

WYMIANA (TRANSPORT) CIEPŁA

Trzy podstawowe mechanizmy transportu ciepła (wymiany ciepła):

1. **PRZEWODZENIE** - przekazywanie energii od jednej cząstki do drugiej, za pośrednictwem ruchu drgającego tych cząstek. Proces ten trwa dopóty, dopóki temperatura ciała nie zostanie wyrównana w całej rozpatrywanej objętości. Dotyczy to bezpośredniego kontaktu ciała z ciałem, części ciała z ciałem.
2. **PROMIENIOWANIE** - przekazywanie ciepła w postaci energii promieniowania, którego natura jest taka sama jak energii świetlnej. Energia cieplna przekształca się w energię promieniowania, przebywa określoną przestrzeń z prędkością światła, aby w innym miejscu przekształcić się całkowicie lub częściowo w energię cieplną.
3. **KONWEKCJA (WNIKANIE)** - wiąże się z ruchem konwekcyjnym gazów lub cieczy, wywołanym bądź różnicą gęstości (różnicą temperatur), bądź przez wymuszenie czynnikami zewnętrznymi.

W przemyśle ruch ciepła zachodzi równocześnie dwoma lub trzema sposobami, najczęściej odbywa się przez **przewodzenie** i **konwekcję**. Mechanizm transportu ciepła łączący wymienione sposoby ruchu ciepła nazywa się **PRZENIKANIEM CIEPŁA**.

PRZEWODZENIE

Stan cieplny ciała określa temperatura. Miejsca geometryczne o jednakowej temperaturze tworzą **powierzchnie izotermiczne**, linie o jednakowej temperaturze tworzą **izotermy**.

Temperatura ciała zmienia się najszybciej w kierunku prostopadłym do izoterm.

Przewodzenie dotyczy głównie ciał stałych, gdyż to ciała stałe najlepiej przewodzą ciepło.

PODSTAWOWE DEFINICJE

NATĘŻENIE PRZEPIYWU CIEPŁA (STRUMIEN CIEPLNY) Q_*

ilość ciepła jaka przepływa przez dane ciało w jednostce czasu

$$Q_* = \frac{dQ}{dt} \left[\frac{\text{J}}{\text{s}} \right] = [\text{W}]$$

gdzie:

Q-ciepło,

t-czas,

GĘSTOŚĆ STRUMIENIA CIEPLNEGO q (OBCIĄŻENIE CIEPLNE)

natężenie przepływu ciepła odniesione do jednostki powierzchni (straty ciepła przypadające na jednostkę powierzchni)

$$q = \frac{Q_*}{A} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

gdzie:

