

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

AGH UNIVERSITY OF SCIENCE
AND TECHNOLOGY

AGH

Inżynieria Chemiczna

Transport masy i ciepła

dr hab. inż. Agnieszka Gubernat, prof. AGH

gubernat@agh.edu.pl

p.1.14; budynek B8



**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

**AGH UNIVERSITY OF SCIENCE
AND TECHNOLOGY**

WYMIANA CIEPŁA

PLAN WYKŁADÓW

1. Wprowadzenie, podstawowe zasady , podstawowe zasady technologii chemicznej, schemat procesowy
2. Termodynamika procesów, energia, ciepło
3. Źródła energii, spalanie i właściwości paliw, niekonwencjonalne źródła energii
4. Temperatura, zerowa i trzecia zasada termodynamiki, entropia, termodynamiczna definicja temperatury,
5. Termometria, pomiary temperatury,
6. Suszenie i suszarnie,
7. Przepływ ciepła, mechanizmy wymiany ciepła, stałe materiałowe
8. Płyny, statyka, dynamika, równanie ciągłości strugi, prawo Bernoulliego
9. Opory przepływu, filtracja, opadanie cząstek w płynach, sedymentacja,
10. Pomiary prędkości i natężenia przepływu,
11. Homogenizacja zawiesin, ocena jednorodności,
12. Segregacja hydrauliczna, odpylanie i oczyszczanie gazów.
13. Reologia, modele reologiczne, zawiesiny i pasty,
14. Rozdrabnianie ciał stałych, klasyfikacja ziarnowa, metodyka pomiaru rozkładu i wielkości ziaren,

WYMIANA (TRANSPORT) CIEPŁA



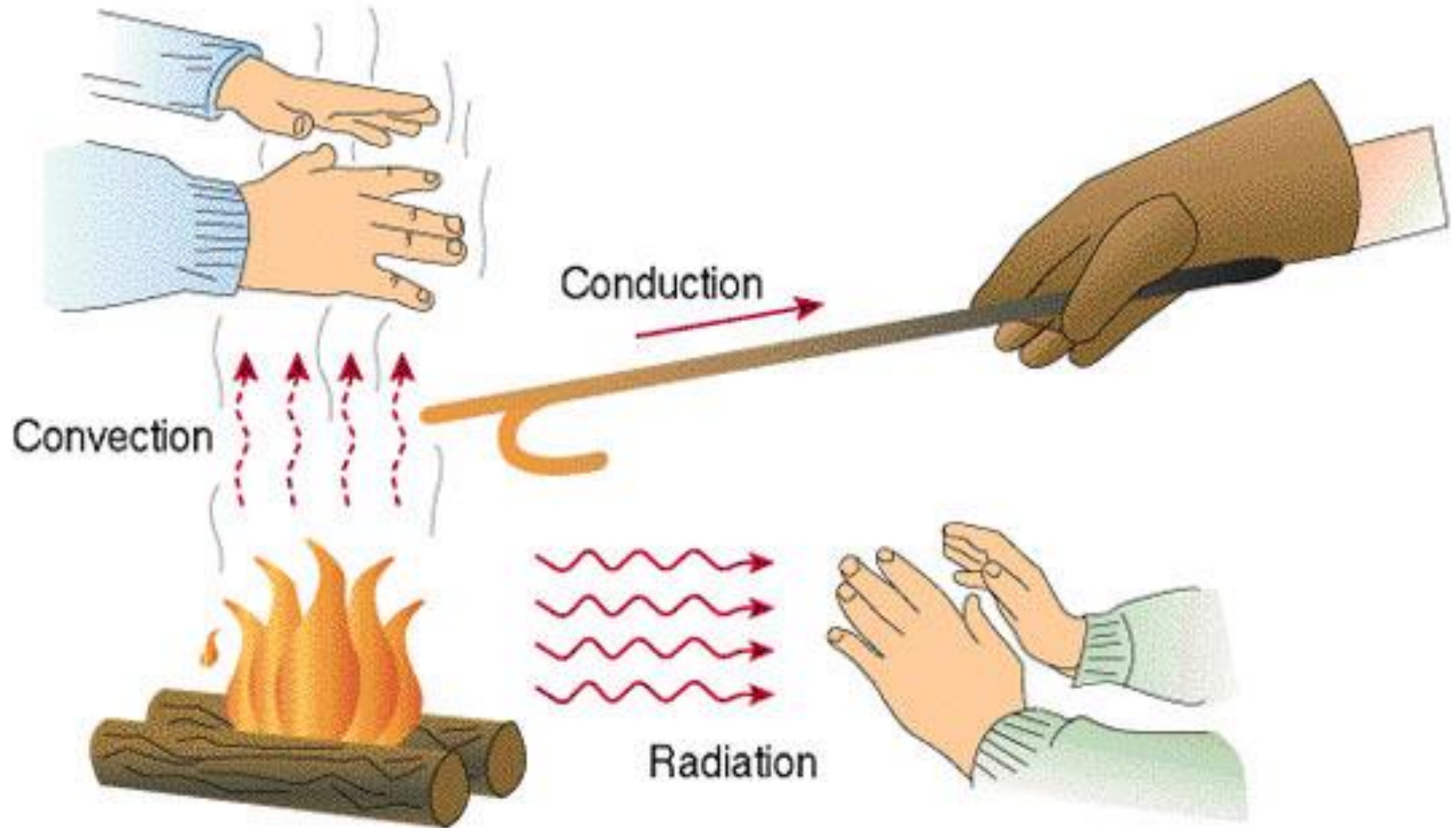
PRZEWODZENIE (KONDUKCJA) - przekazywanie energii od jednej cząstki do drugiej, za pośrednictwem ruchu drgającego tych cząstek. Proces ten trwa dopóty, dopóki temperatura ciała nie zostanie wyrównana w całej rozpatrywanej objętości. Dotyczy to bezpośredniego kontaktu ciała z ciałem, części ciała z ciałem.

PROMIENIOWANIE (RADIACJA) - 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.

KONWEKCJA (WNIKANIE, UNOSZENIE) 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 wnikanie. Mechanizm transportu ciepła łączący wymienione sposoby ruchu ciepła nazywa się **PRZENIKANIEM CIEPŁA**.

WYMIANA (TRANSPORT) CIEPŁA



PRZEWODZENIE CIEPŁA

PRZEWODZENIE (KONDUKCJA) zachodzi wówczas, gdy w ośrodku nie występują większe zmiany położenia poszczególnych cząstek, a energia przenosi się z jednej cząstki na drugą.

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.

Zgodnie z prawem FOURIERA przewodzenie ciepła istnieje gdy występuje gradient temperatury, ustaje gdy gradient zanika.

SIŁA NAPĘDOWA

Wszystkie procesy będą pod wpływem sił. Rozkład w przestrzeni dowolnego parametru generującego siły napędowe możemy przedstawić w postaci linii lub powierzchni ekwipotencjalnych.

Równanie powierzchni ekwipotencjalnych ma postać:

$$\Gamma(x, y, z) = C$$

Pomiędzy powierzchniami występują zmiany parametru Γ , generujące siły napędowe dążące do likwidacji tych różnic. Wartość zmian parametru Γ w dowolnym punkcie powierzchni w kierunku normalnej nosi nazwę gradientu pola.

$$\mathit{grad}\Gamma = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left[\frac{\Delta\Gamma}{\Delta n} \right] = \frac{\partial\Gamma}{\partial n}$$

Gradient jest wektorem można go rozłożyć w układzie kartezjańskim.

SIŁA NAPĘDOWA

$$\mathit{grad}\Gamma = \frac{\partial\Gamma}{\partial x}i + \frac{\partial\Gamma}{\partial y}j + \frac{\partial\Gamma}{\partial z}k$$

$$\frac{\partial}{\partial x}i + \frac{\partial}{\partial y}j + \frac{\partial}{\partial z}k = \nabla \text{ to } \mathit{grad}\Gamma = \Delta\Gamma$$

Siły gradientowe dążąc do wyrównania różnic parametru napotykają na opór. Strumień z jakim wyrównanie następuje jest równe iloczynowi współczynnika transportu powierzchni przekroju i siły napędowej.

Gęstość strumienia jest natomiast równa natężeniu podzielonemu przez powierzchnię przekroju.

$$I = K\Delta$$

gdzie:

K - współczynnik transportu = 1/R

R - opór

I - gęstość strumienia

Δ - siła

SIŁA NAPĘDOWA

Zatem:

$$I = \frac{\Delta}{R}$$

Równanie to przedstawia prawo Ohma.

Jest to prawo uniwersalne, które stwierdza, że natężenie dowolnego procesu biegnącego w przyrodzie jest wprost proporcjonalne do siły go wywołującej a odwrotnie proporcjonalne do oporu, na jaki natrafia przebieg tego procesu.

