

## 1. Przewodzenie

Strumień przewodzonego ciepła dla ścianki płaskiej jednowarstwowej

$$Q = \frac{A\lambda}{\delta}(T_{w1} - T_{w2}) \quad [W] \quad (1.1)$$

Strumień przewodzonego ciepła dla ścianki płaskiej dwuwarstwowej

$$Q = \frac{A(T_{w1} - T_{w3})}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} \quad (1.2)$$

$T_{w1}, T_{w3}$  – temperatury na zewnętrznych powierzchniach ścianki

Strumień przewodzonego ciepła dla ścianki płaskiej wielowarstwowej

$$Q = \frac{A(T_1 - T_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (1.3)$$

lub

$$Q = \frac{A\lambda_z}{\delta}(T_1 - T_{n+1}) \quad (1.4)$$

gdzie

$$\delta = \sum_{i=1}^n \delta_i; \quad \lambda_z = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (1.5)$$

Gęstość strumienia przewodzonego ciepła

$$q = \frac{Q}{A} \quad [W/m^2] \quad (1.6)$$

Strumień przewodzonego ciepła dla jednowarstwowej ścianki cylindrycznej

$$Q = \frac{2\pi l \lambda}{\ln \frac{d_2}{d_1}}(T_{w1} - T_{w2}) \quad (1.7)$$

gdzie  $l$  jest długością cylindra.

Strumień przewodzonego ciepła dla ścianki cylindrycznej dwuwarstwowej

$$Q = \frac{2\pi l (T_{w1} - T_{w3})}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2}} \quad (1.8)$$

Strumień przewodzonego ciepła dla ścianki cylindrycznej wielowarstwowej

$$Q = \frac{2\pi l (T_1 - T_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} \quad (1.9)$$

lub

$$Q = \frac{2\pi \lambda_z l}{\ln \frac{d_{n+1}}{d_1}}(T_1 - T_{n+1}) \quad (1.10)$$

gdzie

$$\lambda_z = \frac{\ln \frac{d_{n+1}}{d_1}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} \quad (1.11)$$

Strumień przewodzonego ciepła przypadający na jednostkę długości ścianki cylindrycznej

$$q_l = \frac{Q}{l} \quad [W/m] \quad (1.12)$$

Opór cieplny przewodzenia dla wielowarstwowej ścianki płaskiej

$$R_\lambda = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \sum_{i=1}^n R_{\lambda i} \quad \left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right] \quad (1.13)$$

Gęstość strumienia ciepła

$$q = \frac{T_1 - T_{n+1}}{R_\lambda} \quad (1.14)$$

Liniowy opór przewodzenia dla wielowarstwowej ścianki cylindrycznej

$$R_{\lambda l} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} = \sum_{i=1}^n R_{\lambda l i} \quad \left[ \frac{m \cdot K}{W} \right] \quad (1.15)$$

$$R_{\lambda l} = \frac{1}{2\lambda_z} \ln \left( \frac{d_{n+1}}{d_1} \right) \quad (1.16)$$

Strumień ciepła na jednostkę długości cylindra

$$q_l = \frac{\pi (T_1 - T_{n+1})}{R_{\lambda l}} \quad \left[ \frac{W}{m} \right] \quad (1.17)$$

## 2. Wnikanie, przenikanie

Wnikanie ciepła

$$Q = A\alpha(T_w - T_f) \quad (2.1)$$

Przenikanie dla zewnętrznej powierzchni wymiany ciepła

$$Q = A_z k_z \Delta T \quad (2.2)$$

Współczynnik przenikania ciepła odniesiony do zewnętrznej powierzchni wymiany ciepła ścianki cylindrycznej ( $d_2 > d_1$ )

$$\frac{1}{k_z} = \frac{d_2}{d_1 \alpha_1} + \frac{d_2}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2} \left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right] \quad (2.3)$$

$$k_l = k_z d_2 \quad (2.4)$$

Zewnętrzna powierzchnia wymiany ciepła dla ścianki cylindrycznej

$$A_z = \pi d_2 l \quad (2.5)$$

Przenikanie przez ściankę cylindryczną o długości  $l$

$$Q = \pi l k_l (T_{f1} - T_{f2}) \quad [W] \quad (2.6)$$

Przenikanie przez  $n$  ścianek rurek każda o długości  $l$  w wymienniku ciepła

$$Q = \pi n l k_l \Delta T_{ln} \quad [W] \quad (2.7)$$

Liniowy współczynnik przenikania ciepła dla cylindrycznej ścianki jednowarstwowej

$$\frac{1}{k_l} = \frac{1}{d_1 \alpha_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{d_2 \alpha_2} \left[ \frac{m \cdot K}{W} \right] \quad (2.8)$$

Liniowy współczynnik przenikania ciepła dla ścianki cylindrycznej dwuwarstwowej

$$\frac{1}{k_l} = \frac{1}{d_1 \alpha_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{d_3 \alpha_2} \left[ \frac{m \cdot K}{W} \right] \quad (2.9)$$

**3. Wnikanie ciepła dla powierzchni ożebrowanej**

$$m = \sqrt{\frac{2\alpha}{\delta\lambda}} \left[ \frac{1}{m} \right] \quad (3.1)$$