A-powierzchnia,

$$\text{Natężenie przepływu ciepła } Q_* = q \cdot A \text{ [W]}$$

Przewodzenie ciepła jest USTALONE gdy

$dQ/dt = \text{const}$ lub

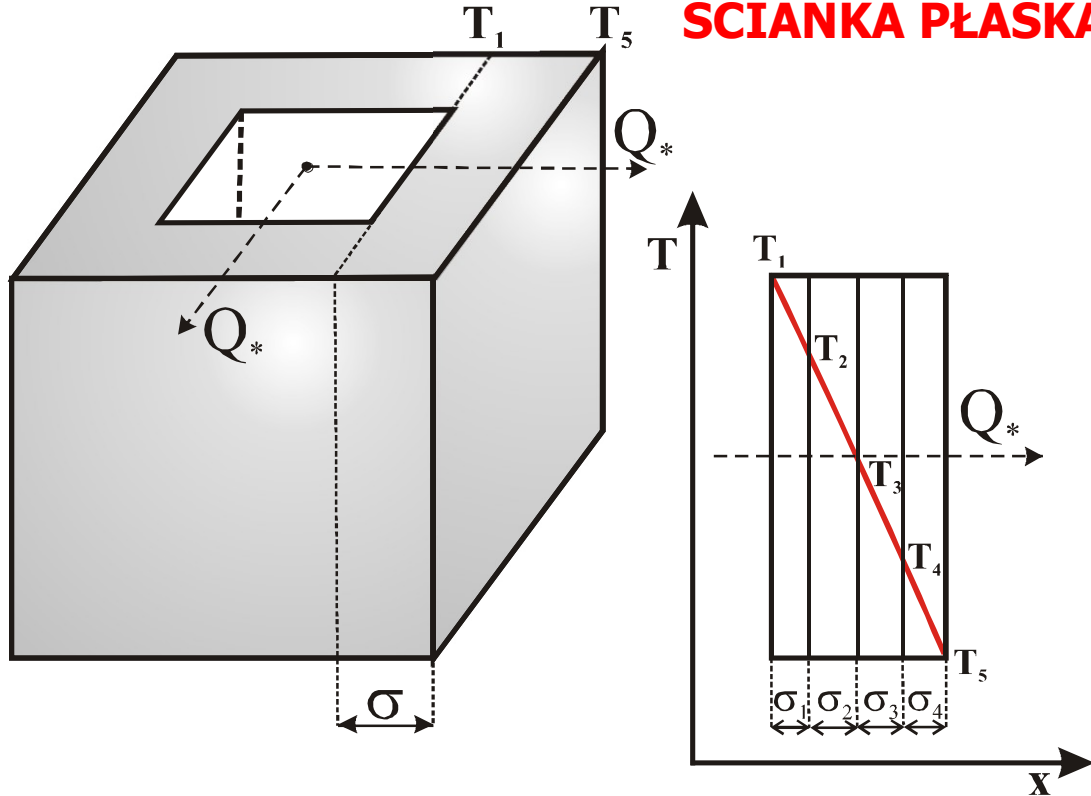
$$\mathbf{Q_{*1} = Q_{*2} = Q_{*3}}$$

Przewodzenie ciepła jest NIEUSTALONE gdy

$dQ/dt \neq \text{const}$ lub

$$\mathbf{Q_{*1} \neq Q_{*2} \neq Q_{*3}}$$

ŚCIANKA PŁASKA



Ścianka płaska jednowarstwowa:

gęstość strumienia ciepłego $q = \frac{\lambda}{\sigma} \cdot (T_1 - T_2)$ [W/m²]

temperatura $T_1 >$ temperatury T_2

gdzie:

σ -grubość warstwy (ścianki),

natężenie przepływu ciepła $Q_* = \frac{\lambda \cdot A}{\sigma} \cdot (T_1 - T_2)$ [W]

Całkowita ilość przewodzonego ciepła przez ciało:

