{g\,\beta}{\nu^2}\,\Delta T\, L^3 = \left| \begin{array}{l} \Delta T = 100 - 20 = 80ºC \\ L = d = 0{,}016\ m \end{array} \right| = 0{,}782.10^8 \times 80 \times 0{,}016^3 = 25625$$

$Gr\ Pr = 25625 \times 0{,}71 = 18193$ (Convección natural laminar)

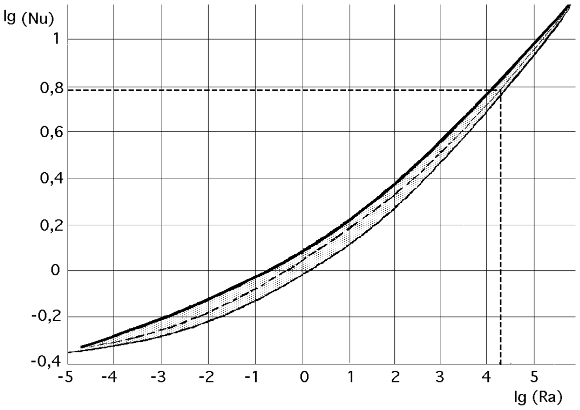
Para flujo laminar:

$$Nu_d = 0{,}36 + \frac{0{,}518\ Ra_d^{1/4}}{\{1 + (\frac{0{,}56}{Pr})^{9/16}\}^{4/9}} = \left| \begin{array}{l} 10^{-6} < Ra_d < 10^9 \\ Pr > 0{,}5 \end{array} \right| = 0{,}36 + \frac{0{,}518\ (18193)^{1/4}}{\{1 + (\frac{0{,}56}{0{,}71})^{9/16}\}^{4/9}} = 4{,}91$$

$$h_{cF} = \frac{k\ Nu}{d} = \frac{0{,}0279 \times 4{,}91}{0{,}016} = 8{,}56\ \frac{W}{m^2\ ºC}$$

$$Q = h_{cF}\ A\ (T_{pF} - T_F) = \left| A = \pi d\ L = \pi \times 0{,}016 \times 1 = 0{,}05026\ m^2 \right| = 8{,}56\ \frac{W}{m^2\ ºC} \times 0{,}05026\ m^2 \times 80ºC = 34{,}4\ W$$

Cálculo de h_{cF} por otros métodos:



a) Para flujo laminar en convección natural:

$$h_C = 1{,}18\ \sqrt[4]{\frac{\Delta T}{d}} = 1{,}18\ \sqrt[4]{\frac{80}{0{,}016}} = 9{,}92\ \frac{W}{m^2\ ºC}$$

b) Gráficamente:

$\lg Ra = \lg (18193) = 4{,}26$

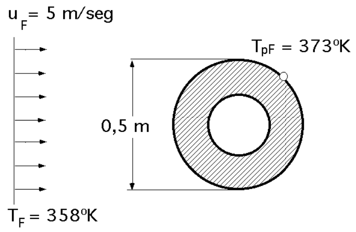
$\lg Nu = 0{,}78 \qquad Nu = 6{,}026$

$$h_{cF} = \frac{Nu\ k}{d} = \frac{6{,}026 \times 0{,}0279}{0{,}016} = 10{,}51\ \frac{W}{m^2\ ºC}$$

****

V.7.- Determinar la velocidad de transferencia térmica correspondiente al aire atmosférico a 358°K, fluyendo a una velocidad de 5 m/seg, perpendicularmente a un conducto de 0,5 m de diámetro y 10 m de longitud, cuya temperatura superficial es de 373°K

RESOLUCION



Propiedades físicas del aire a:

$$T = \frac{373 + 358}{2} = 365{,}5ºK$$

$$\rho = 0{,}936\ \frac{kg}{m^3}\ ;\ \eta = 21{,}3.10^{-6}\ \frac{kg}{m.seg}\ ;\ k = 0{,}0302\ \frac{W}{mºC}\ ;\ Pr = 0{,}71$$

FLUJOS CRUZADOS: $Re = \frac{u_F\ d\ \rho}{\eta} = \frac{5 \times 0{,}5 \times 0{,}936}{21{,}3.10^{-6}} = 109860$ (Turbulento)

$$Nu = 1{,}11\ C\ Re^n\ Pr^{0{,}42}\ (0{,}785\ \frac{T_{pF}}{T_F})^{n/4} = \left| \begin{array}{l} \text{Para: } 40000 < Re < 400000 \\ C = 0{,}02666\ ;\ n = 0{,}805 \end{array} \right| =$$

$$= 1{,}11 \times 0{,}02666 \times 109860^{0{,}805} \times 0{,}71^{0{,}42}\ (0{,}785\ \frac{373}{358})^{0{,}805/4} = 280{,}6$$

$$h_{cF} = \frac{Nu\ k}{d} = \frac{280{,}6 \times 0{,}0302}{0{,}5} = 16{,}95\ \frac{W}{m^2.ºC}$$

$$q = h_{cF}\ A(T_{pF} - T_F) = \left\{ A = \pi d\ L = \pi \times 0{,}5 \times 10 = 15{,}71\ m^2 \right\} = 16{,}95\ \frac{W}{m^2\ ºC} \times 15{,}71\ m^2\ (373 - 358)ºC = 3994\ W$$

****

V.8.- A través de un tubo capilar de 0,3 m de largo y 2,54.10-3 metros de diámetro interior, fluye agua a una velocidad de 0,2 m/seg. La temperatura de entrada del agua es de 40°C. Suponiendo que la temperatura media del tubo es de 80°C, calcular la temperatura de salida del agua

---

RESOLUCION

Es un ejercicio en el que hay que iterar, por cuanto no se conoce la temperatura media del agua, y sí la de entrada.

Por lo tanto podemos partir de una temperatura dada por: $T_F = \frac{T_{pF} + T_{entrada}}{2} = \frac{80 + 40}{2} = 60ºC$

$\rho = 983,2 \frac{kg}{m^3}$; $c_{pF} = 4,181 \frac{kJ}{kgºC}$; $\nu = 0,478.10^{-6} \frac{m^2}{seg}$; $k = 0,658 \frac{W}{mºC}$; $Pr = 3$; $\frac{g\beta}{\nu^2} = 22,45.10^9$

Régimen del flujo a la temperatura de 60ºC:

$$Re = \frac{u_F\, d}{\nu} = \frac{0,2\ (m/seg) \times 2,54.10^{-3}\ m}{0,478.10^{-6}\ (m^2/seg)} = 1063\ \ (laminar)$$

a) Para convección en tubos en régimen laminar (sólo para el agua)

$$h_C = 1,62\ (\frac{u}{L\, d})^{1/3} f_2(T) = |\ f_2(T) = f_2(60ºC) = 113,67\ | = 1,62\ (\frac{0,2}{0,3 \times 2,54.10^{-3}})^{1/3} \times 113,67 = 1179 \frac{W}{m^2\ ºC}$$

$$q = G\ c_{pF}\ (T_{sal} - T_{ent}) = h_{CF}\ A_L\ (T_{pF} - T_F) \quad \text{con: } T_F = \frac{T_{sal} + T_{ent}}{2}$$