Sprawność żebra

$$\eta_z = \frac{T_z - T_f}{T_w - T_f} \quad (3.2)$$

Sprawność powierzchni ożebrowanej

$$\eta_{poz} = 1 - \frac{A_z}{A} (1 - \eta_z) \quad (3.3)$$

$$Q = A\alpha (T_w - T_f) \eta_{poz} \quad (3.4)$$

Współczynnik przenikania ciepła dla ożebrowanej ścianki płaskiej odniesiony do strony ożebrowanej

$$\frac{1}{k_z} = \frac{A_2}{A_1 \alpha_1} + \frac{A_2 \delta}{A_1 \lambda} + \frac{1}{\alpha_2 \eta_{poz}} \quad (3.5)$$

Współczynnik przenikania ciepła dla pęczka  $n$  rurek o długości  $l$ , ożebrowanych na zewnątrz, odniesiony do zewnętrznej powierzchni wymiany ciepła,  $A_2$

$$\frac{1}{k_z} = \frac{A_2}{A_1 \alpha_1} + \frac{A_2}{2\pi l n \lambda} \ln \left( \frac{d_2}{d_1} \right) + \frac{1}{\alpha_2 \eta_{poz}} \quad (3.6)$$

$A_1$  – powierzchnia wymiany ciepła wewnątrz rurek

#### 4. Liczby podobieństwa

W poniższych zależnościach  $l$  jest wymiarem charakterystycznym

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (4.1)$$

$$Re = \frac{w \cdot l}{\nu} \quad (4.2)$$

Dla przepływu w rurze  $l = d_w$ .

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} \quad (4.3)$$

$$Pe = Re \cdot Pr \quad (4.4)$$

$$Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta T \quad (4.5)$$

$$St = \frac{\alpha}{G c_p} \quad (4.6)$$

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2} \quad (4.7)$$

$$j = St Pr^{2/3} \quad (4.8)$$

#### 5. WZORY RÓŻNE

Współczynnik dyfuzyjności cieplnej

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left[ m^2/s \right] \quad (5.1)$$

Strumień czynnika

$$m = A w \rho \quad [kg/s] \quad (5.2)$$

Prędkość masowa

$$G = \rho w \left[ \text{kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{s}) \right] \quad (5.3)$$

Pojemność cieplna czynnika

$$W = mc_p [W/K] \quad (5.4)$$

Średnica hydrauliczna kanału

$$d_h = \frac{4A}{\Omega} \quad (5.5)$$

## 6. Wymienniki ciepła

Średnia logarytmiczna różnica temperatur dla współprądu i przeciwprądu

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T' - \Delta T''}{\ln \left( \frac{\Delta T'}{\Delta T''} \right)} \quad (6.1)$$

Poprawka  $\varepsilon_{\Delta T}$  dla przepływu mieszanego

$$P = \frac{T_2'' - T_2'}{T_1' - T_2'} = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_{\max}} \quad (6.2)$$

$$R = \frac{T_1' - T_1''}{T_2'' - T_2'} = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \quad (6.3)$$

$$\Delta T_{sr} = \Delta T_{ln pp} \varepsilon_{\Delta T} \quad (6.4)$$

Sprawność wymiennika

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} \quad (6.5)$$

$$Q_{\max} = W_{\min} (T_1' - T_2') \quad (6.6)$$

Strumień ciepła przekazywany w wymienniku

$$Q = W_1 (T_1' - T_1'') = W_2 (T_2'' - T_2') \quad (6.7)$$

Liczba jednostek przenikania ciepła

$$N = \frac{Ak}{W_{\min}} \quad (6.8)$$

Stosunek pojemności cieplnych czynników

$$W = \frac{W_{\min}}{W_{\max}} \quad (6.9)$$

## 7. Opory hydrauliczne

Spadek ciśnienia w rurce spowodowany tarciem

$$\Delta p = 4f \frac{L}{d_w} \frac{\rho w^2}{2} \quad (7.1)$$

## OZNACZENIA

$A [m^2]$  - powierzchnia wymiany ciepła

$Eu$  - liczba *Eulera*

$f$  - współczynnik tarcia *Fanninga*

$G [kg / (m^2 \cdot s)]$  - prędkość masowa

$Gr$  - liczba *Grashofa*

$j$  - moduł *Colburna*

$l [m]$  - wymiar charakterystyczny, może nim być średnica hydrauliczna kanału

$l [m]$  - długość rury; długość kanału

$m [kg/s]$  - strumień czynnika

$Nu$  - liczba *Nusselta*

$Pe$  - liczba *Pécleta*

$St$  - liczba *Stantona*

$T_z$  - średnia temperatura żebra

$w [m/s]$  - prędkość czynnika

$\alpha [W / (m^2 \cdot K)]$  - współczynnik wnikania (przejmowania) ciepła (*alfa*)

$\varepsilon_{\Delta T}$  - poprawka przy obliczaniu średniej różnicy temperatur przy przepływie mieszanym (*epsilon*)

$\eta_z$  - sprawność żebra (*eta*)

$\eta_{poz}$  - sprawność powierzchni ożebrowanej (*eta*)

$\lambda [W / (m \cdot K)]$  - współczynnik przewodzenia ciepła (*lambda*)

$\lambda_z$  - równoważny (zastępczy) współczynnik przewodzenia ciepła

$\mu [Pa \cdot s]$  - współczynnik lepkości dynamicznej (*mi*)

$\nu [m^2 / s]$  - współczynnik lepkości kinematycznej (*ni*)

$\rho$  [kg / m<sup>3</sup>] - gęstość (*rho*)

$\Omega$  [m] – obwód zwilżony kanału (*omega*)