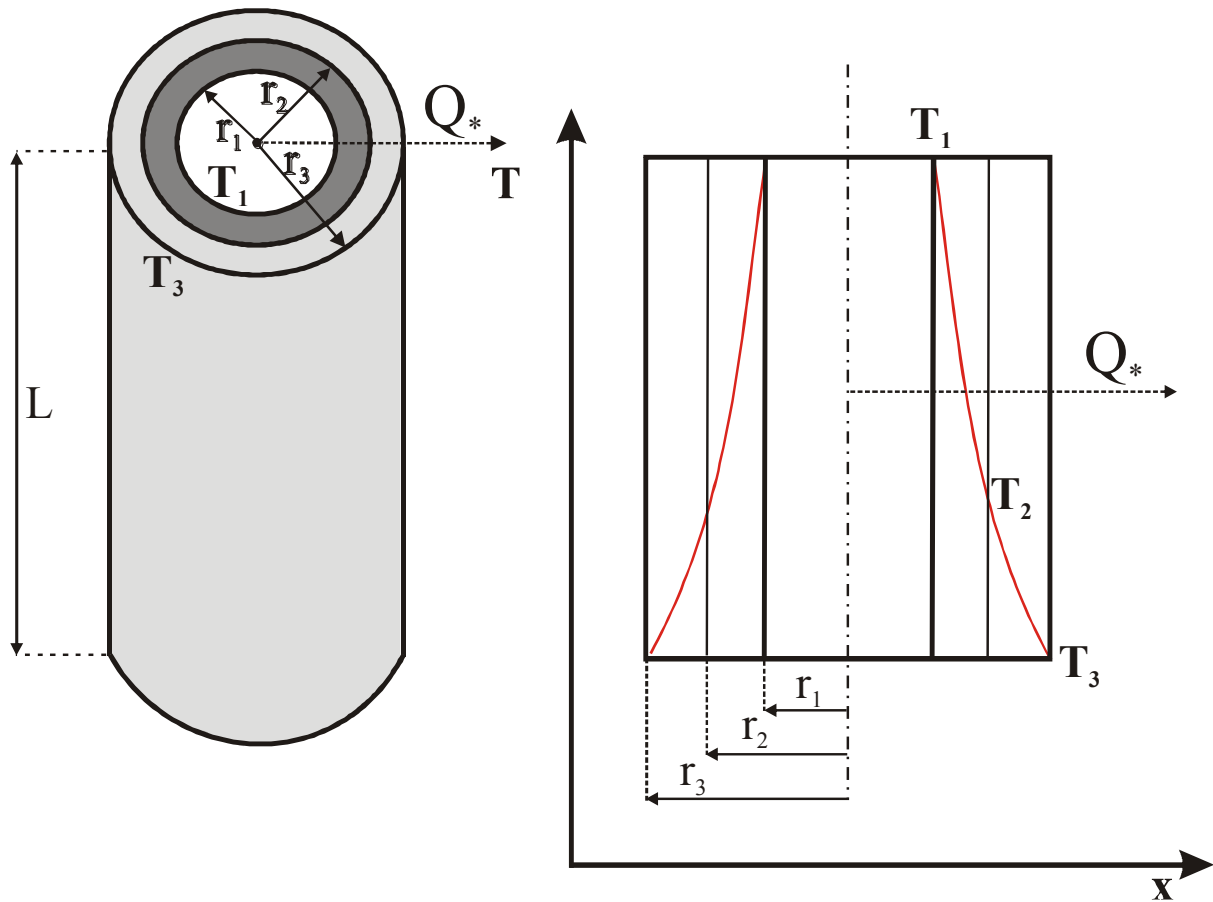
$$Q = q \cdot A \cdot t \text{ [J]}$$

Ścianka płaska wielowarstwowa:

natężenie przepływu ciepła $Q_* = \frac{A \cdot (T_1 - T_2)}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\sigma_i}{\lambda_i}}$ [W]

gęstość strumienia ciepłego $q = \frac{(T_1 - T_2)}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\sigma_i}{\lambda_i}}$ $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$

ŚCIANKA CYLINDRYCZNA



Przewodzenie ciepła przez ściankę cylindryczną:

$$Q_* = \frac{\pi \cdot L \cdot (T_1 - T_2)}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\lambda_i} \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} \quad [\text{W}]$$

PRZEWODZENIE opiera się na prawie **FOURIERA** mówiącym o ilości ciepła przewodzonego przez powierzchnię **A** prostopadłą do kierunku ruchu ciepła:

$$dQ = -\lambda \cdot A \cdot \text{grad}T \cdot (d\tau)$$

gdzie:

T-temperatura,

λ -współczynnik przewodzenia ciepła,

τ -czas,

podstawiając za:

$$\text{grad}T = dT/dx$$

otrzymujemy:

$$dQ = -\lambda \cdot A \cdot (dT/dx) \cdot (d\tau)$$

gdzie:

x (σ)-grubość warstwy,

wiedząc, że:

$$dQ/d\tau = Q_*$$

zakładamy $dQ/d\tau = \text{const}$ – ustalone przewodzenie ciepła

otrzymujemy:

$$Q_* = -\lambda \cdot A \cdot (dT/dx) \quad [\text{W}]$$

rozważając dalej:

$$Q_* = q \cdot A$$

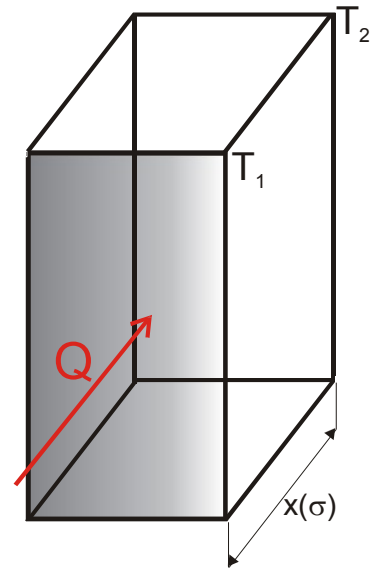
stąd:

$$q = -\lambda \cdot (dT/dx) \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

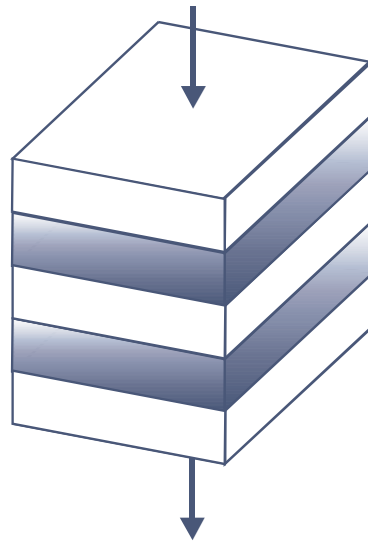
Z powyższych równań wynika, że:

$$\lambda = -\frac{dQ/d\tau}{A \cdot (dT/dx)} \quad \left[\frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot \text{deg}/\text{m})} = \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{deg}} \right]$$

zatem **współczynnik przewodzenia ciepła (λ)** jest to ilość ciepła przewodzona przez ciało o powierzchni 1m^2 , grubości ścianki 1m , gdy różnica temperatur pomiędzy przeciwległymi ściankami wynosi 1deg , w ciągu 1s .