Flujo másico: $G = \rho \frac{\pi d^2}{4} u_F = 983,2 \frac{\pi \times (2,54.10^{-3})^2}{4} \times 0,2 = 9,96.10^{-4} \frac{kg}{seg}$

luego:

$$9,96.10^{-4} \frac{kg}{seg} \times 4,181 \frac{kJ}{kgºK} (T_{F_{sal}} - 313)ºK = 1179 \frac{W}{m^2\ ºC} (2,5.10^{-3}\ \pi \times 0,3)\ m^2 \times (353 - T_F)$$

$$4,1659\ (T_{F_{salida}} - 313)ºK = 2,841\ (353 - \frac{T_{F_{sal}} + 313}{2}) \qquad T_{F_{sal}} = 333,3ºK = 60,3ºC$$

Con este resultado habría que volver a iterar con: $T_F = \frac{40 + 60,3}{2} = 50,15ºC$, por lo que: $T = \frac{50,15 + 80}{2} = 65,08ºC$

Nota: También se podía haber calculado el coeficiente de convección h_C considerando flujo laminar desarrollado por el interior de tuberías con temperatura de pared uniforme, en la forma:

$$Nu = 3,656 = \frac{h_C\ d}{k} = \frac{h_C \times 2,54.10^{-3}}{0,658} \qquad h_C = 945 \frac{W}{m^2\ ºC}$$

****

V.9.- Se hace circular aire a la presión de 1 atm y temperatura 490°K, por un tubo de 2 cm de diámetro interior, a una velocidad de 10 m/seg. Calcular h_C si la temperatura del tubo es de 510°K, y estimar la velocidad de transferencia de calor por unidad de longitud si se mantiene un flujo de calor uniforme.

RESOLUCION

Las propiedades del aire se toman a: $T = \frac{T_{pF} + T_F}{2} = \frac{510 + 490}{2} = 500ºK$

$\rho = 0,7048 \frac{kg}{m^3}$; $c_{pF} = 1,0295 \frac{kJ}{kgºC}$; $\eta = 2,671.10^{-5} \frac{kg}{m.seg}$; $k = 0,04038 \frac{W}{mºC}$; $Pr = 0,68$

$$Re = \frac{u_F\, d\, \rho}{\eta} = \frac{10\ (m/seg) \times 0,02\ m \times 0,7048\ (kg/m^3)}{2,671.10^{-5}\ (kg/m\ seg)} = 5277,4$$

$$\left.\begin{array}{l} St = \frac{Nu}{Re\ Pr} = \frac{Nu}{5277,4 \times 0,68} = 2,786.10^{-4}\ Nu \\ St = \exp\{-3,796 - 0,205 \ln (Re) - 0,505 \ln (Pr) - 0,0225 (\ln Pr)^2\} = \\ = \exp\{-3,796 - (0,205 \times \ln 5277,4) - (0,505 \times \ln 0,68) - 0,0225 (\ln 0,68)^2\} = 4,693.10^{-3} \end{array}\right\} \quad \left\{\begin{array}{l} 4,693.10^{-3} = 2,786.10^{-4}\ Nu \\ Nu = 16,84 \end{array}\right.$$

$$h_C = \frac{Nu\, k}{d} = \frac{16,84 \times 0,04038}{0,02} = 34 \frac{W}{m^2\ ºK}$$

$$Q = h_{cF}\ A_e\ (T_{pF} - T_F) = h_{cF}\ (\pi\, d_e\, L)\ (T_{pF} - T_F) = 34 \frac{W}{m^2ºC} (\pi \times 0,02 \times 1)\ m^2 \times (510 - 490)ºC = 42,72\ W$$

****

V.10.- Se calienta agua con una placa vertical plana, cuadrada, de lado 0,5 metros, que se mantiene a una tempe-

ratura de 60°C; la placa se introduce en el agua de forma que disipa calor por las dos caras. Determinar el calor transferido al agua cuando ésta se encuentra a 20°C.

RESOLUCION

Temperatura de pared constante

Temperatura media de la película: $T = \frac{T_{pF} + T_F}{2} = \frac{60 + 20}{2} = 40ºC$

$\rho = 992{,}2 \frac{kg}{m^3}$; $c_{pF} = 4{,}175 \frac{kJ}{kgºC}$; $\nu = 0{,}658.10^{-6} \frac{m^2}{seg}$; $k = 0{,}673 \frac{W}{mºC}$; $Pr = 4{,}5$

$Gr = \frac{g\,\beta}{\nu^2} \Delta T\, L^3 = \left| \begin{array}{l} \Delta T = 60 - 20 = 40ºC \\ L = h = 0{,}5\ m \end{array} \right| = 8{,}833.10^9 \times 40 \times 0{,}5^3 = 4{,}41.10^{10}$

$Ra = Gr\, Pr = 4{,}41.10^{10} \times 4{,}5 = 1{,}984.10^{11}$

(Se trata de un calentamiento con turbulencia muy desarrollada ($10^9 < Ra < 10^{12}$)

$Nu = 0{,}021\, Ra_L^{0,4} = 0{,}021 \times (1984.10^{11})^{0,4} = 694{,}2$

$h_{cF} = \frac{Nu\ k}{L} = \frac{694{,}2 \times 0{,}673}{0{,}5} = 934{,}4 \frac{W}{m^2.ºC}$

$q = h_{cF}\ A\ \Delta T = 934{,}4 \times (2 \times 0{,}5^2) \times (60 - 20) = 18.688\ W$

****

V.11.- Calcular la disipación de calor desde una pared vertical expuesta al medio ambiente compuesto por Nitrógeno a 5°C y presión 1 atm abs. La pared tiene 2 m de altura y 3 m de ancho, siendo su temperatura de 49°C.

