

Algunas Correlaciones para Convección con Cambio de Fase

Adaptado de Incropera et al., "Fundamental of Heat and Mass Transfer", 6a edición, Wiley, y de Perry, "Chemical Engineering Handbook", 6a edición, McGraw-Hill.

EBULLICIÓN

Generalidades

La densidad de flujo de calor para ebullición está dada por la ley (modificada) de Newton:

$$q = h\Delta T_e$$

donde $\Delta T_e = (T_w - T_{sat})$ es la diferencia de temperatura en exceso.

Ebullición nucleada en estanque saturado

El coeficiente de transferencia de calor está dado por la ecuación de Rohsenow, donde todas las propiedades son del líquido saturado (excepto ρ_V que es del vapor saturado):

$$\frac{\bar{h}}{k_L} \left[\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_V)} \right]^{1/2} = a^3 \left(\frac{c_{p,L}(T_w - T_{sat})}{\lambda} \right)^2 \text{Pr}_L^{1-3n}$$

donde a y n son constantes que dependen del fluido y del material y condición de la superficie.

FLUIDO	SUPERFICIE	a	n
agua	cobre escoriado	147	1.0
	cobre pulido	78	1.0
	acero inoxidable tratado químicamente	75	1.0
	acero inoxidable pulido	125	1.0
	bronce	167	1.0
	níquel	167	1.0
	platino	77	1.0
n-pentano	cobre pulido	65	1.7
etanol	Cromo	370	1.7
benceno	Cromo	99	1.7

Flujo crítico de calor en ebullición nucleada

Es el máximo flujo de calor para el cual se puede presentar ebullición nucleada. Por encima de este flujo de calor, comienza la transición a ebullición en película.

$$q_{\max} = C\lambda\rho_V \left[\frac{\sigma g(\rho_L - \rho_V)}{\rho_V^2} \right]^{1/4}$$

$C = 0.149$ para superficies planas grandes.

$C = 0.131$ para cilindros horizontales largos, esferas, y otras superficies finitas pero grandes.

El flujo máximo de calor es independiente del material de la superficie pero depende fuertemente de la presión. Superficies reducidas requieren factor de corrección adicional.

NOTACIÓN

Para las propiedades se utiliza el subíndice L si es del líquido o V si es del vapor.

c_p = capacidad calorífica a presión constante (J/kg·K), D = diámetro (m), g = gravedad (m/s²), h = coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m²·K), k = conductividad térmica (W/m·K), Pr = número de Prandtl (adimensional), q = densidad de flujo de calor (W/m²), T_f = temperatura promedio de película (K), T_{sat} = temperatura de saturación (K), T_w = temperatura de la superficie (K), ΔT_e = diferencia de temperatura en exceso (K), ε = emisividad (adimensional), λ = calor latente o entalpía de vaporización (J/kg), μ = viscosidad (Pa·s), ρ = densidad (kg/m³), σ = tensión superficial (N/m), σ = constante de Stefan-Boltzmann (W/m²·K⁴).

Ebullición en película en estanque saturado

El coeficiente de transferencia de calor por convección para esferas o cilindros de diámetro D está dado por:

$$\frac{\bar{h}_{conv} D}{k_V} = C \left[\frac{g\rho_V(\rho_L - \rho_V) D^3 \lambda'}{\mu_V k_V (T_w - T_{sat})} \right]^{1/4}$$

$C = 0.62$ para cilindros horizontales y $C = 0.67$ para esferas.

La densidad del líquido se evalúa a T_{sat} , y todas las propiedades del vapor se evalúan como vapor sobrecalentado a la presión P del sistema y la temperatura promedio $T_f = (T_w + T_{sat})/2$.

λ' es el calor latente corregido $\lambda' = \lambda + 0.8c_{p,V}\Delta T_e$ que toma en cuenta la energía necesaria para mantener la película de vapor por encima de T_{sat} Pr_V .

Si la temperatura de la superficie T_w es elevada, la transferencia de calor por radiación se vuelve importante. El coeficiente de transferencia de calor por radiación está dado por:

$$\bar{h}_{rad} = \frac{\varepsilon\sigma(T_w^4 - T_{sat}^4)}{T_w - T_{sat}}$$

En esta ecuación, σ es la constante de Stefan-Boltzmann (5.67×10^{-8} W/m²·K⁴), y las temperaturas deben ser en kelvin. Ambos coeficientes de transferencia de calor (\bar{h}_{conv} y \bar{h}_{rad}) se combinan en un solo coeficiente \bar{h} , mediante la ecuación implícita:

$$(\bar{h})^{4/3} = (\bar{h}_{conv})^{4/3} + (\bar{h}_{rad})^{4/3}$$

Si $\bar{h}_{rad} < \bar{h}_{conv}$, se puede usar la relación aproximada:

$$\bar{h} \approx \bar{h}_{conv} + \frac{3}{4}\bar{h}_{rad}$$

Flujo mínimo de calor para ebullición en película

Corresponde a la capa mínima estable de vapor sobre la superficie (punto de Leidenfrost). Si el flujo de calor se reduce por debajo de este valor, la película de vapor colapsa y ocurre la transición a ebullición nucleada.

$$q_{\min} = 0.09\lambda\rho_V \left[\frac{g\sigma(\rho_L - \rho_V)}{(\rho_L + \rho_V)^2} \right]^{1/4}$$

Todas las propiedades son evaluadas a la temperatura de saturación.