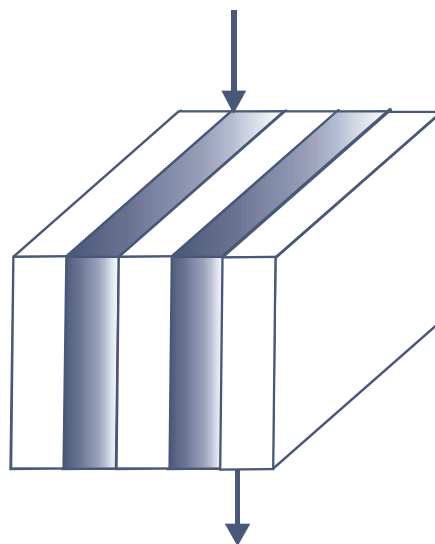
WSPÓŁCZYNNIK PRZEWODZENIA CIEPŁA MATERIAŁÓW WIELOFAZOWYCH (KOMPOZYTÓW) MODEL SZEREGOWY



Przewodzenie w kierunku prostopadłym do warstw
(model szeregowy):

$$\lambda = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 \cdot V_2 + \lambda_2 \cdot V_1}$$

MODEL RÓWNOLEGŁY



Przewodzenie w kierunku równoległym do warstw
(model równoległy):

$$\lambda = \lambda_1 \cdot V_1 + \lambda_2 \cdot V_2$$

gdzie:

V_1, V_2 – udziały objętościowe faz składowych kompozytu,

PROMIENIOWANIE

Wymiana ciepła z otoczeniem przez promieniowanie cieplne. Przekształcanie energii cieplnej na promienistą – promieniowanie cieplne, proces odwrotny to pochłanianie (absorpcja ciepła). Promieniowanie cieplne ma tę samą naturę, co promieniowanie świetlne, podlega tym samym prawom.

PROMIENIE WIDZIALNE MAJĄ DŁUGOŚĆ OD 0,4 DO 0,8 μm ZAŚ
PROMIENIE CIEPLNE (PODCZERWONE) OD 0,8 DO 40 μm .

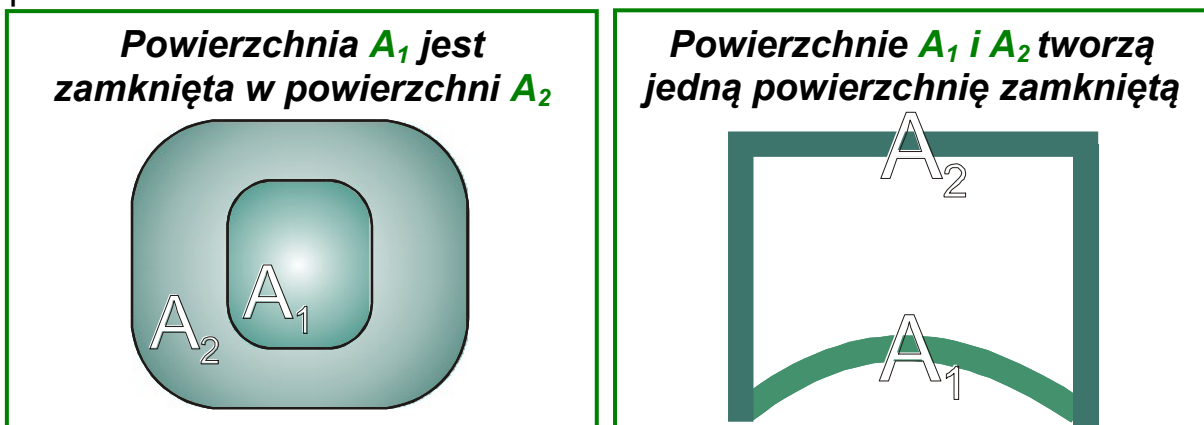
Zgodnie z prawem Stefana–Boltzmana

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4$$

gdzie:

σ_0 - stała promieniowania $5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

można wyznaczać ilość wymienionego ciepła (natężenie przepływu ciepła) między powierzchniami dwóch ciał zależnie od położenia tych powierzchni:



$$A_2 > A_1$$

Dla ciał szarych:

$$E = C_0 \cdot \varepsilon \cdot (T/100)^4 = C \cdot (T/100)^4$$

gdzie:

ε - stopień czarności ciała czyli emisyjność,

EMISYJNOŚĆ CAŁKOWITA – stosunek natężenia promieniowania ciała szarego do natężenie promieniowania ciała doskonale czarnego w temperaturze T.

$$\varepsilon = E/E_0 = \frac{C(T/100)^4}{C_0(T/100)^4}$$

Zatem, dla dwóch ciał wymieniających ciepło:

$$Q_{*1-2} = \varepsilon_{1-2} \cdot C_0 \cdot A_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \text{ [W]}$$

gdzie: C_0 – stała promieniowania = $5,67 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K}^4]$

ε - emisyjność (stopień czarność ciała)

zawiera się w granicach od 0 do 1

ZASTĘPCZY STOPIEŃ CZARNOŚCI ε_{1-2}

$$\text{wzór ogólny } \varepsilon_{1-2} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + A_1/A_2 \cdot (1/\varepsilon_2 - 1)}$$

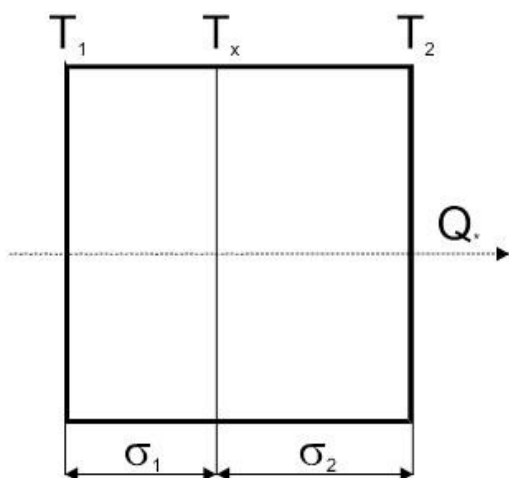
gdy $A_2 \gg A_1$ wtedy $\varepsilon_{1-2} \cong \varepsilon_1$

Dla równoległych dostatecznie dużych płyt położonych blisko siebie zastępczy stopień czarność oblicza się z wg poniższego wzoru, gdyż wtedy $A_1 = A_2$:

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}$$

ZADANIA

ZADANIE 1



Dane:

$$\sigma_1 = 0,5 \text{ m}$$

$$\sigma_2 = 0,2 \text{ m}$$

$$\lambda_1 = 2 \text{ [W/m}\cdot\text{deg]}$$

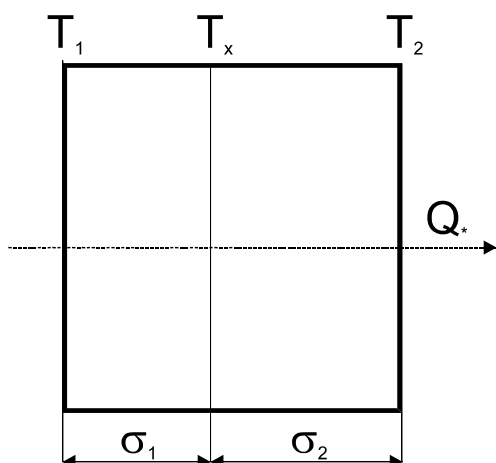
$$\lambda_2 = 0,07 \text{ [W/m}\cdot\text{deg]}$$

$$T_1 = 2500^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 200^\circ\text{C}$$

Obliczyć natężenie przepływu ciepła wiedząc, że $A=2\text{m}^2$. Obliczyć gęstość strumienia cieplnego tej ścianki, opór termiczny oraz wyznaczyć temperaturę T_x . Następnie dobrać grubość warstwy drugiej tak, żeby T_2 wynosiła 80°C oraz wyznaczyć izotermę gdzie temperatura ścianki wynosi 2000°C ?