RESOLUCION

Temperatura de pared constante

Temperatura media de la película: $T = \frac{T_{pF} + T_F}{2} = \frac{49 + 5}{2} = 27ºC$

$\rho = 1{,}1421\ (kg/m^3)$; $\nu = 15{,}63.10^{-6}\ (m^2/seg)$; $k = 0{,}0262\ (W/mºC)$; $Pr = 0{,}713$; $\frac{g\,\beta}{\nu^2} = 133{,}7.10^6\ (1/ºKm^3)$

$Gr = \frac{g\,\beta}{\nu^2} \Delta T\, L^3 = \left| \begin{array}{l} \Delta T = 49 - 5 = 44ºC \\ L = h = 2\ m \end{array} \right| = 133{,}7.10^6 \times 44 \times 2^3 = 4{,}7.10^{10}$

$Gr\, Pr = 4{,}7.10^{10} \times 0{,}713 = 3{,}355.10^{10}$ (Turbulencia muy desarrollada)

$Nu = 0{,}021\, Ra_L^{0,4} = 0{,}021 \times (3{,}355.10^{10})^{0,4} = 340{,}8$

$h_{cF} = \frac{Nu\ k}{L} = \frac{340{,}8 \times 0{,}0262}{2} = 4{,}464 \frac{W}{m^2.ºC}$

$q = h_{cF}\ A\ \Delta T = 4{,}464 \times (2 \times 3) \times (49 - 5) = 1178{,}6\ W$

****

V.12.- Determinar el calor generado en la parrilla de asar de un restaurante, cuyas dimensiones son (1,00 x 0,80 m²), que se mantiene a una temperatura media de 140°C, sabiendo que la temperatura media del restaurante es de 20°C

RESOLUCION

Convección natural

Temperatura media de la película: $T = \frac{T_{pF} + T_F}{2} = \frac{140 + 20}{2} = 80ºC$

$\rho = 0{,}968\ (kg/m^3)$; $\nu = 21{,}5.10^{-6}\ (m^2/seg)$; $k = 0{,}0293\ (W/mºC)$; $Pr = 0{,}71$; $\frac{g\,\beta}{\nu^2} = 0{,}6.10^8\ (1/ºKm^3)$

$Gr = \frac{g\,\beta}{\nu^2} \Delta T\, L^3 = \left| \Delta T = 140 - 20 = 120ºC \ ;\ L = \frac{1 + 0{,}8}{2} = 0{,}9\ m \right| = 0{,}6.10^8 \times 120 \times 0{,}9^3 = 5{,}25.10^9$

$Ra = Gr\ Pr = 5{,}25.10^{9} \times 0{,}71 = 3{,}7275.10^{10}$ (Turbulento)

$$Nu = C\ Ra_L^n = \left| 10^7 < Ra < 10^{10} \quad \begin{cases} C = 0{,}14 \\ n = 0{,}33 \end{cases} \right| = 0{,}14 \times (3{,}7275.10^{9})^{0{,}33} = 201{,}7$$

$$h_{cF} = \frac{Nu\ k}{L} = \frac{201{,}54 \times 0{,}0293}{0{,}9} = 6{,}56\ \frac{W}{m^2.^{\circ}C}$$

$$q = h_{cF}\ A\ \Delta T = 6{,}56 \times (1 \times 0{,}8) \times (140 - 20) = 630\ W$$

****

V.13.- Determinar el calor generado en la parrilla de asar de un restaurante, cuyas dimensiones son (1,00 x 0,80 m²), que se mantiene a una temperatura media de 140°C, sabiendo que la temperatura media del restaurante es de 20°C y existe una corriente de aire de 1 m/seg

---

RESOLUCION

Convección forzada

Temperatura media de la película: $T = \frac{T_{pF} + T_F}{2} = \frac{140 + 20}{2} = 80^{\circ}C$

$$\rho = 0{,}968\ \frac{kg}{m^3}\ ;\ \nu = 21{,}5.10^{-6}\ \frac{m^2}{seg}\ ;\ k = 0{,}0293\ \frac{W}{m^{\circ}C}\ ;\ Pr = 0{,}71$$

$$Nu = 0{,}664\sqrt{Re}\ Pr^{1/3} = \left| Re = \frac{u_F\ L}{\nu} = \frac{1\ (m/seg) \times 0{,}9\ m}{21{,}5.10^{-6}\ (m^2/seg)} = 41860 < 5.10^5\ (laminar) \right| = 121{,}2$$

$$h_{cF} = \frac{Nu\ k}{L} = \frac{121{,}2 \times 0{,}0293}{0{,}9} = 3{,}944\ \frac{W}{m^2.^{\circ}C}$$

$$q = h_{cF}\ A\ \Delta T = 3{,}944 \times (1 \times 0{,}8) \times (140 - 20) = 378{,}8\ W$$

****

V.14.- Agua a la temperatura media de 15°C se eleva a la velocidad media u= 0,10 m/seg por un tubo de diámetro interior d_i= 0,015 metros. La longitud del tubo es L= 0,5 metros. La temperatura de la pared del tubo es de 45°C. Determinar el coeficiente h_C de transmisión de calor.

RESOLUCION

$\frac{L}{d} = \frac{0{,}5}{0{,}015} = 33{,}33$ (Flujo no desarrollado)

que puede ser laminar o turbulento.

En ambas situaciones la formulación a utilizar dice que las propiedades del fluido hay que tomarlas a T_F por lo que las propiedades del agua se toman a la temperatura de 15ºC

$$\rho = 998{,}5\ \frac{kg}{m^3}\ ;\ \nu = 1{,}2.10^{-6}\ \frac{m^2}{seg}\ ;\ k = 0{,}587\ \frac{W}{m^{\circ}C}\ ;\ Pr = 8{,}675\ ;\ \eta = 1193{,}25.10^{-6}\ \frac{kg}{m.seg}$$

$$Re = \frac{u_F\ d}{\nu} = \frac{0{,}1\ (m/seg) \times 0{,}015\ m}{1{,}2.10^{-6}\ (m^2/seg)} = 1248\ (laminar)$$

$$Nu = 1{,}86\ (Re\ Pr)^{0{,}33} \left(\frac{d}{L}\right)^{0{,}33} \left(\frac{\eta_{T_F}}{\eta_{T_{pF}}}\right)^{0{,}14} = \left| \eta_{45^{\circ}C} = 611{,}5.10^{-6}\ \frac{kg}{m\ seg} \right| =$$

$$= 1{,}86\ (1248 \times 8{,}675)^{0{,}33} \left(\frac{0{,}015}{0{,}5}\right)^{0{,}33} \left(\frac{1193{,}25.10^{-6}}{611{,}5.10^{-6}}\right)^{0{,}14} = 13{,}77$$

$$h_{cF} = \frac{Nu\ k}{d} = \frac{13{,}77 \times 0{,}587}{0{,}015} = 539\ \frac{W}{m^2\ ^{\circ}C}$$

****

V.15.- Aire atmosférico a la temperatura T_F=20°C y velocidad u_F=30 m/seg, incide sobre una esfera de diámetro 2,5 cm y temperatura constante igual a T_{esfera}=135°C

Determinar el calor evacuado por la esfera y la fuerza que ésta opone al flujo de aire

---

RESOLUCION

- Si se utiliza la ecuación exclusiva para gases, las propiedades del aire hay que tomarlas a la temperatura media de la película.

$$T = \frac{T_{pF} + T_F}{2} = \frac{135 + 20}{2} = 77{,}5ºC \qquad \nu_{77,5ºC} = 20{,}76.10^{-6}\ (m^2/seg)\ ;\quad k = 0{,}03\ (W/mºC)$$

$$Nu = 0{,}37\ Re^{0,6} = \left| Re = \frac{d\ u_F}{\nu} = \frac{0{,}025\ (m) \times 30\ (m/seg)}{20{,}76.10^{-6}\ (m^2/seg)} = 36127 \right| = 0{,}37 \times 36127^{0,6} = 200{,}86$$

$$h_{cF} = \frac{Nu\ k}{d} = \frac{200{,}86 \times 0{,}03}{0{,}025} = 241{,}36\ \frac{W}{m^2\ ºC}$$