PRZEWODZENIE CIEPŁA

STRUMIENŃ CIEPLNY (NATĘŻENIE PRZEPLYWU CIEPŁA)

ilość ciepła jaka przepływa przez dane ciało w jednostce czasu

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} \left[\frac{J}{s} = W \right]$$

gdzie:

Q - ciepło,

t - czas,

GĘSTOŚĆ STRUMIENIA CIEPLNEGO q (OBCIĄŻENIE CIEPLNE)

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

$$q = \frac{\dot{Q}}{A} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

gdzie:

A - powierzchnia prostopadła do kierunku ruchu ciepła,

PRZEWODZENIE CIEPŁA - prawo FOURIERA

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

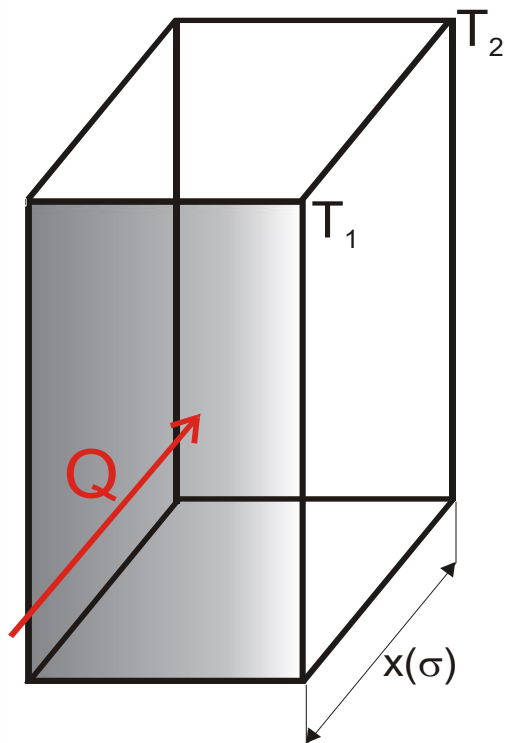
w kierunkach x , y i z $dQ = -\lambda \cdot A \cdot \text{grad}T \cdot (d\tau)$

gdzie:

T - temperatura,

λ - współczynnik przewodzenia ciepła,

τ - czas,



w jednym kierunku np. x : $dQ = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \cdot d\tau$

gdzie: x (s)-grubość warstwy,

Zakładamy $\frac{dQ}{d\tau} = \text{const}$ - ustalone przewodzenie ciepła, otrzymujemy:

wiedząc, że strumień cieplny to: $\dot{Q} = dQ/dt$

Otrzymujemy: $\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot (dT/dx)$ [W]

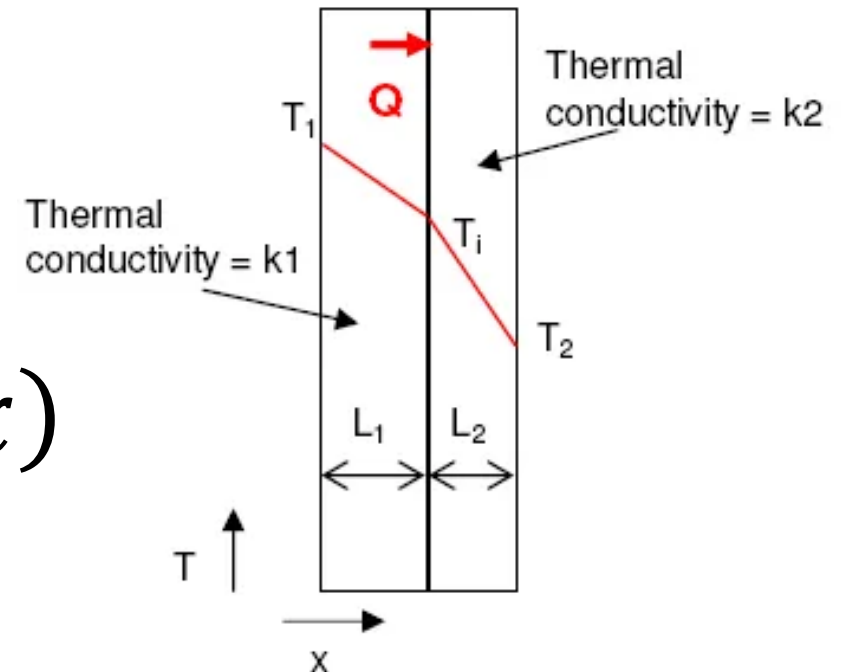
Stałość wielkości λ , A i Q określa stałą wartość gradientu temperatury w kierunku x

$$\frac{\dot{Q}}{\lambda \cdot A} = - \frac{dT}{dx}$$

Zależność liniowa:

$$\sigma = \frac{\lambda \cdot A}{\dot{Q}} \Delta T \rightarrow y = f(x)$$

www.enggcyclopedia.com



$$\frac{\dot{Q}}{\lambda \cdot A} = -\frac{dT}{dx}$$

Ósrodek płynny (trzy kierunki w przestrzeni) - równanie Kirchoffa-Furiera:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u_x \frac{\partial t}{\partial x} + u_y \frac{\partial t}{\partial y} + u_z \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\lambda}{c\rho_F} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right)$$

Dla ciała stałego:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u_x \frac{\partial t}{\partial x} + u_y \frac{\partial t}{\partial y} + u_z \frac{\partial t}{\partial z} = 0, \text{ bo } u_x = u_y = u_z = 0$$

Dla ustalonych warunków wymiany ciepła $\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0$ otrzymuje się:

$$\frac{\lambda}{c\rho_F} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = 0$$

gdzie: $\frac{\lambda}{c\rho_F} = \alpha$ to **DYFUZYJNOŚĆ CIEPLNA**

PRZEWODZENIE CIEPŁA

Przewodzenie ciepła jest **USTALONE** gdy

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

lub

strumień ciepła jest stały

lub inaczej

Jeżeli gradient temperatury jest niezależny od czasu i stały, to proces przewodzenia ciepła jest **ustalony**.

Przewodzenie ciepła jest **NIEUSTALONE** gdy

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

lub

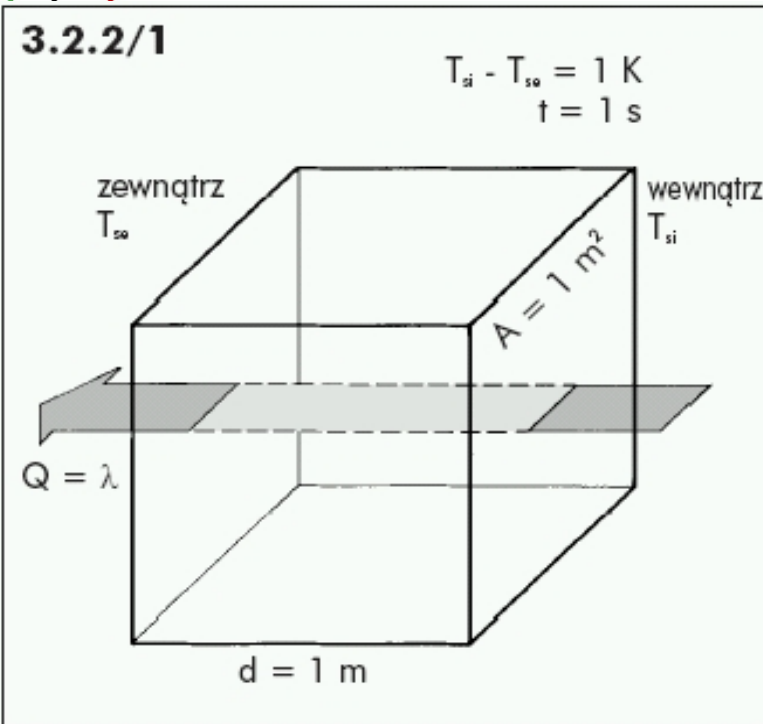
strumień ciepła nie jest stały

wiedząc, że: $\dot{Q} = q \cdot A$

Stąd, gęstość strumienia cieplnego: $q = -\lambda \frac{dT}{dx}$

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 (stopień), w ciągu 1s .

współczynnik przewodzenia ciepła (λ) - stała materiałowa, charakterystyczna dla danego materiału, określająca zdolność materiału do przewodzenia ciepła,

WSPÓŁCZYNNIK PRZEWODZENIA CIEPŁA

Wielkość współczynnika przewodzenia ciepła jest uzależniona od szeregu czynników:

- ✓ rodzaju wiązań chemicznych ciała stałego i jego struktury
- ✓ zdefektowania struktury
- ✓ mikrostruktury materiału
- ✓ temperatury

Dyfuzyjność cieplna określa przepływ ciepła w stanie nieustalonym, natomiast w stanie ustalonym funkcję tę pełni **przewodność cieplna**.

$$\frac{\lambda}{c\rho_F} = \alpha \text{ - dyfuzyjność cieplna}$$

ρ - gęstość, c - ciepło właściwe

WSPÓŁCZYNNIK PRZEWODZENIA CIEPŁA

Poprzez analogię do gazów doskonałych można zapisać:

$$\lambda = \frac{1}{3} \rho C_v u_{\text{sr}} l_{\text{sr}}$$

W przypadku ciał stałych przewodzenie odbywa się drogą wymiany ciepła pomiędzy elementami struktury, czyli atomami w węzłach sieci. Ruchy atomów są ze sobą skorelowane, drgania atomów mają charakter fal fononów $\lambda_{\text{ff}} \gg \lambda_e$.

Zatem: u_{sr} - średnia prędkość fononów w kryształach (= prędkości dźwięku),
 l_{sr} - średnia droga swobodna fononów w kryształach,

Temperatury bliskie temperaturze pokojowej i wyższe - dominują fonony o dużej długości fali (małej częstotliwości), energia takich fononów jest bardzo mała. Fonony o dużej długości fali nie ulegają rozproszeniu na defektach i w wyniku procesów „Umklapp”, a ich droga swobodna dochodzi do wymiarów kryształu.

Temperatury wysokie wzrasta udział fononów o dużej częstotliwości i małej długości fali. W przewodzeniu ciepła dużą rolę odgrywają: rozpraszanie na defektach i procesy „Umklapp”.