ZADANIE 2



Dane:

$$T_1 = 1000^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 70^\circ\text{C}$$

$$\sigma_1 = 0,5 \text{ m}$$

$$\sigma_2 = 0,6 \text{ m}$$

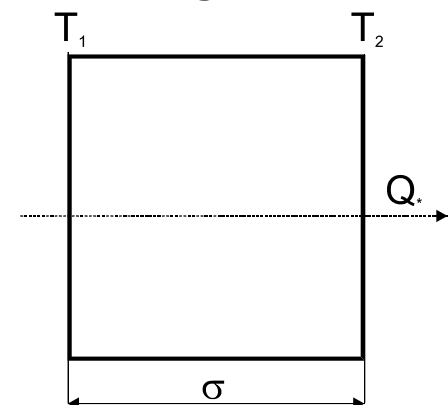
$$\lambda_1 = 1 \text{ [W/m}\cdot\text{deg]}$$

$$\lambda_2 = 0,45 \text{ [W/m}\cdot\text{deg]}$$

Przewodzenie ciepła ustalone $Q_{*1} = Q_{*2}$.

Obliczyć gęstość strumienia cieplnego i natężenie przepływu ciepła tej ścianki, wyznaczyć temperaturę T_x ? Powierzchnia tej ścianki wynosi 1 m^2 .

ZADANIE 3



Dane:

$$\sigma = 0,2 \text{ m}$$

$$T_1 = 300^\circ\text{C}$$

$$\lambda = 0,252 \text{ [W/m}\cdot\text{deg]}$$

$$T_2 = 275^\circ\text{C}$$

$$A = 3,5 \text{ m}^2$$

Obliczyć natężenie przepływu ciepła, gęstość strumienia cieplnego oraz wyznaczyć izotermę, dla której temperatura ścianki będzie równa 280°C . Ponadto obliczyć całkowite ciepło przewodzone przez tą ściankę w ciągu 1s ?

ZADANIE 4

Ściana pieca składa się z trzech warstw. Wewnętrzną warstwę stanowi cegła ognioodporna o grubości $\sigma_1=0,1$ m i współczynnika przewodzenia ciepła $\lambda_1=0,95$ W/m·deg. Środkową warstwę jest cegła zwykła o $\sigma_2=0,2$ m i $\lambda_2=0,65$ W/m·deg, zewnętrzną natomiast izolacja o $\sigma_3=0,06$ m i $\lambda_3=0,1$ W/m·deg. Pomiary temperatury wykazały, że temperatura wewnętrzna ściany wynosi 750°C , a ściany zewnętrznej 80°C . Obliczyć straty ciepłe pieca z 1m^2 powierzchni ściany oraz zakres temperatur, w jakim znajduje się warstwa cegły zwykłej.

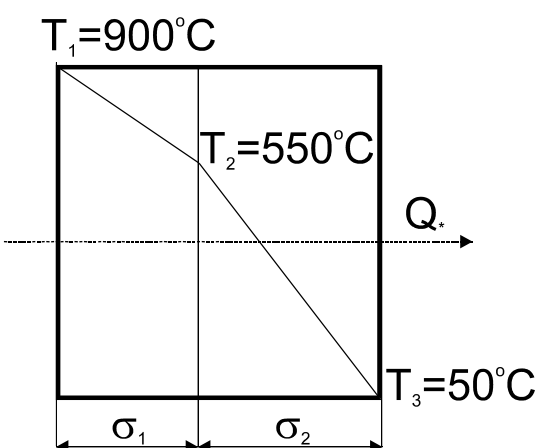
ZADANIE 5

Cegła dziurawka jest przybliżeniem kompozytu warstwowego złożonego z warstw ciała stałego i warstw porów (powietrza). Wyznaczyć współczynniki przewodzenia ciepła w kierunku równoległym prostopadłym do warstw, wiedząc, że:

$$V_{\text{c.stałego}} = 78\% \quad \lambda_{\text{c.stałego}} = 0,2 \text{ W/m}\cdot\text{deg}$$

$$V_{\text{porów}} = 22\% \quad \lambda_{\text{powietrza}} = 0,001 \text{ W/m}\cdot\text{deg}$$