- Si se utiliza la ecuación general de Whitaker, las propiedades del aire hay que tomarlas a T_F = 20ºC.

$$\nu_{20ºC} = 15{,}95.10^{-6}\ (m^2/seg)\ ;\quad k_{20ºC} = 0{,}02568\ (W/mºC)\ ;\quad Pr = 0{,}71$$

$$Nu = 2 + (0{,}4\ \sqrt{Re} + 0{,}06\ Re^{2/3})\ Pr^{0,4} = \left| Re = \frac{d\ u_F}{\nu} = \frac{0{,}025 \times 30}{15{,}95.10^{-6}} = 47021 \right| = 145{,}75$$

$$h_{cF} = \frac{Nu\ k}{d} = \frac{145{,}75 \times 0{,}0256}{0{,}025} = 149{,}25\ \frac{W}{m^2\ ºC}$$

a) Calor evacuado por la esfera

Se observa una fuerte discrepancia entre ambas resultados, por lo que tomaremos el correspondiente a la ecuación exclusiva para gases

$$q = h_{cF}\ A\ \Delta T = 241{,}36\ \frac{W}{m^2.ºC} \times (4\ \pi \times 0{,}0125^2)\ m^2 \times (135 - 20)\ ºK = 54{,}5\ W$$

b) Fuerza que opone la esfera al flujo del aire

$$F_a = C_w\ \Omega\ \rho\ \frac{u_F^2}{2} = \left| \begin{array}{l} C_w = 0{,}47,\ \text{ para: } 10^3 < Re < 3.10^5 \\ \Omega_{Frontal} = \dfrac{\pi d^2}{4} = \dfrac{\pi \times 0{,}025^2}{4} = 4{,}91.10^{-4}\ m^2 \end{array} \right| = 0{,}47 \times 4{,}91.10^{-4}\ m^2 \times 1{,}21\ \frac{kg}{m^3} \times \frac{30^2}{2}\ (\frac{m}{seg})^2 =$$

$$= 0{,}1256\ N$$

****

V.16.- Un tubo vertical de 3,6 cm de diámetro exterior y 0,4 metros de longitud está a la temperatura T_F=405°K e inmerso en aire atmosférico a la temperatura T_F=28°C.
Determinar el coeficiente de transmisión de calor y el calor evacuado al exterior

---

RESOLUCION

$$T = \frac{T_{pF} + T_F}{2} = \frac{400 + (28 + 273)}{2} = 350{,}5ºK$$

$$\rho = 0{,}998\ \frac{kg}{m^3}\ ;\ \nu = 20{,}76.10^{-6}\ \frac{m^2}{seg}\ ;\ k = 0{,}03\ \frac{W}{mºK}\ ;\ Pr = 0{,}697\ ;\ \frac{g\ \beta}{\nu^2} = 0{,}758.10^8\ \frac{1}{ºKm^3}$$

$$Gr = \frac{g\ \beta}{\nu^2}\ \Delta T\ L^3 = \left| \begin{array}{l} \Delta T = 400 - 301 = 99ºC \\ L = 0{,}4\ m \end{array} \right| = 0{,}758.10^8 \times 99 \times 0{,}4^3 = 4{,}8.10^8$$

$Gr\ Pr = 4{,}8.10^8 \times 0{,}697 = 3{,}347.10^8 < 10^9$ Laminar

Para el caso particular del aire:

$$h_{cF} = 1{,}18\ (\frac{\Delta T}{d})^{0,25} = 1{,}18 \times (\frac{99}{0{,}036})^{0,25} = 8{,}545\ \frac{W}{m^2.ºK}$$

$$q = h_{cF}\ (\pi\ d\ L)\ \Delta T = = 8{,}545\ \frac{W}{m^2.ºK}\ (\pi \times 0{,}036 \times 0{,}4)\ m^2 \times 99ºC = 38{,}27\ W$$

****

V.17.- Bolas esféricas de 0,6 cm de diámetro caen a una velocidad de 2 m/seg en un depósito de agua. Calcular el coeficiente de película si las bolas se encuentran a 100ºC y el agua a 20ºC.

RESOLUCION

Propiedades del agua a 20ºC:

$\rho = 998{,}2\ \dfrac{kg}{m^3}$; $\nu = 1{,}006.10^{-6}\ \dfrac{m^2}{seg}$; $k = 0{,}597\ \dfrac{W}{m^oK}$; $Pr = 7{,}02$; $\eta = 993.10^{-6}\ \dfrac{kg}{m\ seg}$

Viscosidad dinámica del agua a 100ºC: $\eta_{agua\ (100ºC)} = 278.10^{-6}$ (kg/m seg)

Whitaker: $Nu = 2 + (0{,}4 \sqrt{Re} + 0{,}06\ Re^{2/3})\ Pr^{0,4}\ (\dfrac{\eta_F}{\eta_{pF}})^{0,25} = \left| Re = \dfrac{d\ u_F}{\nu} = \dfrac{0{,}006 \times 2}{1{,}006.10^{-6}} = 11928{,}4 \right| =$

$$= 2 + (0{,}4 \sqrt{11928{,}4} + 0{,}06 \times 11928{,}4^{2/3})\ 7{,}02^{0,4}\ (\frac{993}{278})^{0,25} = 227$$

$$h_{cF} = \frac{Nu\ k}{d} = \frac{227 \times 0{,}597}{0{,}006} = 21568\ \frac{W}{m^2.^oC}$$

****

V.18.- El muro posterior de una caldera tiene en su cara exterior una temperatura media de 80°C, siendo sus dimensiones: Anchura = 6,5 metros; altura = 3,2 metros. La temperatura media del ambiente es de 26°C.
Determinar
a) El coeficiente de transmisión de calor por convección pared-aire exterior
b) El coeficiente de transmisión de calor por radiación pared-aire exterior $\varepsilon_{pared} = \varepsilon_{aire} = 0{,}8$
c) El n° de Kcal/hora que se pierden al exterior a través de la pared.

