

Przenoszenie ciepła

Lista nr 1

PODSTAWOWE PRAWA I WZORY

- 1) Gęstość strumienia ciepła

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (1)$$

gdzie:

\dot{Q} strumień ciepła, W

A pole powierzchni przez który przepływa strumień ciepła \dot{Q} , m²

- 2) Prawo Fouriera

$$\dot{\mathbf{q}} = -\lambda \nabla t = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x}, \frac{\partial t}{\partial y}, \frac{\partial t}{\partial z} \right) \quad (2)$$

- 3) Gęstość strumienia ciepła przewodzenia przez ściankę płaską jednowarstwową

$$\dot{q} = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\frac{\delta}{\lambda}} \quad (3)$$

gdzie:

t_w temperatura na powierzchni ściany, °C

δ grubość ściany, m

λ współczynnik przewodzenia ciepła, W/(m K)

- 4) Gęstość strumienia ciepła przewodzenia przez ściankę płaską „n”-warstwową

$$\dot{q} = \frac{t_{w1} - t_{wn+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (4)$$

- 5) Gęstość strumienia ciepła przewodzenia przez ściankę cylindryczną jednowarstwową

$$\dot{q}_L = \frac{\dot{Q}}{L} = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\frac{\ln(d_2 / d_1)}{2\pi\lambda}} \quad (5)$$

gdzie:

\dot{q}_L gęstość liniowa strumienia ciepła, W/m

L długość rury, m

d średnica rury (wewnętrzna (1) i zewnętrzna (2)), m

- 6) Zależność między \dot{q} i \dot{q}_L jest następująca

$$\dot{q}_L = \pi d \dot{q} \quad (6)$$

7) Gęstość strumienia ciepła przewodzenia przez ściankę cylindryczną „n”-warstwową

$$\dot{q}_L = \frac{\dot{Q}}{L} = \frac{t_{w1} - t_{wn+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\ln(d_{i+1}/d_i)}{2\pi\lambda_i}} \quad (7)$$

8) Strumień ciepła przewodzenia przez ściankę kulistą

$$\dot{Q} = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\frac{1}{4\pi\lambda} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} \quad (8)$$

gdzie:

r promień kuli (wewnętrzny (1) i zewnętrzny (2)), m

9) Strumień ciepła przewodzenia przez ściankę kulistą „n”-warstwową

$$\dot{Q} = \frac{t_{w1} - t_{wn+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi\lambda_i} \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_{i+1}} \right)} \quad (9)$$

10) Prawo Newtona (gęstość strumienia wnikania ciepła)

$$\dot{q} = \alpha(t - t_w) \quad (10)$$

gdzie:

α współczynnik wnikania ciepła, W/(m² K)

t temperatura płynu, °C

11) Przenikanie ciepła przez ściankę płaską jednowarstwową

$$\dot{q} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (11)$$

12) Przenikanie ciepła przez ściankę płaską „n”-warstwową

$$\dot{q} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{n+1}}} \quad (12)$$

13) Przenikanie ciepła przez ściankę cylindryczną jednowarstwową

$$\dot{q}_L = \frac{\dot{Q}}{L} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\pi d_1 \alpha_1} + \frac{\ln(d_2/d_1)}{2\pi\lambda} + \frac{1}{\pi d_2 \alpha_2}} \quad (13)$$

14) Przenikanie ciepła przez ściankę cylindryczną „n”-warstwową

$$\dot{q}_L = \frac{\dot{Q}}{L} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\frac{1}{\pi d_1 \alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\ln(d_{i+1} / d_i)}{2\pi \lambda_i} + \frac{1}{\pi d_{n+1} \alpha_{n+1}}} \quad (14)$$

15) Przenikanie ciepła przez ściankę kulistą jednowarstwową

$$\dot{Q} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{4\pi r_1^2 \alpha_1} + \frac{1}{4\pi \lambda} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{1}{4\pi r_2^2 \alpha_2}} \quad (15)$$