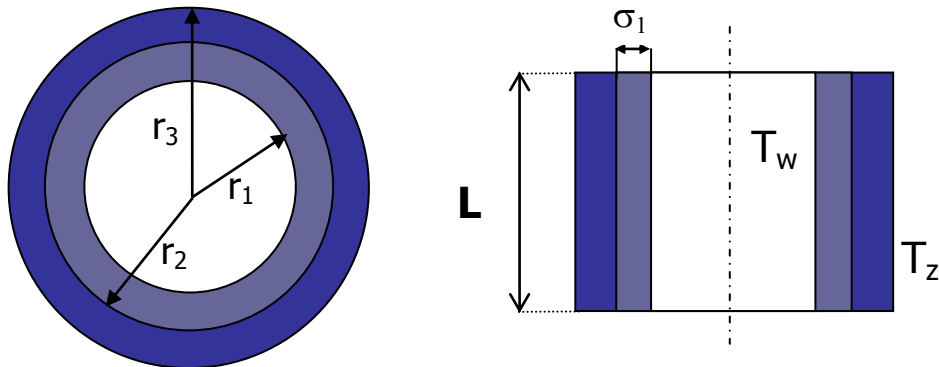
ZADANIE 6



Określić minimalną grubość ściany paleniska, jeśli wiadomo, że ściana składa się z dwóch warstw: wewnętrznej z cegły szamotowej i zewnętrznej z cegły czerwonej, straty ciepłe 1m^2 ściany wynoszą $1,2$ kW. Współczynniki przewodzenia ciepła obu materiałów są następujące: cegła szamotowa $\lambda_1=1,3$ W/m·deg, cegła czerwona $\lambda_2=0,5$ W/m·deg.

Temperaturowy przekrój przez ścianę przedstawiono na rysunku powyżej.

ZADANIE 7



Dany jest rurociąg, którego podstawowe parametry są następujące:

$$r_1 = 0,1 \text{ m} \quad r_3 = 0,5 \text{ m} \quad \sigma_1 = 0,05 \text{ m}$$

$$\lambda_1 = 3,8 \text{ [W/m}\cdot\text{deg]} \quad \lambda_2 = 0,05 \text{ [W/m}\cdot\text{deg]}$$

$$L = 2 \text{ m}$$

Temperatura wewnętrznej ścianki wynosi 500°C , zaś zewnętrznej 50°C . Wyznaczyć natężenie przepływu ciepła na drodze przewodzenia przez ściankę tego rurociągu.

ZADANIE 8

Stalowy rurociąg o średnicach $d_w/d_z = 100/110\text{mm}$ i współczynnika przewodzenia ciepła $\lambda_1 = 40 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ pokryto dwoma warstwami izolacji o grubości $\sigma_2 = \sigma_3 = 30\text{mm}$. Temperatura wewnętrznej powierzchni rurociągu $T_1 = 623 \text{ K}$ i zewnętrznej powierzchni izolacji $T_4 = 323 \text{ K}$. Określić natężenie przepływu ciepła Q^* , oraz temperaturę T_3 na styku izolacji, jeżeli warstwy przylegają do siebie. Ile będzie wynosić natężenie przepływu ciepła Q^* oraz temperatura T_3 , jeżeli warstwy izolacji zostaną zamienione w kolejności. Współczynniki przewodzenia ciepła izolacji wynoszą $\lambda_2 = 0,046 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $\lambda_3 = 0,11 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

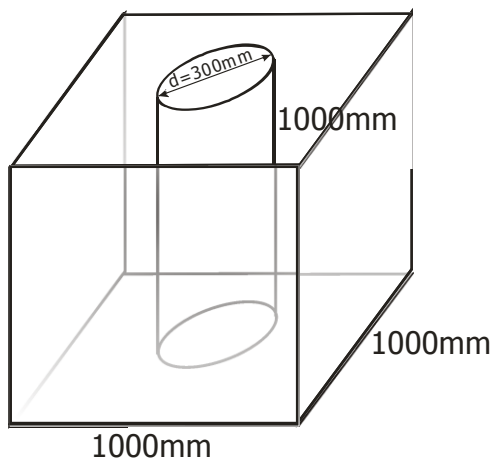
ZADANIE 9

Rura stalowa o średnicy $102/112 \text{ mm}$ jest zaizolowana warstwą waty azbestowej o grubości $\sigma = 70\text{mm}$. Różnica temperatur pomiędzy powierzchnią wewnętrzną a zewnętrzną wynosi 200°C . Obliczyć natężenie przepływu ciepła, jeżeli długość rury wynosi 15m . Współczynniki przewodzenia ciepła wynoszą: $50 \text{ W/m}\cdot\text{deg}$ dla stali, zaś dla waty azbestowej $\lambda = 0,05 \text{ W/m}\cdot\text{deg}$.