RESOLUCION

a) Coeficiente de transmisión de calor por convección pared-aire exterior

$$T = \frac{T_{pF} + T_F}{2} = \frac{80 + 26}{2} = 53ºC = 326ºK$$

$\rho = 1{,}0877\ \dfrac{kg}{m^3}$; $\nu = 18{,}8.10^{-6}\ \dfrac{m^2}{seg}$; $k = 0{,}02213\ \dfrac{W}{mºC}$; $Pr = 0{,}7025$

$$Gr = \frac{g\ \beta}{\nu^2}\ \Delta T\ L^3 = \left| \begin{array}{l} \Delta T = 80 - 26 = 54ºC\ ;\ L = 3{,}2\ m\ (\text{pared vertical}) \\ \beta = 1/299ºK \end{array} \right| = \frac{9{,}8 \times \frac{1}{299} \times 54 \times 3{,}2^3}{(18{,}8.10^{-6})^2} = 1{,}64.10^{11}$$

$Ra = Gr\ Pr = 1{,}64.10^{11} \times 0{,}7025 = 1{,}152.10^{11}$

$Nu = 0{,}021\ Ra^{0,4} = 0{,}021 \times (1{,}152.10^{11})^{0,4} = 558{,}21$

$$h_{cF} = \frac{Nu\ k}{L} = \frac{558{,}21 \times 0{,}02213}{3{,}2} = 3{,}86\ \frac{W}{m^2.^oK}$$

b) Coeficiente de transmisión de calor por radiación pared-aire exterior.- Se puede suponer que la pared emite radiación que es captada por el medio ambiente, y que éste a su vez está en equilibrio térmico con el medio que le rodea; es decir, podría equipararse a un proceso de radiación entre placas paralelas, suponiendo al aire como una placa ficticia situada a la distancia que marque la capa límite térmica, paralela a la pared que irradia. La pared y el aire se comportan como cuerpos grises.

Placas paralelas infinitas de igual área: $A_1 = A_2$; $F_{12} = 1$

$$\frac{q_{1(neta)}}{A_1} = \frac{E_{b_1} - E_{b_2}}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = h_{cF}\ (T_{pF} - T_F)$$

$$h_{cF} = \frac{E_{b_1} - E_{b_2}}{(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1)\ (T_{pF} - T_F)} = \frac{5{,}67.10^{-8}\ (W/m^2\ ºK^4)\ (353^4 - 299^4)ºK^4}{(\frac{1}{0{,}8} + \frac{1}{0{,}8} - 1)\ (353 - 299)ºK} = 5{,}274\ \frac{W}{m^2\ ºK}$$

$$h_{Total} = h_{cF} + h_{rF} = 3{,}86 + 5{,}274 = 9{,}134\ \frac{W}{m^2.^oK}$$

Calor evacuado al exterior

$$Q = h_{Total}\ A_1\ (T_{pF} - T_F) = 9{,}134\ \frac{W}{m^2.^oK} \times (6{,}5 \times 3{,}2)\ m^2 \times (80 - 26)ºK = 10.260\ W$$

****

***V.19.- Aceite de motores de* ν *= 0,8 x 10^{-4} m^2/seg y k = 0,14 W/m.ºC, fluye con una velocidad media* u_F *= 0,2 m/seg por el interior de un tubo de 1,25 cm de diámetro, que está calentado eléctricamente a razón de q = 2454 W/m^2. Calcular la diferencia de temperatura entre la pared del tubo* T_{pF} *y la temperatura media del fluido* T_F.**

RESOLUCION

$$Re = \frac{u_F\ d}{\nu} = \frac{0{,}2\ (m/seg) \times 0{,}0125\ m}{0{,}8.10^{-4}\ (m^2/seg)} = 31{,}25\ \ (laminar)$$

Para flujo laminar, el coeficiente de transmisión de calor por convección es:

$$h_{cF} = \frac{48}{11}\ \frac{k}{d} = \frac{48}{11}\ \frac{0{,}14}{0{,}0125} = 48{,}87\ \frac{W}{m^2.^\circ C}$$

$$q = h_{cF}\ (T_{pF} - T_F)\qquad T_{pF} - T_F = \frac{2450\ (W/m^2)}{48{,}87\ (W/m^\circ C)} = 50{,}1^\circ C$$

****

V.20.- Se bombea aceite de motor con una velocidad media de 0,6 m/seg a través de 80 tubos de diámetro 2,5 cm y longitud 10 m. Las propiedades físicas del aceite son,* ν *= 0,75 x 10^{-4} m^2/seg y* ρ *= 868 kg/m^3.
Determinar la caída de presión a lo largo de los tubos y la potencia de bombeo total en CV

RESOLUCION

Caída de presión a lo largo de los tubos:

$$\Delta p = \frac{\lambda \gamma u_F^2\ L}{2\ d\ g} = \left|\ \begin{array}{l} Re = \dfrac{d\ u_F}{\nu} = \dfrac{0{,}025 \times 0{,}6}{0{,}75.10^4} = 200\ laminar \\ \lambda = \dfrac{64}{Re} = \dfrac{64}{200} = 0{,}32 \end{array}\ \right| = \frac{0{,}32 \times 868\ \dfrac{kg}{m^3} \times 0{,}6^2\ (\dfrac{m}{sg})^2 \times 10\ m}{2 \times 0{,}025\ m \times 9{,}8\ \dfrac{m}{seg^2}} = 2040\ \frac{kg}{m^2}$$

$$\text{Potencia de bombeo: } G\ \Delta p = \left|\ G = n\ \frac{\pi d^2}{4}\ u_F = 80 \times \frac{\pi \times 0{,}025^2}{4} \times 0{,}6 = 0{,}02356\ \frac{m^3}{seg}\ \right| = 48\ \frac{Kgm}{seg} = 0{,}64\ CV$$

****

V.21.- Aire atmosférico a 300ºK, a la velocidad* u_F *= 5 m/seg fluye a lo largo de una placa plana de 1 m de longitud y anchura 0,5 m. La fuerza de arrastre total que actúa sobre la placa plana es F = 0,018 N. Utilizando la analogía de Reynolds-Colburn estimar el coeficiente de convección medio entre la placa y el fluido.

RESOLUCION

Por la analogía de Reynolds-Colburn: $\dfrac{C_m}{2} = (St)\ (Pr)^{2/3} = \dfrac{h_{cF}}{\rho\ c_{pF}\ u_F}\ Pr^{2/3}$

Propiedades del aire a 300ºK: $\rho = 1{,}177\ \dfrac{kg}{m^3}$; $c_{pF} = 1{,}006.10^3\ \dfrac{J}{kg^\circ C}$; Pr = 0,71

$$F_a = \frac{1}{2}\ \rho\ S\ C_w u_F^2 = \frac{1}{2}\ \rho\ (L\ a)\ C_w u_F^2 = \rho\ (L\ a)\ \frac{h_{cF}}{\rho\, c_{pF}\ u_F}\ Pr^{2/3}\ u_F^2 = (L\ a)\ \frac{h_{cF}}{c_{pF}}\ Pr^{2/3}\ u_F^2$$

$$C_w = \frac{2\ F_a}{\rho\,(L\ a)\ u_F^2} = \frac{2 \times 18.10^{-3}}{1{,}177 \times (1 \times 0{,}5) \times 5^2} = 2{,}447.10^{-3}$$

$$h_{cF} = \frac{F_a\ c_{pF}}{(L\ a)\ Pr^{2/3} u_F} = \frac{0{,}018 \times 1{,}006.10^3}{(1 \times 0{,}5) \times 0{,}71^{2/3} \times 5} = 9{,}1\ \frac{W}{m^2\,^\circ C}$$