Algunas Correlaciones para Convección con Cambio de Fase

Adaptado de Incropera et al., "Fundamental of Heat and Mass Transfer", 6a edición, Wiley, y de Perry, "Chemical Engineering Handbook", 6a edición, McGraw-Hill.

CONDENSACIÓN

Generalidades

La densidad de flujo de calor para condensación está dada por la ley de Newton:

$$q = h(T_{sat} - T_w)$$

El número de Reynolds está definido como

$$Re = \frac{4\Gamma}{\mu_L}$$

donde Γ es el flujo másico de condensado por unidad de longitud, en kg/m·s, que se relaciona con el flujo másico \dot{m} de manera específica para cada geometría:

Pared vertical:	$\Gamma = \dot{m}/W$	$W =$ ancho de la pared
Tubos verticales:	$\Gamma = \dot{m}/\pi D$	$D =$ diámetro del tubo
Tubos horizontales:	$\Gamma = \dot{m}/2L$	$L =$ longitud del tubo

El flujo en película es laminar si $Re < 2100$.

Condensación en película laminar en placa vertical

El número de Nusselt global para una placa vertical de altura L está dado por:

$$\overline{Nu} \equiv \frac{\bar{h}L}{k_L} = 0.943 \left[\frac{g\rho_L(\rho_L - \rho_V)L^3\lambda'}{4\mu_L k_L (T_{sat} - T_w)} \right]^{1/4}$$

donde $\lambda' = \lambda + 0.68c_{p,L}(T_{sat} - T_w)$ es el calor latente corregido para tomar en cuenta los efectos de la convección.

La densidad del vapor ρ_V y el calor latente λ se evalúan a la temperatura de saturación; todas las propiedades del líquido se evalúan a la temperatura promedio $T_f = (T_{sat} + T_w)/2$.

Estas correlaciones se pueden usar también para condensación (interna o externa) en cilindros verticales si el espesor de la película es mucho menor que el radio del cilindro ($\delta \ll R$).

$$\delta(x) = \left[\frac{4\mu_L k_L (T_{sat} - T_w)x}{g\rho_L(\rho_L - \rho_V)\lambda'} \right]^{1/4}$$

Condensación en película laminar en placa inclinada

Cuando el ángulo de inclinación θ no es muy grande, se puede emplear las mismas correlaciones que para placa vertical, simplemente cambiando g por $g\cos\theta$.

Condensación en película laminar en tubos verticales

$$\frac{\bar{h}L}{k_L} = 0.943 \left(\frac{L^3 \rho_L^2 g \lambda}{k_L \mu_L (T_{sat} - T_w)} \right)^{1/4} = 0.925 \left(\frac{L^3 \rho_L^2 g}{\mu_L \Gamma} \right)^{1/3}$$

Para condensación de vapor de agua a presión atmosférica:

$$\bar{h} \approx 2954 \left(\frac{D}{\dot{m}} \right)^{1/3} \quad \text{con } D \text{ en [m] y } \dot{m} \text{ en [kg/s]}$$

y para la mayoría de los vapores orgánicos en su punto de ebullición normal:

$$\bar{h} \approx 457 \left(\frac{D}{\dot{m}} \right)^{1/3} \quad \text{con } D \text{ en [m] y } \dot{m} \text{ en [kg/s]}$$

Condensación en película laminar en tubos horizontales

$$\frac{\bar{h}D}{k_L} = 0.73 \left(\frac{D^3 \rho_L^2 g \lambda}{k_L \mu_L (T_{sat} - T_w)} \right)^{1/4} = 0.76 \left(\frac{D^3 \rho_L^2 g}{\mu_L \Gamma} \right)^{1/3}$$

Para condensación de vapor de agua a presión atmosférica:

$$\bar{h} \approx 2080 \left(\frac{L}{\dot{m}} \right)^{1/3} \quad \text{con } L \text{ en [m] y } \dot{m} \text{ en [kg/s]}$$

y para la mayoría de los vapores orgánicos en su punto de ebullición normal:

$$\bar{h} \approx 324 \left(\frac{L}{\dot{m}} \right)^{1/3} \quad \text{con } L \text{ en [m] y } \dot{m} \text{ en [kg/s]}$$

Cuando la condensación ocurre en un banco de N tubos horizontales alineados uno sobre el otro, de tal forma que el condensado descienda laminarmente de un tubo al siguiente, el coeficiente promedio \bar{h}_N para todo el banco está relacionado con el coeficiente promedio para el primer tubo \bar{h}_1 :

$$\bar{h}_N = \bar{h}_1 N^{-1/4}$$

NOTACIÓN

Para las propiedades se utiliza el subíndice L si es del líquido o V si es del vapor.

c_p = capacidad calorífica a presión constante (J/kg·K), D = diámetro (m), g = gravedad (m/s²), h = coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m²·K), k = conductividad térmica (W/m·K), L = longitud (m), \dot{m} = flujo másico (kg/s), q = densidad de flujo de calor (W/m²), Re = número de Reynolds (adimensional), T_f = temperatura promedio de película (K), T_{sat} = temperatura de saturación (K), T_w = temperatura de la superficie (K), x = distancia desde el borde superior (m), Γ = flujo másico por unidad de longitud (kg/m·s), δ = espesor de película (m), ε = emisividad (adimensional), λ = calor latente o entalpía de vaporización (J/kg), μ = viscosidad (Pa·s), ρ = densidad (kg/m³), σ = tensión superficial (N/m), σ = constante de Stefan-Boltzmann (W/m²·K⁴).