ZADANIE 10

Ściana igloo zbudowana jest z desek o grubości $\sigma_1 = 0,02$ m, warstwy ziemi $\sigma_2 = 0,15$ m i warstwy śniegu. Współczynniki przewodzenia ciepła wynoszą odpowiednio: $\lambda_1 = 0,2$ W/(m·deg), $\lambda_2 = 0,5$ W/(m·deg), $\lambda_3 = 0,4$ W/(m·deg). Obliczyć gęstość strumienia ciepłego, dopuszczalną grubość σ_3 warstwy śniegu, jeżeli temperatura powierzchni desek wewnątrz igloo wynosi $T_1 = 10^\circ\text{C}$, temperatura wewnętrznej powierzchni śniegu jest równa temperaturze topnienia lodu a temperatura zewnętrznej powierzchni śniegu wynosi $T_4 = -40^\circ\text{C}$. Wyznaczyć również temperaturę na połączeniu warstwy desek i ziemi oraz opór termiczny poszczególnych warstw w ścianie.

ZADANIE 11



W kanale ceglany o przekroju 1000×1000 mm znajduje się rurociąg stalowy o średnicy zewnętrznej 300 mm. Temperatura zewnętrznej powierzchni rurociągu wynosi 227°C , a temperatura wewnętrznej powierzchni ścianek kanału 30°C . Obliczyć straty ciepłe wskutek promieniowania 1 metra bieżącego rurociągu ($L=1$ m). Stopień czarności wynosi dla stali $\varepsilon_1 = 0,80$; dla cegły $\varepsilon_2 = 0,93$.

ZADANIE 12

W dużej hali fabrycznej znajduje się rurociąg stalowy o średnicy zewnętrznej 120 mm i długości 20 m. Temperatura zewnętrznej powierzchni rurociągu wynosi 300°C , zaś temperatura ścian hali jest równa 17°C . Obliczyć straty ciepłe rurociągu na drodze promieniowania, jeżeli stopień czarności stali $\varepsilon_1 = 0,80$.

ZADANIE 13

Dwie jednakowej wielkości płyty stalowe o wymiarach 2×2 m są umieszczone równolegle, blisko siebie tak, iż wpływ promieniowania na boki można pominąć. Pierwsza z nich ma temperaturę 500°C a druga 80°C . Obliczyć natężenie przepływu ciepła na drodze promieniowania między płytami. Podać temperaturę ekranu stalowego wstawionego między płyty o identycznych wymiarach. Stopień czarności stali $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,82$. O ile % pierwotnej wartości zmniejszy się natężenie przepływu po wstawieniu ekranu.

ZADANIE 14

Ściana pieca ma wysokość 3m. Temperatura ściany wynosi 80°C , natomiast temperatura otoczenia 40°C . Obliczyć straty ciepła i porównać na sposób konwekcji i promieniowania. Parametry powietrza dla temperatury 60°C : $Pr=0,722$; $\eta=20\cdot 10^{-6}\text{ Pa}\cdot\text{s}$; $\rho=1,0\text{ kg/m}^3$; $\lambda=0,028\text{ W/m}\cdot\text{K}$. Ponadto wiadomo, że stopień czarności ściany (emisyjność) wynosi 0,8 zaś czynnik kształtu $f=1$.

ZADANIE 15

Grzałka szamotowa o średnicy 30mm jest umieszczona wewnątrz stalowej rury o średnicy 350mm. Obliczyć ilość ciepła wymienianego między grzałką i rurą przez promieniowanie jeżeli temperatura wewnętrznej powierzchni rury wynosi 80°C a temperatura grzałki wynosi 320°C .

Dane do zadania:

stopnie czarności: szamot $\varepsilon=0,6$; stal $\varepsilon=0,77$. Zakładamy długość rury i grzałki $L=1\text{m}$.

ZADANIE 16

Przeanalizować zależność ciepła traconego wskutek promieniowania przez powierzchnię nieizolowanego odcinka stalowego rurociągu ($\varepsilon=0,77$) o średnicy równej 25mm i długości wynoszącej 5m do otoczenia o temperaturze 0°C , jeżeli rurociągiem przepływa para wodna o ciśnieniu $4,7\cdot 10^5\text{ Pa}$ i temperaturze 423K.

Wyznaczyć ciepło tracone dla innych temperatur otoczenia (-20 ; -10 ; 10 ; 20 ; 30 i 40°C) i porównać.