****

V.22.- Una placa cuadrada de 0,16 m^2 está suspendida verticalmente. Su temperatura es de 400ºK estando el aire que la rodea a 300ºK.
Determinar

a) El espesor* $\delta(x)$ *de la capa límite en el borde
b) El coeficiente de transmisión de calor

RESOLUCION

a) Espesor δ(x) de la capa límite en el borde

$$\frac{\delta}{x}\Big|_{x} = 3{,}93\ \sqrt[4]{\frac{0{,}952 + Pr}{Gr_x\ Pr^2}}$$

Propiedades físicas del aire a: $\dfrac{300ºK + 400ºK}{2} = 350ºK$ $\quad \nu = 20{,}75.10^{-6}\ \dfrac{m^2}{seg}\ ;\ k = 0{,}03\ \dfrac{W}{mºC}\ ;\ Pr = 0\ 697$

$$Gr_x = Gr_{0,4} = \frac{g\ \beta}{\nu^2}\ \Delta T\ L^3 = \frac{9{,}8 \times (1/293)}{(20{,}76.10^{-6})^2} \times (400 - 300) \times 0{,}4^3 = 4{,}16.10^8$$

$$Ra_x = Gr_x\ Pr = 4{,}16.10^8 \times 0{,}697 = 2{,}9.10^8 < 10^9$$

$$\frac{\delta}{x}\Big|_{0,4} = 3{,}93\ \sqrt[4]{\frac{0{,}952 + 0{,}697}{4{,}16.10^8 \times 0{,}697^2}} = 0{,}03735 \qquad \delta_{0,4} = 0{,}03735 \times 0{,}4 = 0{,}0149\ m$$

b) Coeficiente de convección:

$$Nu = 0{,}68 + \frac{0{,}67\ Ra_x^{1/4}}{\{1 + (\frac{0{,}492}{Pr})^{9/16}\}^{4/9}} = 0{,}68 + \frac{0{,}67\ (2{,}9.10^8)^{1/4}}{\{1 + (\frac{0{,}492}{0{,}697})^{9/16}\}^{4/9}} = 67{,}64$$

$$h_{cF} = \frac{Nu\ k}{x} = \frac{67{,}64 \times 0{,}03}{0{,}4} = 5{,}07\ W/m^2\ ºC$$

De otra forma:

$$Nu = 0{,}59\ (Gr_x\ Pr)^{0,25} = 0{,}59\ (2{,}9.10^8)^{0,25} = 77 \qquad h_{cF} = 5{,}77\ (W/m^2\ ºC)$$

****

V.23.- Aire atmosférico a la temperatura de 285ºK y velocidad 20 m/seg, fluye sobre una placa plana horizontal de longitud 1,5 m, que está a su vez conformada por un material aislante de longitud igual a la de la capa límite laminar y temperatura la del aire, seguida de un material conductor del calor que se encuentra a la temperatura de 341ºK, con una longitud de 0,7 m y a continuación material aislante a 285ºK, hasta completar los 1,5 m de longitud.

Determinar:

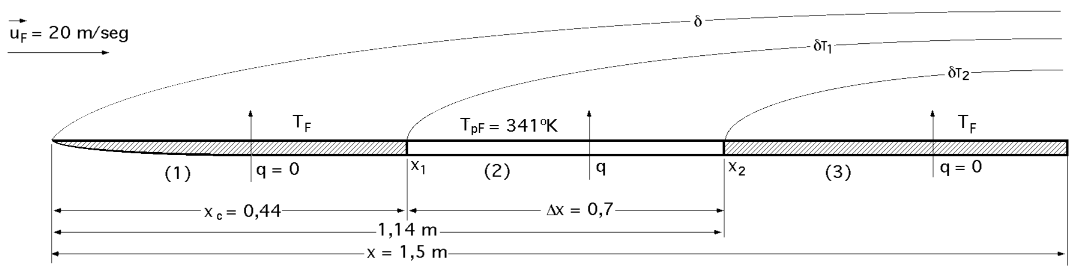
a) La cantidad de calor disipada por la placa compuesta, por unidad de anchura.

b) Calor disipado por la placa si toda ella fuera metálica a 341ºK.

Datos del aire a 313ºK: $\rho = 1{,}092\ kg/m^3\ ;\ c_{pF} = 1014\ J/kg.ºK\ ;\ k = 0{,}0265\ W/m.ºK\ ;$

$\alpha = 24{,}8.10^{-6}\ m^2/seg\ ;\ \nu = 17{,}6.10^{-6}\ m^2/seg\ ;\ Pr = 0{,}71$

RESOLUCION



Propiedades del aire: $T = \dfrac{T_{pF} + T_F}{2} = \dfrac{341 + 285}{2} = 313ºK$

$$\rho = 1{,}092\ \frac{kg}{m^3}\ ;\ \nu = 17{,}6.10^{-6}\ \frac{m^2}{seg}\ ;\ k = 0{,}0265\ \frac{W}{mºC}\ ;\ Pr = 0{,}71$$

$$x_c = \frac{\nu\ Re_c}{u_F} = \frac{17{,}6.10^{-6}\ (m^2/seg) \times 5.10^5}{20\ (m/seg)} = 0{,}44\ m$$

luego la placa se puede dividir en 3 partes:
- (1) Aislante longitud = 0,44 m
- (2) No Aislante longitud = 0,70 m
- (3) Aislante longitud = 0,36 m

a) Cantidad de calor disipada por la placa compuesta, por unidad de anchura. ($x > x_2$) ($x = 1,5$ m)

La cantidad de calor disipada lo será entre: $0,44 < x < 0,7$

$$q = 0,323\ \frac{k_F}{x}\ Pr^{1/3} \sqrt{Re_x}\ \left(\frac{\Delta T}{\sqrt[3]{1 - (\frac{x_1}{x})^{3/4}}} - \frac{\Delta T}{\sqrt[3]{1 - (\frac{x_2}{x})^{3/4}}}\right) = \left| \begin{array}{l} Re_x = \frac{u_F\ x}{\nu} = \frac{20 \times 1,5}{17,6.10^{-6}} = 1,7045.10^6 \\ \Delta T = T_{pF} - T_F = 341 - 285 = 56ºC \end{array} \right| =$$

$$= 0,323 \times \frac{0,0265}{1,5} \times 0,71^{1/3} \sqrt{1,7045.10^6}\ \left(\frac{56}{\sqrt[3]{1 - (\frac{0,44}{1,5})^{3/4}}} - \frac{56}{\sqrt[3]{1 - (\frac{1,14}{1,5})^{3/4}}}\right) = - 211,05 \text{ W}$$

observándose que el flujo de calor es (-) para $x_2 > x_1$ en la región (3), lo cual significa que en la sección de pared considerada, ésta reabsorbe parte del calor desarrollado en la región (2).