16) Przenikanie ciepła przez ściankę kulistą „n”-warstwową

$$\dot{Q} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\frac{1}{4\pi r_1^2 \alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi \lambda_i} \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_{i+1}} \right) + \frac{1}{4\pi r_{n+1}^2 \alpha_{n+1}}} \quad (16)$$

17) Pojęcie oporu cieplnego R

$$\dot{q} = \frac{\Delta t}{\sum R} \quad (17)$$

Tab. 1. Wzory na opory cieplne przewodzenia i konwekcji dla podstawowych rodzajów przegród

Opór cieplny	Ścianka płaska	Ścianka cylindryczna	Ścianka kulista
Przewodzenia	$\frac{\delta}{\lambda}$	$\frac{\ln(d_2 / d_1)}{2\pi \lambda}$	$\frac{1}{4\pi \lambda} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$
Konwekcji	$\frac{1}{\alpha}$	$\frac{1}{\pi d \alpha}$	$\frac{1}{4\pi r^2 \alpha}$

ZADANIA

Zad. 1. (1 punkt) Płaską ścianę pieca przemysłowego zbudowano z 3 warstw: wewnętrznej z cegły szamotowej o współczynniku przewodzenia ciepła $\lambda_1 = 1,3 \text{ W/(m K)}$, środkowej z cegły izolacyjnej ($\lambda_2 = 0,4 \text{ W/(m K)}$) o grubości $\delta_2 = 0,24 \text{ m}$ i zewnętrznej z cegły budowlanej ($\lambda_3 = 0,75 \text{ W/(m K)}$) o grubości $\delta_3 = 0,12 \text{ m}$. Temperatura wewnętrznej powierzchni ścianki wynosi $T_{w1} = 1474 \text{ K}$, zewnętrznej $T_{w4} = 323 \text{ K}$. Obliczyć: a) jaka powinna być minimalna grubość $\delta_{1\text{min}}$ warstwy szamotu, aby temperatura T_{w2} cegły izolacyjnej nie przekraczała 1223 K , b) gęstość strat ciepła q_{str} przez ścianę pieca do otoczenia, c) grubość δ_1 warstwy szamotu w przypadku gdy pomiędzy warstwami wewnętrzną i środkową znajduje się szczelina powietrzna o grubości $\delta_p = 0,01 \text{ m}$ i współczynniku $\lambda_p = 0,15 \text{ W/(m K)}$ (pozostałe wielkości b.z). **Odp: a) $\delta_{1\text{min}} = 0,275 \text{ m}$, b) $q_{\text{str}} = 1184 \text{ W/m}^2$, c) $\delta_1 = 0,188 \text{ m}$.**

Zad. 2. (1 punkt) Ściana igloo zbudowana jest z desek o grubości $\delta_1 = 0,02$ m, warstwy ziemi $\delta_2 = 0,15$ m i warstwy śniegu. Współczynniki przewodzenia ciepła wynoszą odpowiednio: $\lambda_1 = 0,2$ W/(m K), $\lambda_2 = 0,5$ W/(m K), $\lambda_3 = 0,4$ W/(m K). Obliczyć minimalną gęstość strat ciepła q_{\min} do otoczenia oraz dopuszczalną grubość δ_3 warstwy śniegu, jeżeli temperatura powierzchni desek wewnątrz igloo wynosi $T_{w1} = 283$ K a temperatura zewnętrznej powierzchni śniegu $T_{w4} = 233$ K. **Odp: $q_{\min} = 25$ W/m², $\delta_3 = 0,64$ m.**

Zad. 3. (1 punkt) Rurociąg parowy o średnicach $d_w/d_z = 110/120$ mm pokryto izolacją o grubości $\delta_{iz} = 60$ mm. Mając dane temperatury wewnętrznej powierzchni ścianki rury $T_{w1} = 823$ K i zewnętrznej powierzchni izolacji $T_{w3} = 339$ K oraz współczynniki przewodzenia ciepła dla stali $\lambda_1 = 45$ W/(m K) i dla izolacji $\lambda_{iz} = 0,06$ W/(m K) obliczyć gęstość liniową q_L strat strumienia ciepła do otoczenia oraz temperaturę T_{w2} na styku rurociągu i warstwy izolacji. **Odp: $q_L = 263,2$ W/m, $T_{w2} = 822,9$ K.**