WSPÓŁCZYNNIK PRZEWODZENIA CIEPŁA



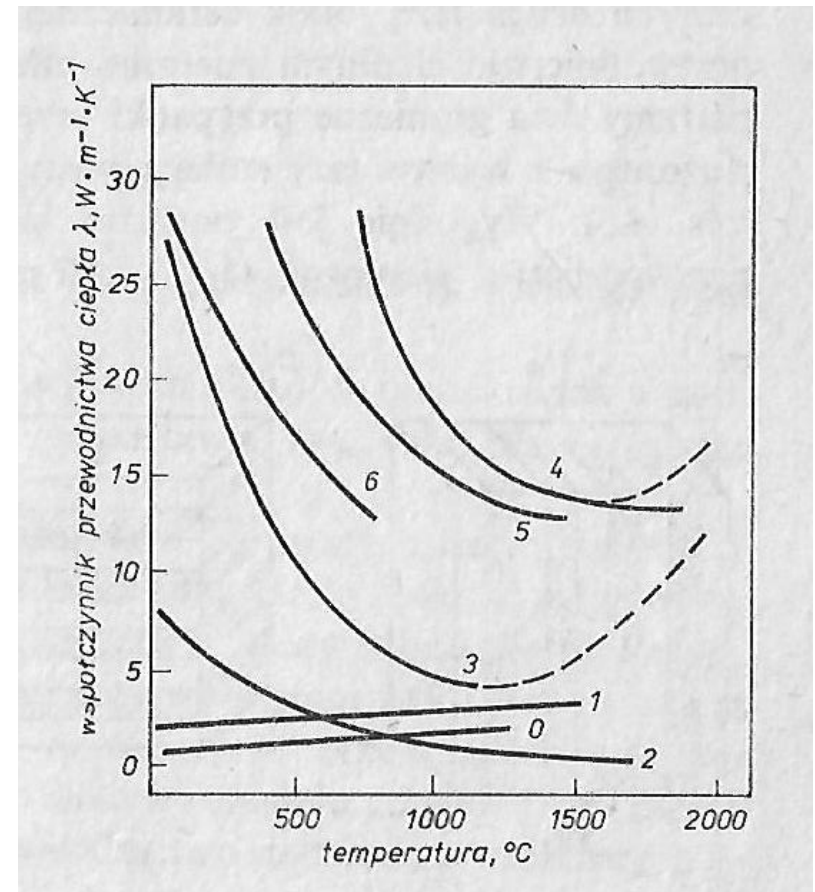
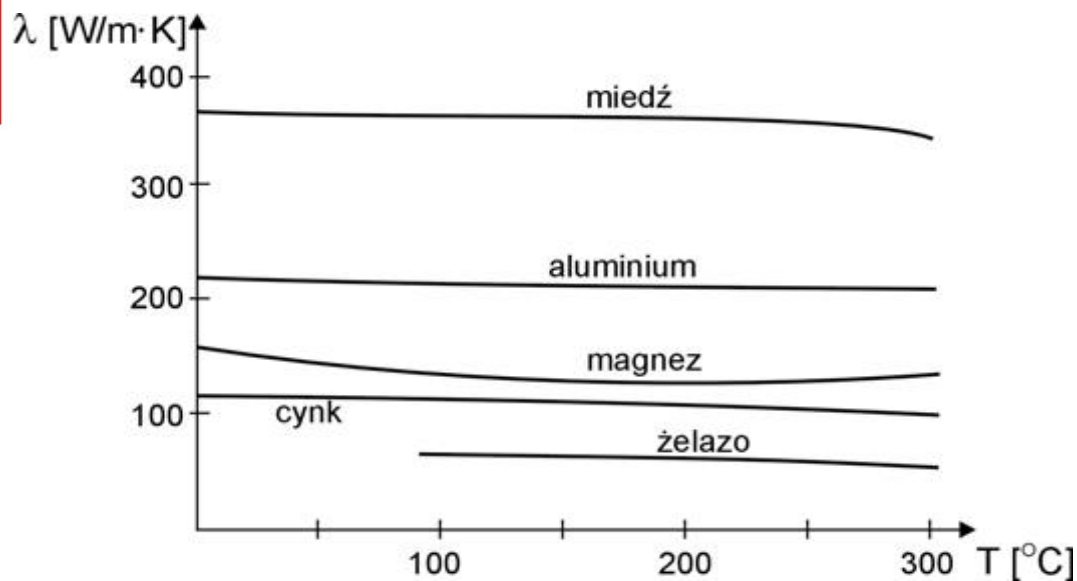
Substancje amorficzne, roztwory stałe i kryształy domieszkowe - rozpraszanie na defektach dominuje nad procesami „Umklapp”

Materiały porowate - wzrost przewodnictwa wraz ze wzrostem temperatury jest związany ze znacznym udziałem promieniowania w przenoszeniu ciepła,

W materiałach metalicznych występują quasi-swobodne elektrony i to one odpowiedzialne są za wysokie przewodnictwo cieplne. Wzrost temperatury powoduje pogorszenie przewodnictwa, pojawia się głównie rozpraszanie na defektach.

Izolatory $\lambda_{ff} \gg \lambda_e$

Metale $\lambda_e \gg \lambda_{ff}$.



WSPÓŁCZYNNIK PRZEWODZENIA CIEPŁA

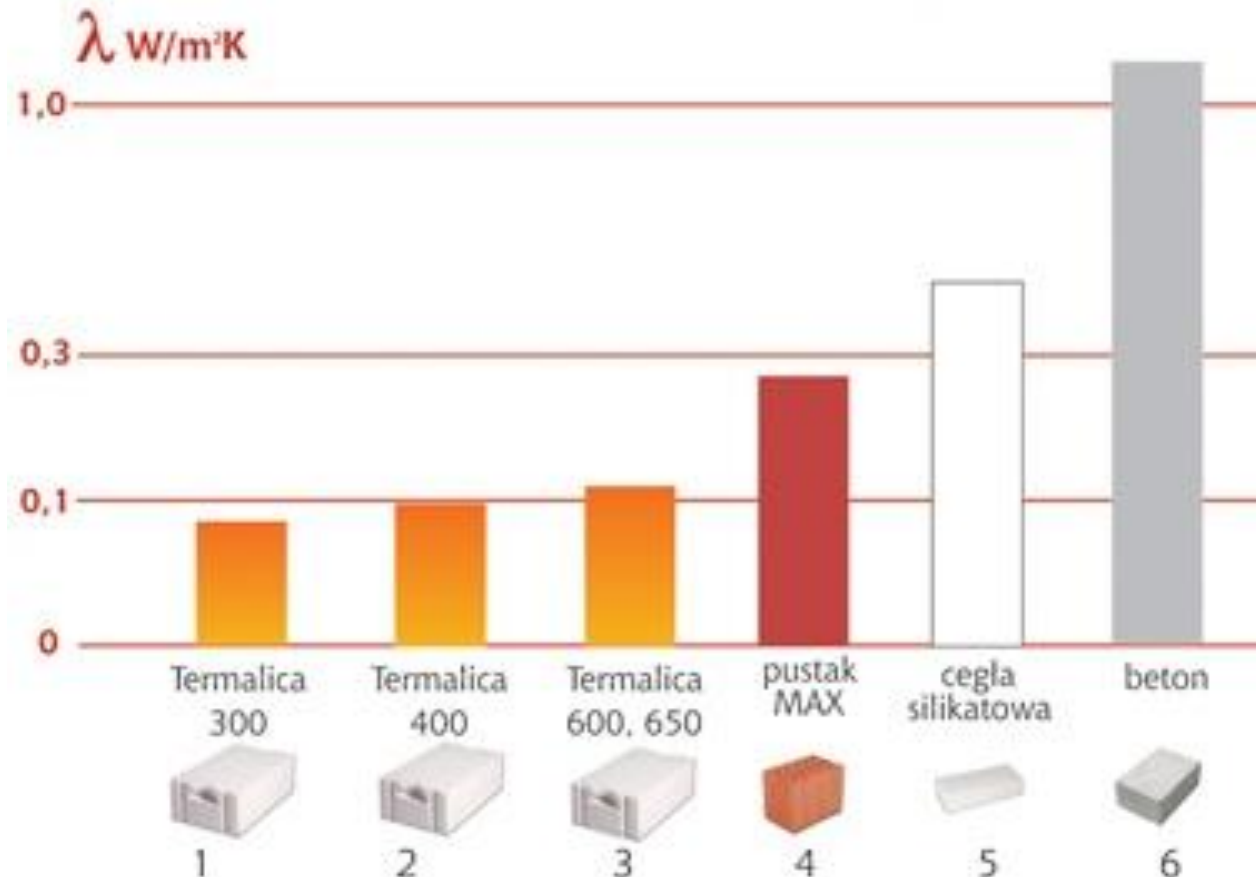
W małych porach konwekcja może być pominięta.

Wraz ze spadkiem gęstości materiału budowlanego (i tym samym wzrostem porowatości) maleje jego przewodność cieplna.

Beton komórkowy o gęstości $\rho=800 \text{ kg/m}^3$ - $\lambda= 0,3\text{W/m}\cdot\text{K}$

Beton komórkowy o gęstości $\rho=600 \text{ kg/m}^3$ - $\lambda= 0,22\text{W/m}\cdot\text{K}$

Beton komórkowy o gęstości $\rho=400 \text{ kg/m}^3$ - $\lambda= 0,15\text{W/m}\cdot\text{K}$