b) Calor disipado por la placa si toda ella fuera metálica a 341ºK.

$$Re_L = \frac{20 \times 1,5}{17,6.10^{-6}} = 1,7045.10^6$$

$$Nu = 0,036\ Re_L^{0,8}\ Pr^{0,43} \left(\frac{\eta_F}{\eta_{pF}}\right)^{0,14} = 0,036 \times (1,7045.10^6)^{0,8} \times 0,71^{0,43} \times 1 = 3003,5$$

$$h_{cF} = \frac{Nu_L\ k}{L} = \frac{3003,5 \times 0,0265}{1,5} = 53,06\ \frac{W}{m^2.ºK}$$

$$q = h_{cF}\ A\ (T_{pF} - T_F) = 53,06\ \frac{W}{m^2.ºK}\ (1,5 \times 1)\ m^2 \times (341 - 285)ºK = 4457,1 \text{ W}$$

****

V.24.- Una barra cilíndrica de 5 cm de diámetro y 1 m de longitud que se encuentra inicialmente a una temperatura de 500ºC, se introduce horizontalmente en un depósito de agua a 100ºC.

Las propiedades físicas de la barra son:

emisividad $\varepsilon = 0,9$; difusividad $\alpha = 0,0259\ \frac{m^2}{hora}$; conductividad térmica $k = 25,5\ \frac{W}{m\ ºC}$

Determinar el tiempo necesario para que la temperatura de la superficie de la barra llegue a los 400ºC

RESOLUCIÓN

Se puede suponer un enfriamiento en agua en ebullición en película estable, a $T_s = 100ºC$

La transmisión de calor en la superficie se realiza simultáneamente por convección y radiación de forma que:

$$h_C^* = h_C \sqrt[3]{\frac{h_C}{h_C^*}} + h_r\ , \text{ siendo: } \left\{ \begin{array}{l} h_C = 0,62 \sqrt[4]{\frac{k_v^3\ \rho_v (\rho_l - \rho_v)\ g\ r_{l-v}}{\eta_v\ d_e\ \Delta T} \left(1 + \frac{0,4\ c_{p(sat)}\ \Delta T}{r_{l-v}}\right)} \\ h_r = \frac{\sigma\ (T_{pF}^4 - T_s^4)}{(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\alpha} - 1)\ (T_{pF} - T_s)} \end{array} \right.$$

en donde α es la absortividad del líquido = 1.

La ecuación anterior es difícil de utilizar, ya que h_C^* está en forma implícita, por lo que se puede hacer uso de otras ecuaciones, válidas para, $u_F < (g\ d)^{0,5}$

$$h_C^* = h_C + h_r \left\{\frac{3}{4} + \frac{1}{4}\ \frac{h_r}{h_C}\ \left(\frac{1}{2,62 + (h_r/h_C)}\right)\right\}\ , \text{ con: } 0 < \frac{h_r}{h_C} < 10 \ ;\ \pm 0,3\% \text{ de error}$$

$$h_C^* = h_C + \frac{3\ h_r}{4}\ , \text{ con: } \frac{h_r}{h_C} < 1 \ ;\ \pm 5\% \text{ de error}$$

Propiedades físicas del vapor de agua a la temperatura media de película $= \frac{500 + 100}{2} = 300ºC$

$\rho_v = 46,19$ (kg/m^3) ; $c_{pv} = 6,18$ (kJ/kgºC) ; $k_v = 0,072$ (W/m ºC) ; $\eta_v = 0,0198.10^{-3}$ (kg/m seg)

Propiedades físicas del agua a $T_s = 100ºC$; $\rho_l = 958$ (kg/m^3) ; $r_{lv} = 2257$ (kJ/kg)

$\Delta T = T_{pF} - T_s = 500 - 100 = 400ºC$

$$h_C = 0,62 \sqrt[4]{\frac{k_v^3\ \rho_v (\rho_l - \rho_v)\ g\ r_{l-v}}{\eta_v\ d_e\ \Delta T}\ \left(1 + \frac{0,4\ c_{p(sat)}\ \Delta T}{r_{l-v}}\right)} =$$

$$= 0,62 \sqrt[4]{\frac{0,072^3 \times 46,19\ (958 - 46,19)\ 9,8 \times 2257}{0,0198.10^{-3} \times 0,05 \times 400}\ \left(1 + \frac{0,4 \times 6,18 \times 400}{2257}\right)} = 116,87\ \frac{W}{m^2\ ºC}$$

$$h_r = \frac{\sigma\ (T_{pF}^4 - T_s^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\alpha} - 1\right)(T_{pF} - T_s)} = \frac{5,67.10^{-8}\ \ (773^4 - 373^4)}{\left(\frac{1}{0,9} + \frac{1}{1} - 1\right)(773 - 373)} = 43,08\ \frac{W}{m^2\ ºC}$$

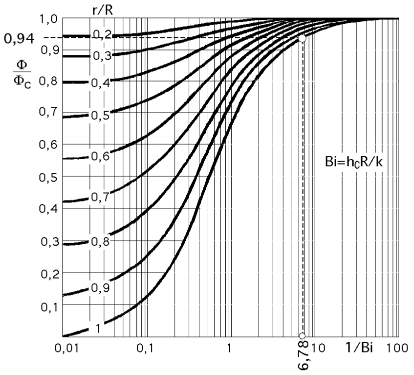
Como: $\dfrac{h_r}{h_C} = \dfrac{43,08}{116,87} < 1$ $\qquad h_C^* = h_C + \dfrac{3\ h_r}{4} = 116,87 + \dfrac{3 \times 43,08}{4} = 149,2\ \dfrac{W}{m^2\ ºC}$

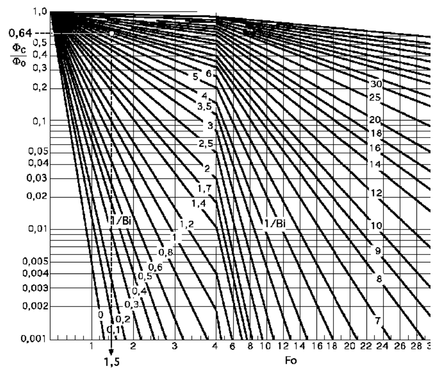
Tiempo de enfriamiento:

$$Bi = \frac{h_C^*\ R}{k} = \frac{149,2 \times 0,025}{25,5} = 0,146 \quad ; \quad \frac{h_C^*}{k} = 5,85\ \ \text{(C.c. convección)}$$