Zad. 4. (1 punkt) Stalowy rurociąg o średnicach $d_w/d_z = 100/110$ mm i współczynniku przewodzenia ciepła $\lambda_1 = 40$ W/(m K) pokryto dwoma warstwami izolacji o grubości $\delta_2 = \delta_3 = 30$ mm. Temperatura wewnętrznej powierzchni rurociągu $T_{w1} = 623$ K i zewnętrznej powierzchni izolacji $T_{w4} = 323$ K. Określić gęstość liniową q_L strumienia ciepła oraz temperaturę T_{w3} na styku izolacji, jeżeli warstwy przylegają do siebie. Ile będzie wynosić gęstość strumienia ciepła q_L' oraz temperatura $T_{w3'}$, jeżeli warstwy izolacji zostaną zamienione w kolejności. Współczynniki przewodzenia ciepła izolacji wynoszą $\lambda_2 = 0,046$ W/(m K), $\lambda_3 = 0,11$ W/(m K). **Odp: $q_L = 154,3$ W/m, $T_{w3} = 390,5$ K, $q_L' = 179,0$ W/m, $T_{w3'} = 505,2$ K.**

Zad. 5. (1 punkt) Współczynnik przejmowania ciepła od niez izolowanego kulistego zbiornika o średnicy $0,5$ m do otoczenia o temperaturze $T_0 = 293$ K wynosi $\alpha = 10$ W/(m² K). Zbiornik pokryto warstwą izolacji o grubości $\delta = 0,04$ m ($\lambda_{iz} = 0,056$ W/(m K)). Przyjmując temperaturę powierzchni zbiornika $T_{w1} = 363$ K (w obu przypadkach), oraz że współczynnik przejmowania ciepła nie ulega zmianie po nałożeniu izolacji, oblicz o ile procent zmniejszy się strumień strat ciepła do otoczenia. **Odp: o 85,5 %.**

Zad. 6. (0,5 punktu) Obliczyć gęstość strumienia ciepła q przenikającego przez czystą powierzchnię ogrzewalną kotła parowego oraz temperatury na powierzchniach ścianki, jeżeli dane są następujące wielkości: temperatura spalin $T_1 = 1273$ K, temperatura wrzącej wody $T_2 = 473$ K, współczynnik przejmowania ciepła od spalin do ścianki $\alpha_1 = 100$ W/(m² K) i od ścianki do wrzącej wody $\alpha_2 = 5000$ W/(m² K) oraz współczynnik przewodzenia ciepła materiału ścianki $\lambda_2 = 50$ W/(m K) i grubość ścianki $\delta_2 = 0,012$ m. **Odp: $q = 76,5$ kW/m², $T_{w1} = 508$ K, $T_{w2} = 488$ K.**

Zad. 7. (1 punkt) Rozwiązać zadanie poprzednie przy założeniu, że w czasie eksploatacji powierzchnia ogrzewalna kotła parowego od strony spalin pokryła się warstwą sadzy o grubości $\delta_1 = 0,001$ m ($\lambda_1 = 0,08$ W/(m K)) a od strony wody warstwą kamienia kotłowego o grubości $\delta_3 = 0,002$ m ($\lambda_3 = 0,8$ W/(m K)). Obliczyć gęstość strumienia ciepła przenikającego przez zanieczyszczoną powierzchnię ogrzewalną oraz temperatury powierzchni poszczególnych warstw T_{w1} , T_{w2} , T_{w3} , T_{w4} . Porównać wyniki rozwiązania z odpowiedzią poprzedniego zadania i określić zmniejszenie gęstości strumienia ciepła w %. **Odp: $q = 31,5$ kW/m², $T_{w1} = 958$ K, $T_{w2} = 564$ K, $T_{w3} = 556$ K, $T_{w4} = 479$ K, $\delta q = 58,9$ %.**