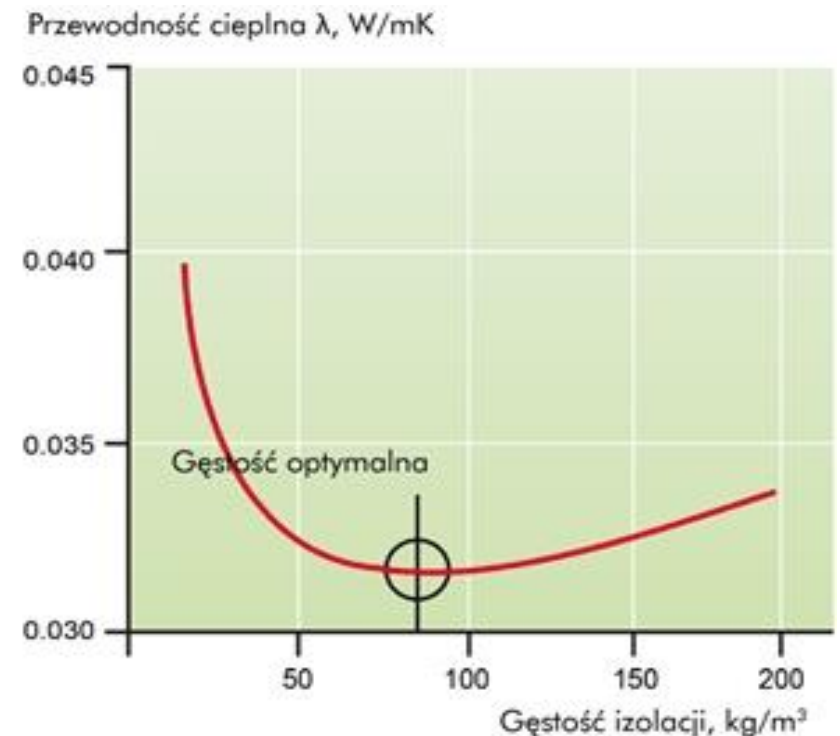
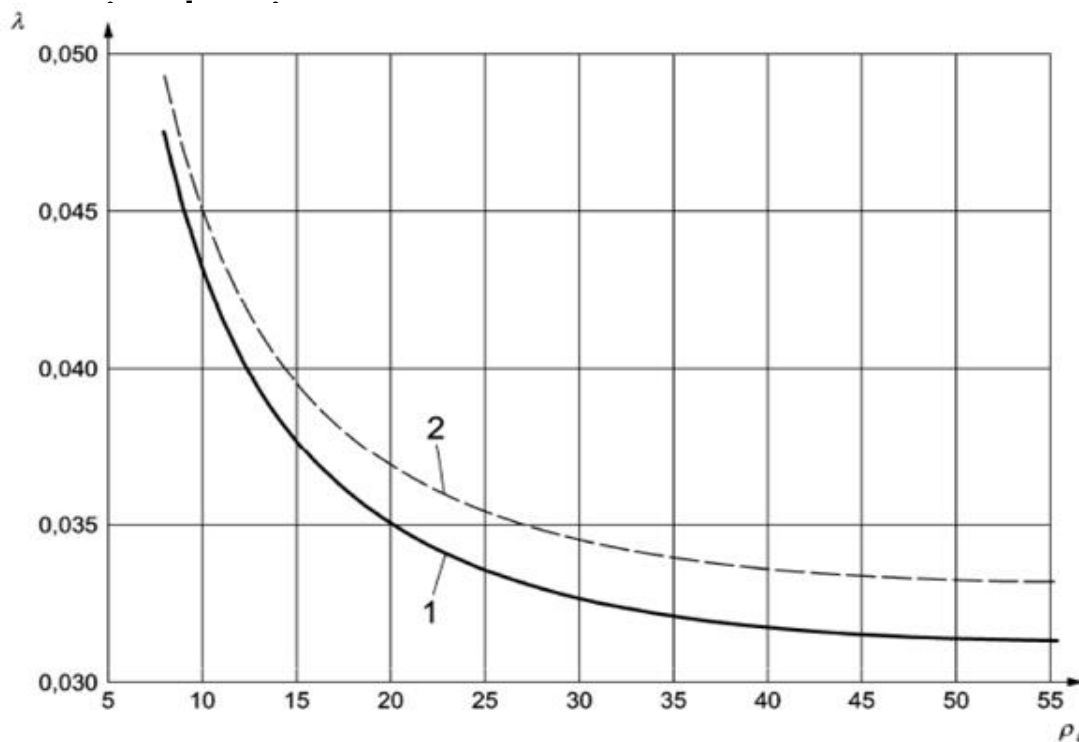


WSPÓŁCZYNNIK PRZEWODZENIA CIEPŁA



Bardzo lekkie materiały termoizolacyjne takie jak styropian i inne spienione tworzywa sztuczne nie stosują się do tej zasady. Przy małej gęstości czyli dużej porowatości, w wyższej temperaturze istotną rolę zaczyna odgrywać promieniowanie ciepłe jako zjawisko odpowiedzialne za transport ciepła w lekkim, półprzepuszczalnym optycznie materiale. Żeby je ograniczyć styropiany domieszkuje się płatkami grafitu, które pochłaniają promieniowanie podczerwone.

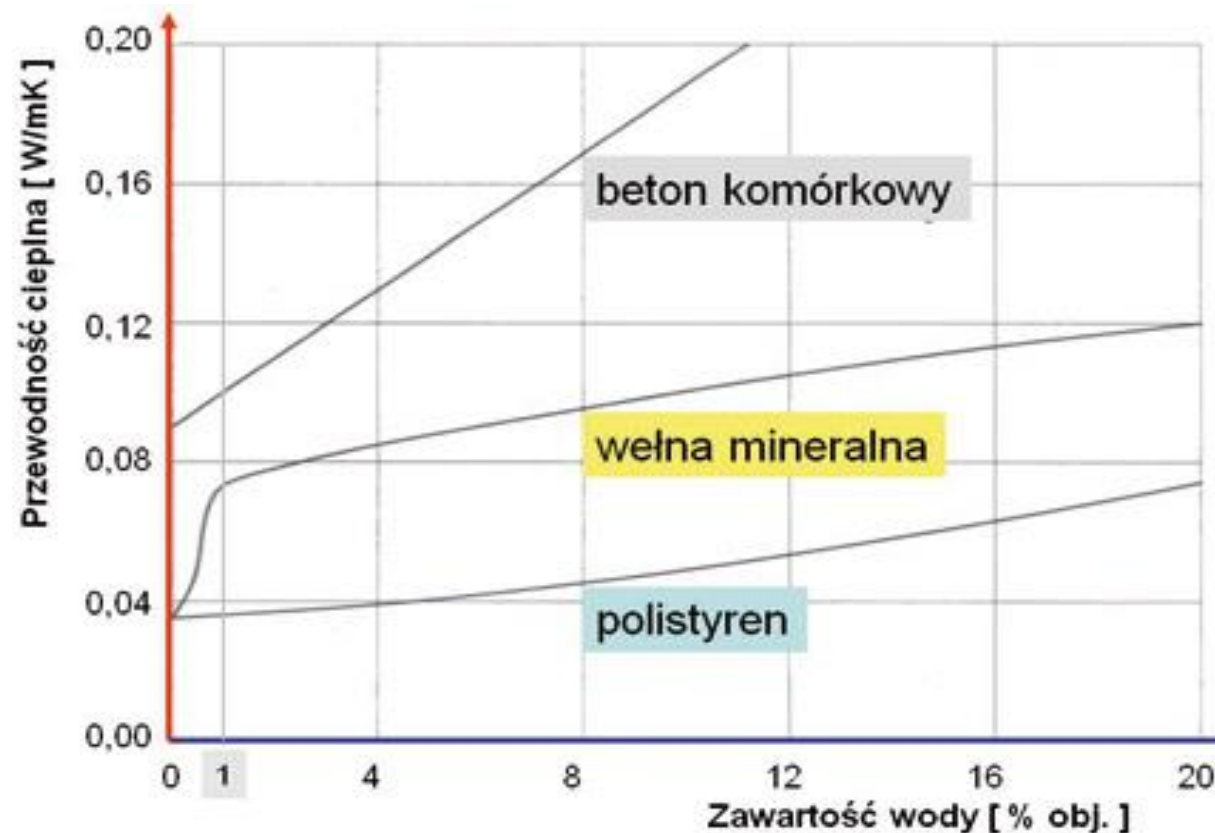
Również w przypadku dużych porów, w niższej temperaturze może dochodzić do powstania zjawiska konwekcji i wzrostu przewodnictwa.



WSPÓŁCZYNNIK PRZEWODZENIA CIEPŁA



Wilgotność ma największy wpływ na współczynnik przewodności cieplnej. Woda zappełniająca pory wilgotnych materiałów budowlanych ma współczynnik przewodzenia ciepła około dwadzieścia razy większy niż powietrze (λ wody wynosi ok. 0,56 W/m·K a powietrza 0,024 W/m·K). Z tego względu współczynnik przewodności cieplnej w znacznym stopniu zależy od wilgotności materiałów i warunków eksploatacyjnych pomieszczeń. Na przykład w przypadku suchej cegły ceramicznej $\lambda = 0,7$ W/m·K a przy wilgotności 10% osiąga wartość 1,3 W/m·K.



WSPÓŁCZYNNIK PRZEWODZENIA CIEPŁA



AGH

Przewodnictwo cieplne ciał stałych maleje ze wzrostem temperatury

Wszelkie czynniki, które ograniczają drogę swobodną nośników względnie zaburzają harmoniczną ruch drgającego powodują obniżanie przewodności cieplnej.

Zdefektowanie struktury np. odstępstwo od stechiometrii:

$$\lambda \approx 1/n$$

n - stężenie defektów

np. $\lambda(\text{UO}_2)$ ale $4\lambda(\text{UO}_{2,18})$

Mikrostruktura

Współczynnik przewodzenia materiałów porowatych

$$\lambda_s \gg \lambda_g$$

$$\lambda_m \approx \lambda_s (1 - V_p) = \lambda_s \cdot V_s$$

powyższe zależności można stosować do materiałów, w których porowatość jest mniejsza od 40%.