En la primera gráfica de Heysler se obtiene: $\Phi/\Phi_C = 0,94$

En la 2ª de Heysler: $\dfrac{\Phi_C}{\Phi_0} = \dfrac{\Phi_C}{\Phi}\ \dfrac{\Phi}{\Phi_0} = \left| \begin{array}{l} \dfrac{\Phi_C}{\Phi} = \dfrac{1}{0,94} = 1,064 \\ \dfrac{\Phi}{\Phi_0} = \dfrac{400 - 100}{600 - 100} = 0,6 \end{array} \right| = 1,064 \times 0,6 = 0,64 \xrightarrow{Bi^{-1} = 6,78} Fo = 1,5$





por lo que: $Fo = \dfrac{\alpha\ t}{R^2}\ ;\ 1,5 = \dfrac{0,0259\ (m^2/\text{hora})\ t}{0,025^2}$ $\qquad t = 0,0362$ horas = 2 min 10 seg

****

V.25.- En un laboratorio se hace un experimento en el que una corriente de 193 amperios calienta una varilla de Ni de 300 mm de longitud y 1 mm de diámetro sumergida en agua, horizontalmente, a la presión atmosférica. Determinar el voltaje máximo a aplicar a la varilla para que se alcance el pico de calor

---

RESOLUCIÓN

Para una varilla horizontal, sumergida en agua vaporizando, la expresión del pico de calor es:

$$\frac{Q_{máx}}{A}_{\ máx} = 0,18\ \rho_v\ r_{l-v} \sqrt[4]{\frac{\sigma^*\ g\ (\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2}}\ \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_l + \rho_v}} = \left| \begin{array}{l} \text{Propiedades del agua a 100ºC} \\ \rho_l = 958\ kg/m^3\ ;\ \ \rho_v = 0,598\ kg/m^3 \\ r_{l-v} = 2257\ kJ/kg\ \ ;\ \ \sigma^* = 58,8.10^{-3}\ N/m \end{array} \right| =$$

$$= 0,18 \times 0,598 \times 2257 \sqrt[4]{\frac{58,8.10^{-3} \times 9,8\ (958 - 0,598)}{0,598^2}}\ \sqrt{\frac{958}{958 + 0,598}} = 1520,7\ \frac{kW}{m^2}$$

$$\text{Voltaje : } V = \frac{Q_{máx}}{I} = \frac{Q_{máx}}{A}\ \frac{A}{I} = \left|\ A = \pi\ d\ L = \pi \times 0,001 \times 0,3 = 9,425.10^{-4}\ m\ \right| =$$

$$= 1520700\ \frac{W}{m^2}\ \frac{9,425.10^{-4}}{193} = 7,42\ V$$

****

V.26.- Una plancha de acero inoxidable recubierta de teflón tiene una temperatura de 106ºC y se sumerge horizontalmente en agua a la presión atmosférica.
Determinar
a) La transferencia de calor por unidad de superficie
b) La transferencia de calor por unidad de superficie, si la placa de acero inoxidable se sustituye por otra placa de cobre a la misma temperatura.

RESOLUCIÓN
a) Al introducir la plancha en el agua, ésta va a entrar en ebullición; como la diferencia de temperaturas entre la plancha y T_s= 100ºC, es: (106 - 100 = 6ºC), la ebullición será probablemente nucleada, por lo que:

$$\frac{Q}{A} = \eta_l\, r_{l-v} \sqrt{\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma^*}} \left(\frac{c_{p_l}(T_{pF} - T_s)}{r_{l-v} Pr_l^{1,7} C}\right)^3 = \left| \begin{array}{l} \text{Propiedades del agua a 100ºC} \\ \rho_l = 958\ kg/m^3\ ;\ \ \rho_v = 0,598\ kg/m^3\ ;\ \ r_{l-v} = 2257\ kJ/kg \\ \sigma^* = 58,8.10^{-3}\ N/m\ ;\ \ \eta_l = 281.10^{-6}\ Nseg/m^2\ ;\ \ Pr_l = 1,75 \\ c_{p_l} = 4,211\ kJ/kgºC \end{array} \right| =$$

$$= \{ C = 0,0058 \} = 281.10^{-6} \times 2257 \sqrt{\frac{9,8\ (958 - 0,598)}{58,8.10^{-3}\ N/m}} \left(\frac{4,211 \times (106 - 100)}{2257 \times 1,75^{1,7} \times 0,0058}\right)^3 = 104,9\ \frac{kW}{m^2}$$

Como el valor encontrado es menor que el correspondienteal pico de calor: 104,9 (kW/m²) < 1520,7 (kW/m²), el modelo adoptado para la ebullición nucleada es correcto.
b) Al sustituir la placa de acero inoxidable por otra placa de cobre a la misma temperatura, las propiedades del agua no se modifican, pero sí el valor de C del contacto placa-agua. En consecuencia se puede poner:

$$\frac{Q}{A}_{\ Cobre} = \left(\frac{C_{acero\ inox.}}{C_{Cobre}}\right)^3 \frac{Q}{A}_{\ Acero\ inox.} = \left(\frac{0,0058}{0,013}\right) \times 104,9\ \frac{kW}{m^2} = 9,32\ \frac{kW}{m^2}$$

en la que el valor de C_{Cobre} = 0,013

****

V.27.- Una pared vertical de 0,3 m de altura que se encuentra a una temperatura de 90ºC está expuesta a la acción de vapor de agua a la presión atmosférica. Determinar el calor transferido y la masa de condensado por unidad de anchura.

RESOLUCION

Propiedades del condensado a: $\frac{90 + 100}{2} = 95ºC$ $\left\{ \begin{array}{l} \rho_l = 961,9\ kg/m^3\ ;\ \eta_l = 3.10^{-4}\ kg/m\ seg\ ;\ k_l = 0,6767\ W/mºC \\ \rho_v = 0,598\ kg/m^3\ ;\ r_{l-v} = 2270\ kJ/kg \end{array} \right.$

$$h_{C(vertical)} = 1,13 \sqrt[4]{\frac{r_{l-v}\, g\, \rho_l^2\, k_l^3}{\eta_l\, (T_s - T_{pF})\, L}} = 1,13 \sqrt[4]{\frac{2,27.10^6 \times 9,8 \times 961,9^2 \times 0,6767^3}{3.10^{-4} \times 0,3 \times (100 - 90)}} = 10370\ \frac{W}{m^2\ ºK}$$

$$Re = \frac{4\, h_C\, L\, (T_s - T_{pF})}{\eta_l\, r_{l-v}} = \frac{4 \times 10370 \times 0,3 \times (100 - 90)}{3.10^{-4} \times 2,27.10^6} = 182,7 < 1800$$

luego es correcta la formulación utilizada

$$\frac{Q}{A} = h_C (T_s - T_{pF}) = 10,37\ \frac{kW}{m^2\ ºK} \times (100 - 90)\ ºK = 103,7\ \frac{kW}{m^2}$$

Masa G de vapor que condensa:

$$Re = \frac{4\ G}{W\, \eta_l} \qquad G = \frac{Re\ W\ \eta_l}{4} = \frac{182,7 \times 1 \times 3.10^{-4}}{4} = 0,0137\ \frac{kg}{seg\ m}$$

****