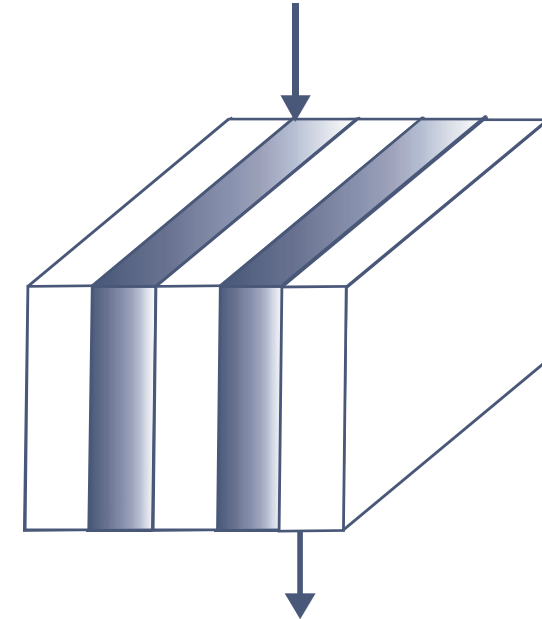
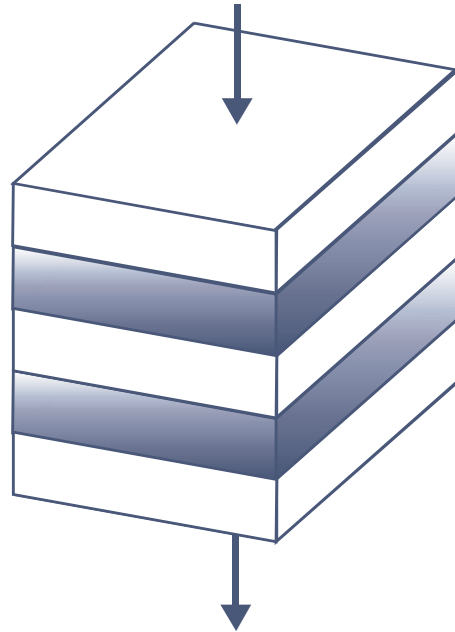
PRZEWODZENIE CIEPŁA

- materiały wielofazowe, kompozyty warstwowe



MODEL SZEREGOWY

MODEL RÓWNOLEGŁY



Przewodzenie w kierunku prostopadłym do warstw (model szeregowy):

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

gdzie: V_1, V_2 - udziały objętościowe faz składowych kompozytu,

Przewodzenie w kierunku równoległym do warstw (model równoległy):

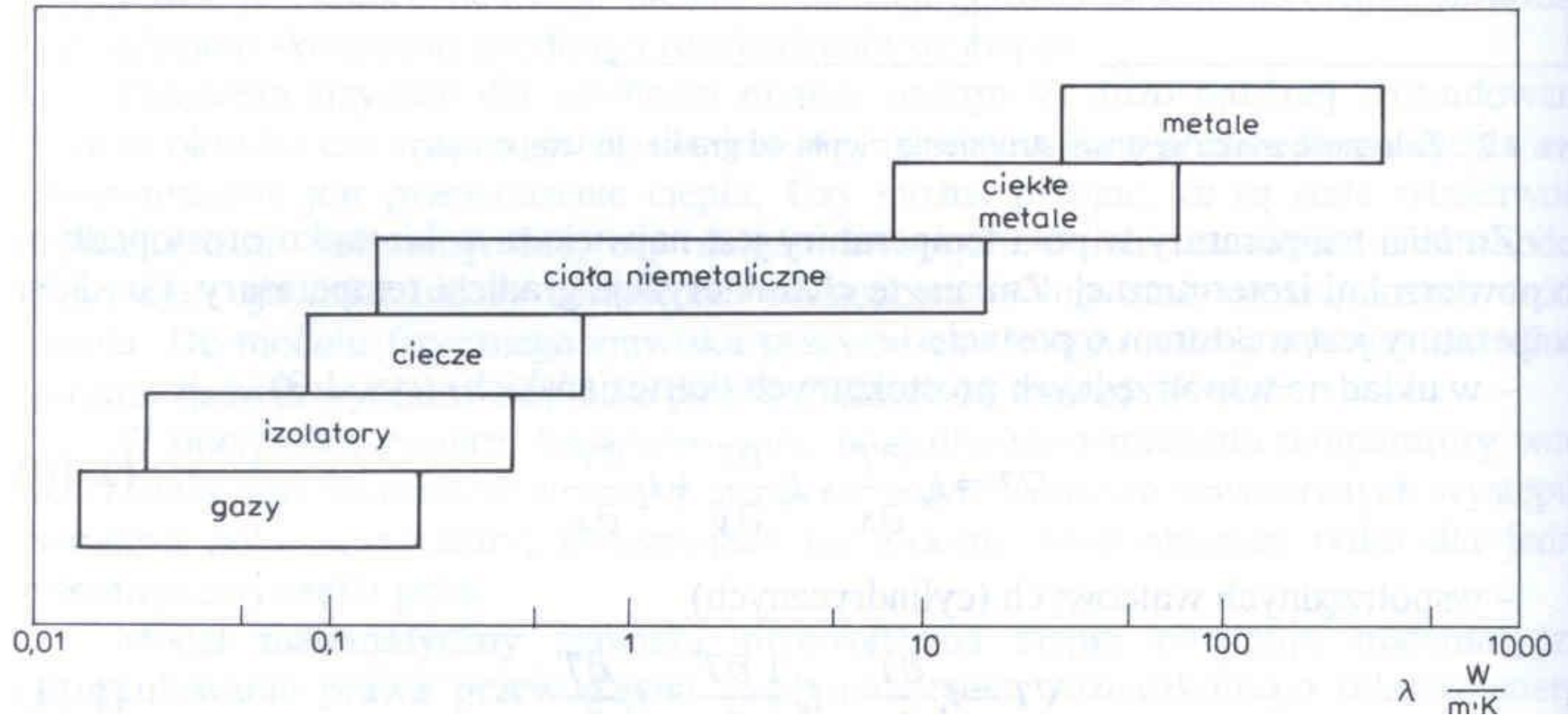
$$\lambda = \lambda_1 \cdot V_1 + \lambda_2 \cdot V_2$$

GORSZY PRZEWODNIK - IZOLATOR

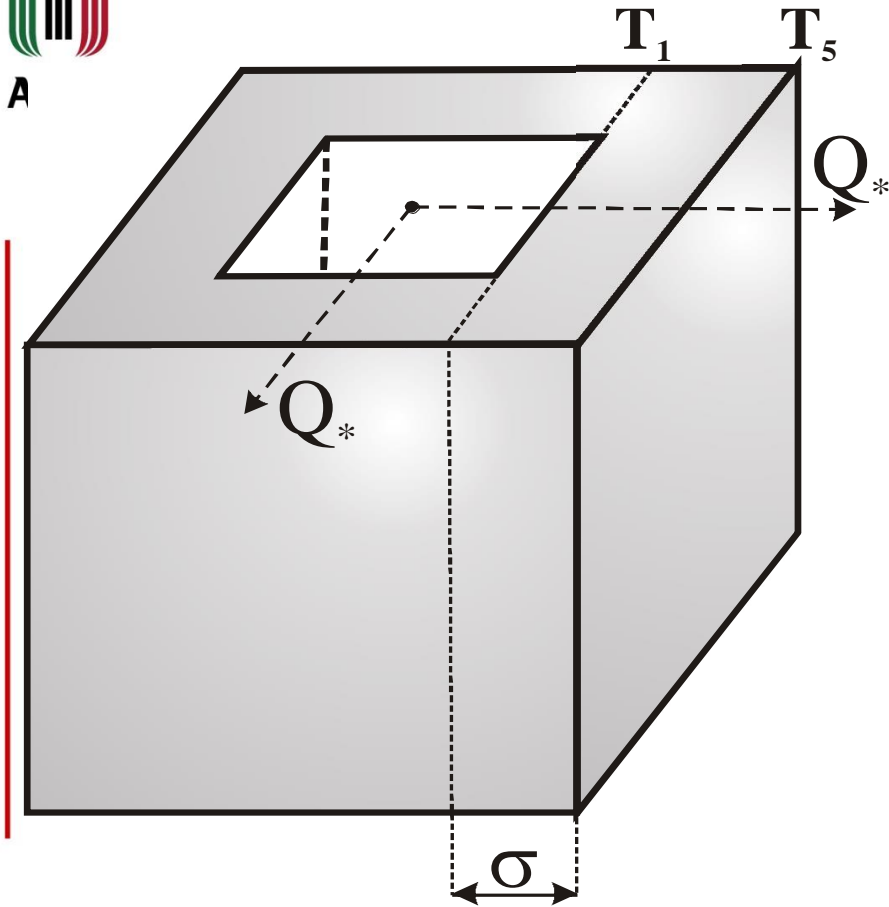
LEPSZY PRZEWODNIK

WSPÓŁCZYNNIK PRZEWODZENIA CIEPŁA

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



PRZEWODZENIE CIEPŁA - ŚCIANKA PŁASKA

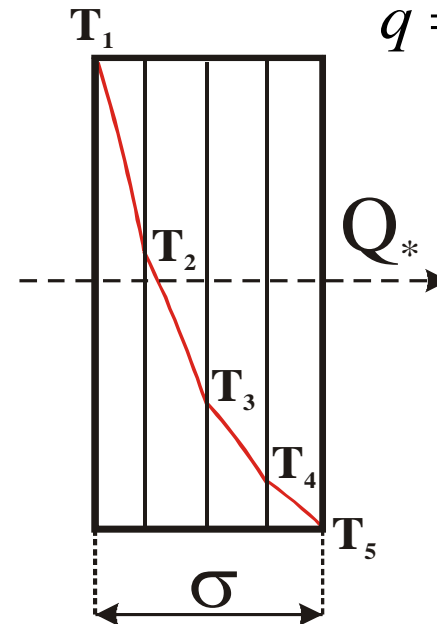


JEDNOWARSTWOWA
gęstość strumienia cieplnego

$$q = \frac{\lambda}{\sigma} \cdot (T_1 - T_2) \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$T_1 > T_2$
 σ - grubość ścianki,
strumień ciepła

$$\dot{Q} = \frac{\lambda \cdot A}{\sigma} (T_1 - T_2) \text{ [W]}$$



WIELOWARSTWOWA

$$\dot{Q} = \frac{A \cdot \Delta T}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\sigma_i}{\lambda_i}} \text{ [W]}$$

strumień ciepła

$$q = \frac{\Delta T}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\sigma_i}{\lambda_i}} \text{ [W/m}^2\text{]}$$

gęstość strumienia cieplnego

PRZEWODZENIE CIEPŁA - ŚCIANKA PŁASKA

Opór termiczny

JEDNOWARSTWOWA

$$R = \frac{\sigma}{\lambda} = \frac{\Delta T}{q} \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{deg}}{\text{W}} \right]$$

WIELOWARSTWOWA

$$R = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\sigma_i}{\lambda_i} = \frac{\Delta T}{q} \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{deg}}{\text{W}} \right]$$

Opór termiczny definiujemy jako stosunek różnicy temperatur (na powierzchni ograniczających warstwę materiału, warstwę powietrza lub przegrodę) do gęstości strumienia cieplnego q .

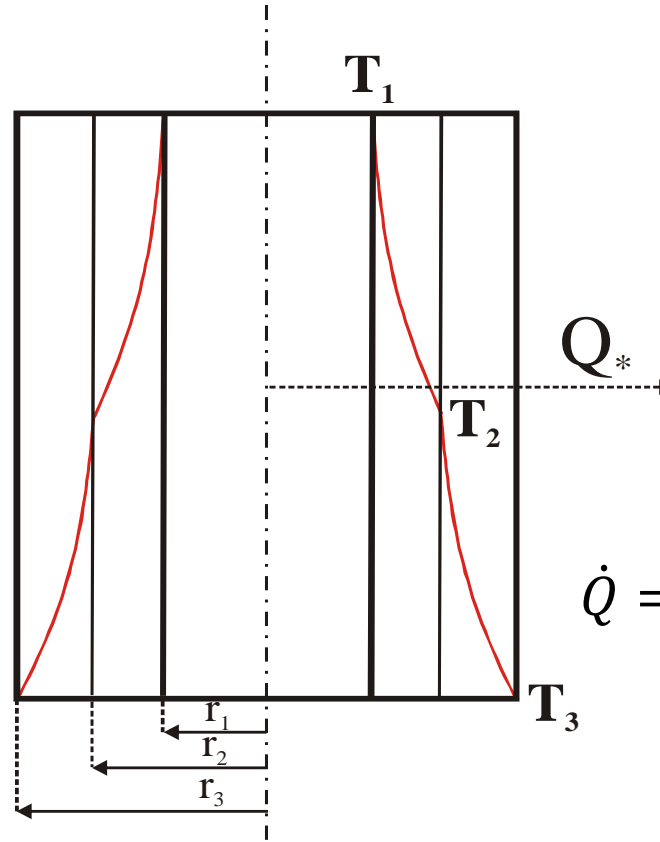
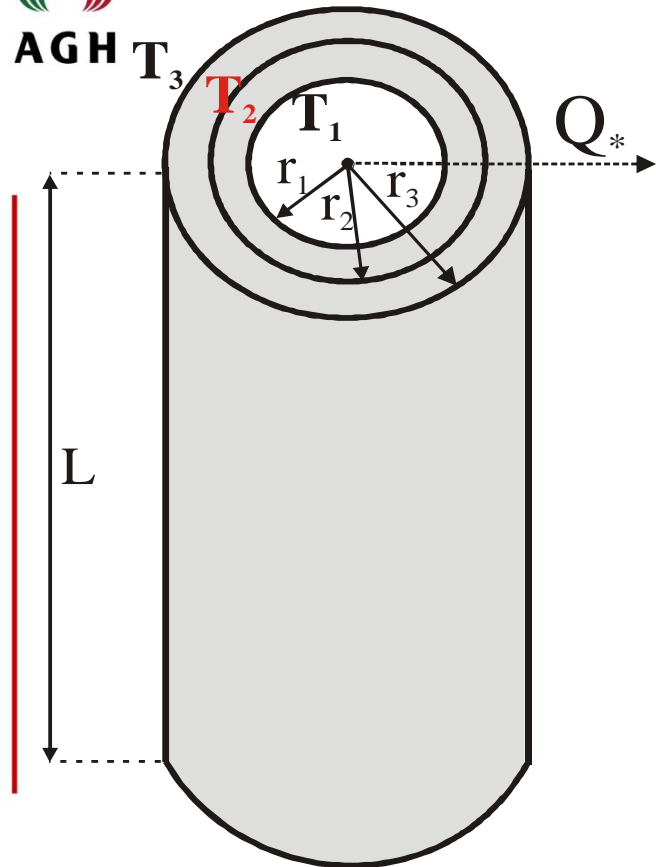
Wielkość ta określa „opór” jaki stawia dany materiał przemieszczającemu się ciepłu.

PRZEWODZENIE CIEPŁA

- ŚCIANKA CYLINDRYCZNA I KULISTA



AGH



całkowite ciepło
przewodzone
przez ściankę

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

gęstość
strumienia cieplnego

$$\dot{Q} = q \cdot A \text{ [W]} \Rightarrow q = \frac{\dot{Q}}{A} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

Ścianka kulista

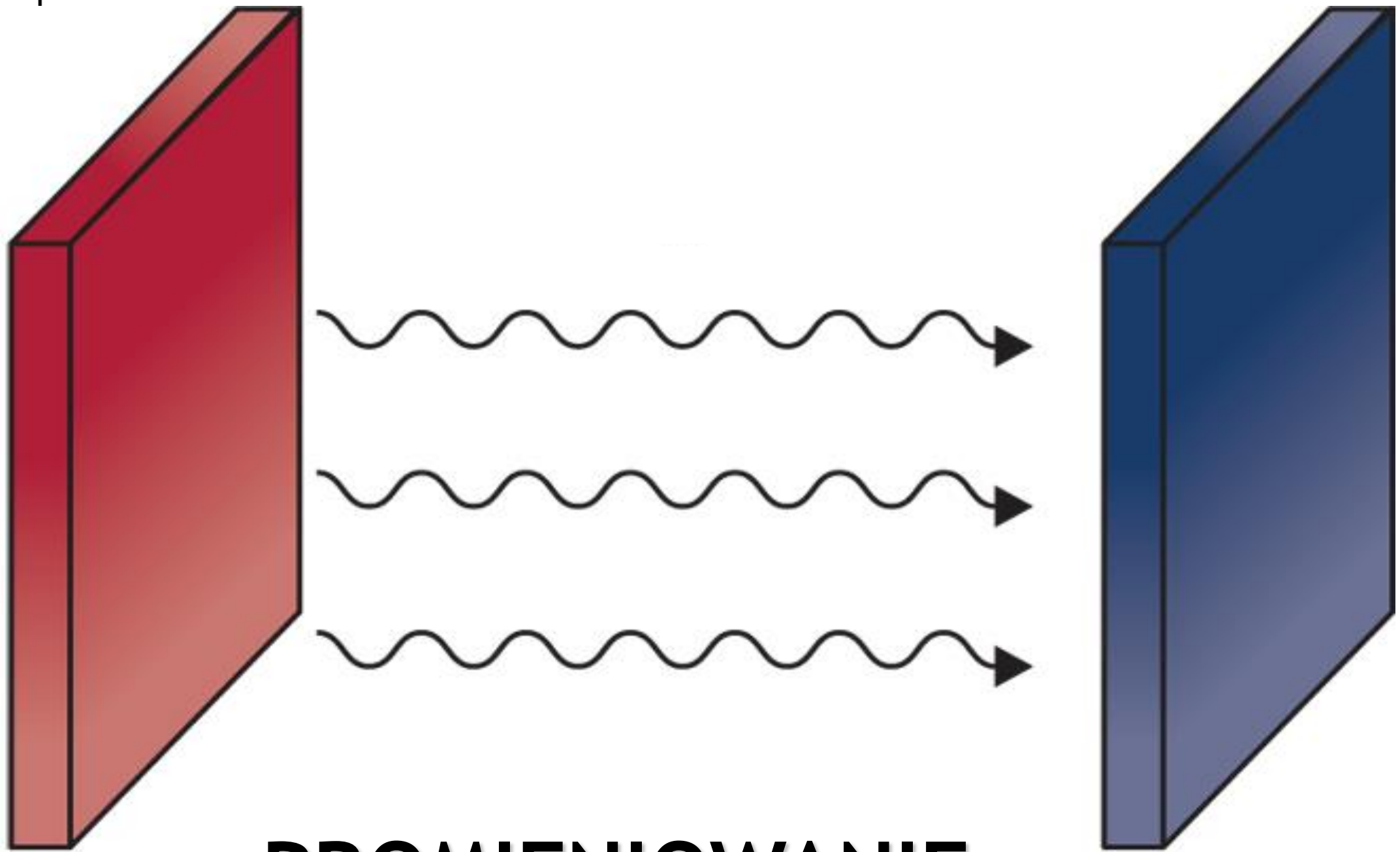
Ścianka cylindryczna

strumień ciepła

$$\dot{Q} = \frac{\pi \cdot L \cdot \Delta T}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\lambda_i} \cdot \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}} \text{ [W]}$$

$$\dot{Q} = \frac{\pi \cdot \Delta T}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{4\lambda_i} \cdot \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_z} \right)} \text{ [W]}$$

r_w - promień wewnętrzny kuli; r_z - promień zewnętrzny kuli



PROMIENIOWANIE

PROMIENIOWANIE

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

**PROMIENIE WIDZIALNE MAJĄ DŁUGOŚĆ OD 0,4 DO 0,8 μm
ZAŚ PROMIENIE PODCZERWONE OD 0,8 DO 40 μm .**

$$Q = Q_A + Q_R + Q_T \quad /:Q$$

$$1 = Q_A/Q + Q_R/Q + Q_T/Q \quad \text{czyli } 1 = a + r + t$$

a = współczynnik absorpcji (pochłaniania)

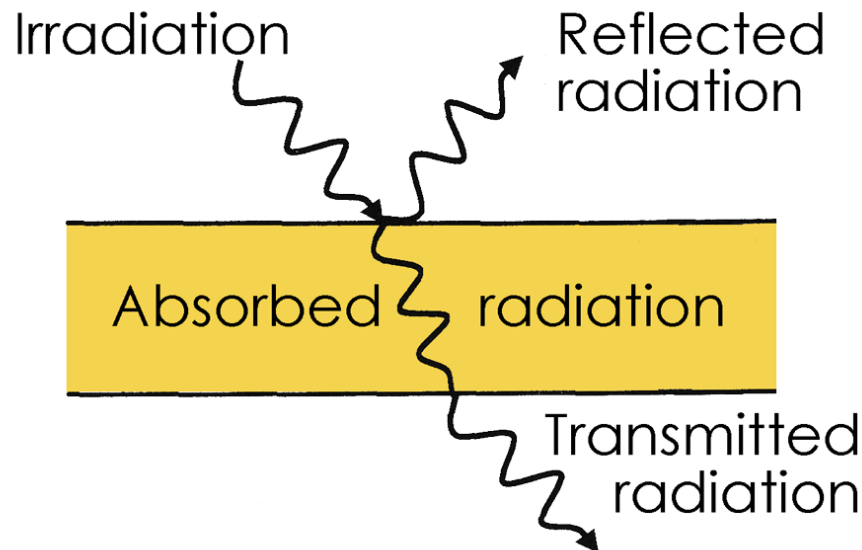
$$a = Q_A/Q$$

r = współczynnik refleksji (odbicia)

$$r = Q_R/Q$$

t = współczynnik transmisji

(przepuszczenia) $t = Q_T/Q$



CIAŁA DOSKONAŁE

$$1 = a + r + t - \text{CIAŁO SZARE}$$

najczęściej dla ciał szarych $a+r=1$

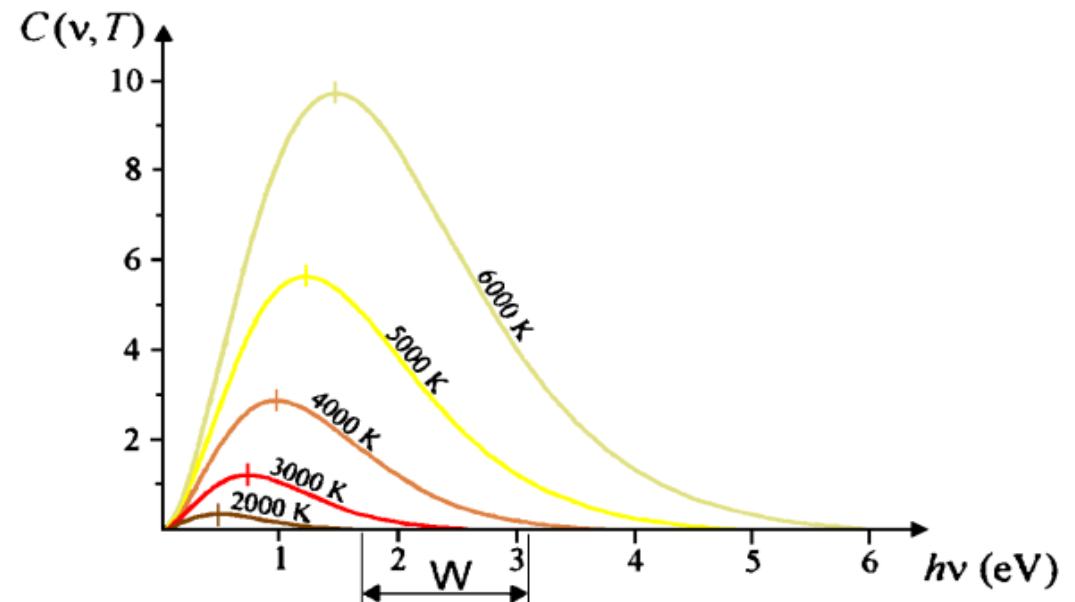
CIAŁO DOSKONAŁE CZARNE - $a=1$; $r=0$ i $t=0$

CIAŁO DOSKONAŁE PRZEŹROCZYSTE - $t=1$; $a=0$ i $r=0$

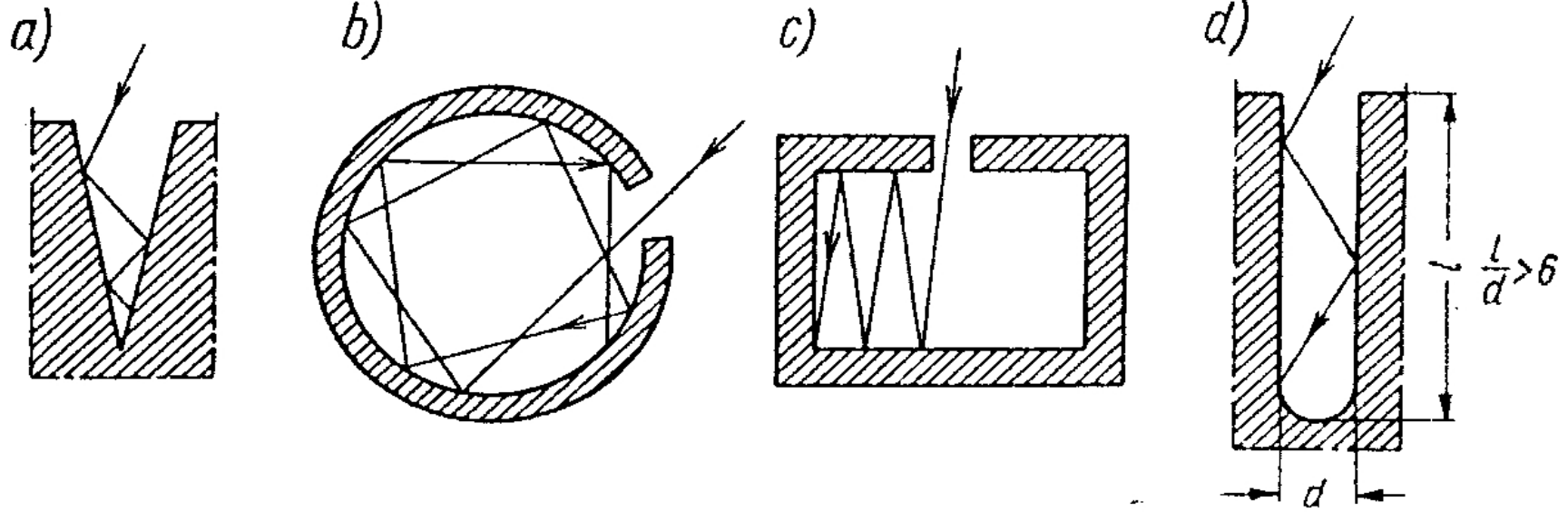
CIAŁO DOSKONAŁE BIAŁE - $r=1$; $t=0$ i $a=0$



Max Planck

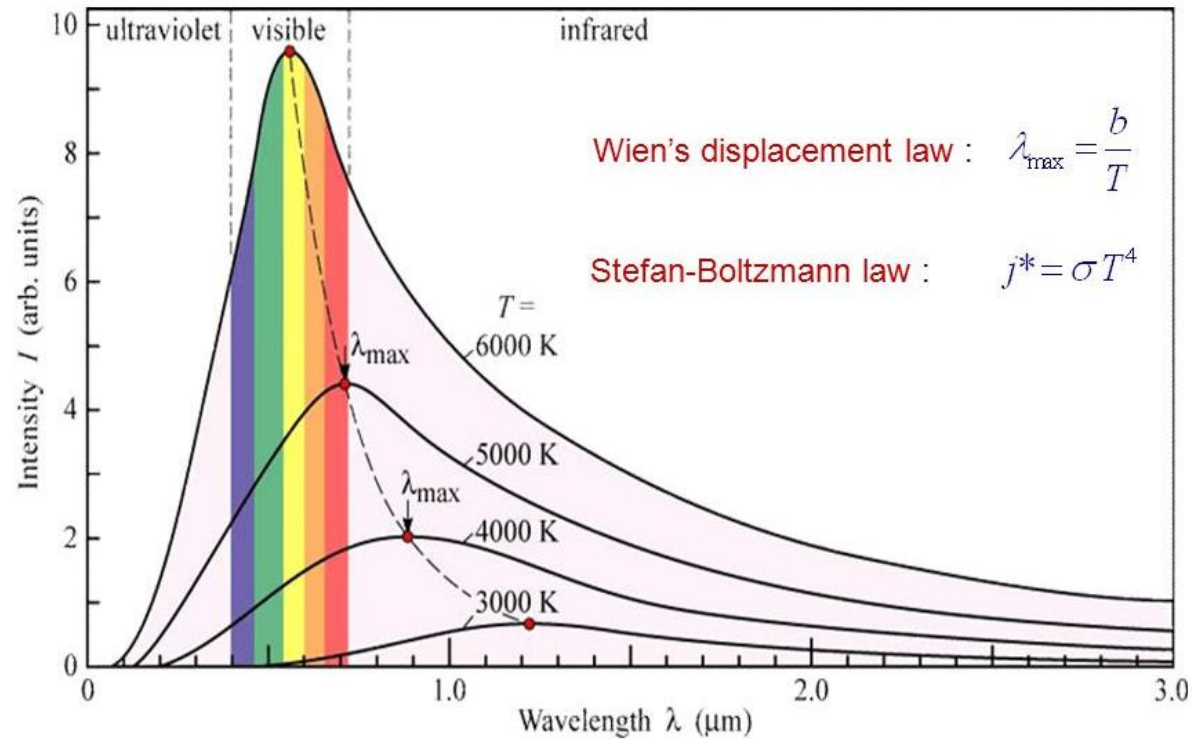


CIAŁO DOSKONALE CZARNE - $a=1$; $r=0$ i $t=0$



PRAWA PROMIENIOWANIA

Prawo Plancka



Prawo Wiena

$$\lambda_{\max} T = 0,002892 \text{ m} \cdot \text{K}$$

Iloczyn długości fali promieni o maksymalnym natężeniu i temperatury bezwzględnej, w której to promieniowanie zachodzi jest wielkością stałą.

PRAWA PROMIENIOWANIA

Prawo Kirchoffa

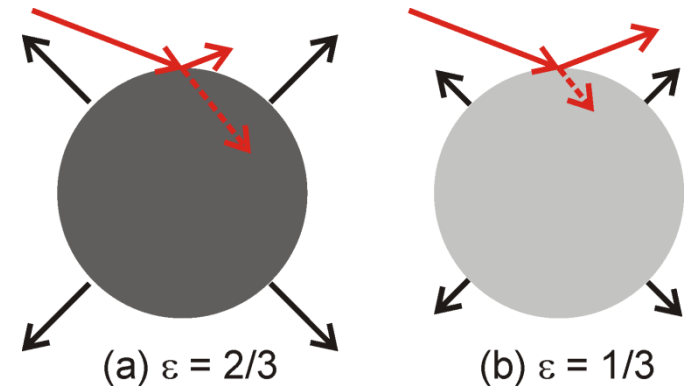
W stanie równowagi termicznej natężenie promieniowania i absorpcji energii dla danego ciała są jednakowe.

Ciało szare emituje tyle energii promienistej ile absorbowałoby ciało doskonale czarne w tej samej temperaturze:

$$E_1 = a_1 E_0$$

$$E_0 = \frac{E_1}{a_1} \quad E_0 = \frac{E_2}{a_2} \quad \dots \quad E_0 = \frac{E_n}{a_n}$$

$$\frac{E_1}{a_1} = \frac{E_2}{a_2} = \dots = \frac{E_n}{a_n} = E_0$$



Stosunek natężenia promieniowania do współczynnika absorpcji jest wielkością stałą dla wszystkich ciał i równą natężeniu promieniowania ciała doskonale czarnego w temperaturze T.

PRAWA PROMIENIOWANIA

Prawo Kirchoffa

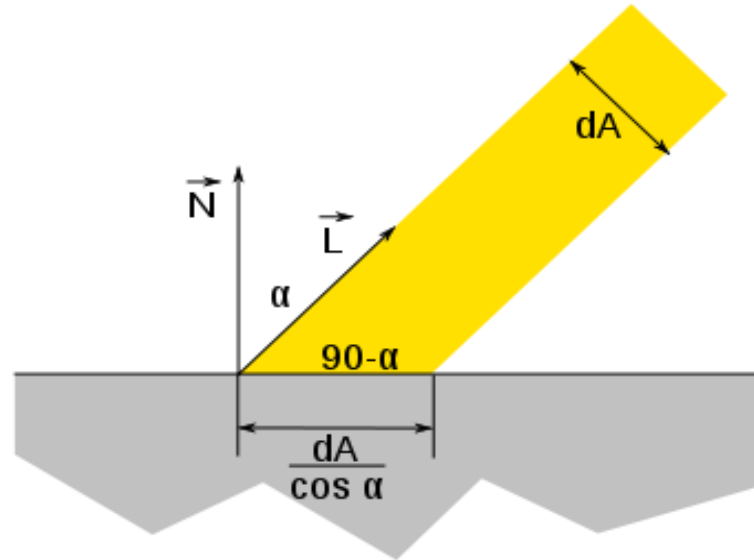
$$E_1 = C_1 \left(\frac{T}{100} \right)^4 = a_1 E_0$$

$$E_2 = C_2 \left(\frac{T}{100} \right)^4 = a_2 E_0$$

$$E_n = C_n \left(\frac{T}{100} \right)^4 = a_n E_0$$

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad \frac{C_1}{a_1} = \frac{C_2}{a_2} = \dots = \frac{C_n}{a_n} = C_0$$

Prawo Lamberta



Jeżeli źródło światła jest punktowe i promieniuje izotropowo, wówczas moc promieniowania światła przypadająca na jednostkę powierzchni (natężenie oświetlenia) maleje z odległością i zależy od kąta padania.

Jeżeli promienie dane tworzą razem kąt α wraz z normalną do powierzchni, wtedy oświetlenie jest proporcjonalne do $\cos \alpha$.

$$d^2 \Omega = \frac{\varepsilon}{\pi} C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 d\Omega dA_1 \cos \alpha \quad E_\alpha = E_n \cos \alpha$$

PROMIENIOWANIE

Światłość J_φ lub natężenie światła

Jest to strumień świetlny wysyłany w danym kierunku w jednostkę kąta bryłowego.

Luminancja L lub jaskrawość

Wyraża gęstość powierzchniową światłości w danym kierunku.

$$L = \frac{dJ}{dF \cos \varphi}$$

gdzie:

dF - elementarny element powierzchni promieniującej,

φ - kąt między normalną do powierzchni promieniującej a kierunkiem wyznaczenia luminancji - kąt widzenia,

Luminancja decyduje o nasileniu subiektywnego wrażenia jasności.

PRAWO STEFANA - BOLTZMANA

Rozwiązanie prawa Plancka daje prawo Stefana - Boltzmana (1879r.), które głosi, że natężenie promieniowania ciała doskonale czarnego jest proporcjonalne do czwartej potęgi temperatury bezwzględnej tego ciała.

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

gdzie:

σ_0 - stała promieniowania $5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ $C_0 = \sigma_0 \cdot 10^8$

dla ciał szarych

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

$$E = \varepsilon \cdot C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 = C \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

gdzie:

ε - stopień czarności ciała czyli emisyjność,

EMISYJNOŚĆ (STOPIEŃ CZARNOŚCI CIAŁA) ε

Określa zdolność materiałów do emisji i absorpcji promieniowania cieplnego, zawiera się w granicach od 0 do 1

Emisyjność (stopień czarność) przybiera wartości $0 < \varepsilon < 1$ zatem C wynosi od 0 do $5,67 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K}^4]$.

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

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

Substancja	t [°C]	ϵ
Aluminium chropowate	26	0,055
Aluminium polerowane	23	0,052
Blacha stalowa pokryta lśniącą warstwą tlenku	25	0,82
Stal świeżo przetarta papierem ściemnym	20	0,24
Blacha stalowa szara ocynkowana, utleniona	24	0,28
Miedź polerowana	20-115	0,018-0,023
Miedź walcowana	-	0,64
Żeliwo chropowate utlenione	40	0,95
Żeliwo obtoczone	22	0,44
Lakier biały	40-95	0,8-0,95
Lakier czarny błyszczący	25	0,875
Lakier czarny matowy	40-95	0,96-09,8
Dąb strugany	20	0,9
Cegła czerwona chropowata	20	0,93
Tynk chropowaty	10-88	0,91
Papa	20	0,93
Szkło gładkie	22	0,94
Woda	0-100	0,95-0,96
Lód gładki	0	0,966
Lód chropowaty	0	0,985

**Tabela. Emisyjność różnych materiałów zmierzona w temperaturze 0°C
(w temperaturze pokojowej emisyjność niewiele się zmienia) (źródło: Fluke)**

Materiał	Emisyjność
Aluminium polerowane / chropowate / silnie utlenione	0,05 / 0,07 / 0,25
Płyta / papier azbestowy	0,96 / 0,94
Mosiądz zmatowiony / polerowany	0,22 / 0,03
Cegła standardowa / ogniotrwała	0,85 / 0,94
Brąz porowaty / polerowany	0,55 / 0,1
Węgiel oczyszczony	0,8
Żeliwo surowy odlew / polerowane	0,81 / 0,21
Chrom polerowany	0,1
Glina wypalona	0,91
Cement	0,54
Miedź polerowana / utleniona	0,01 / 0,65
Taśma izolacyjna, czarne tworzywo sztuczne	0,95
Emalia (w 27°C)	0,9
Szkło	0,92
Złoto polerowane	0,02
Żelazo walcowane na gorąco / utlenione / blacha galwanizowana	0,77 / 0,74 / 0,23
Lakier czarny matowy / błyszczący	0,97 / 0,87
Farba olejowa	0,94
Porcelana	0,92
Stal galwanizowana / silnie utleniona / niepolerowana / skorodowana	0,28 / 0,88 / 0,96 / 0,69
Blacha niklowana / walcowana	0,11 / 0,56

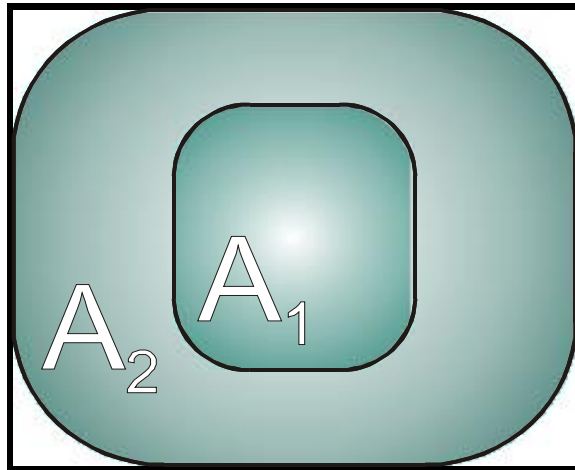
PRAWO STEFANA - BOLTZMANA



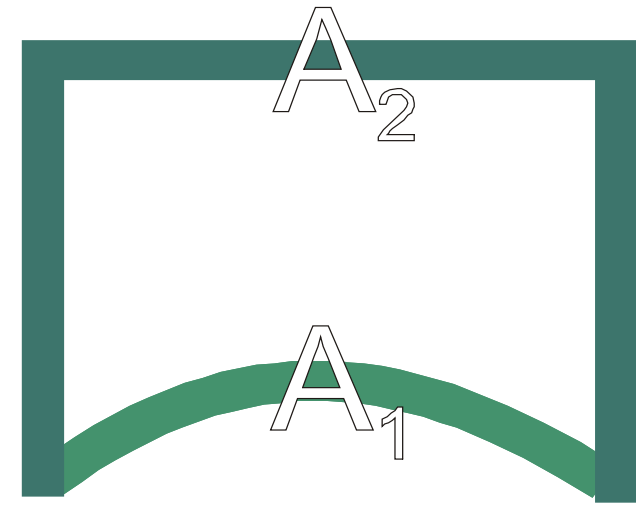
AGH

Zgodnie z prawem Stefana-Boltzmana można wyznaczać ilość wymienionego ciepła (strumień cieplny) między powierzchniami dwóch ciał zależnie od położenia tych powierzchni:

Powierzchnia A_1 jest zamknięta w powierzchni A_2



Powierzchnie A_1 i A_2 tworzą jedną powierzchnię zamkniętą



$$A_2 > A_1$$

strumień cieplny $\dot{Q}_{1-2} = \varepsilon_{1-2} \cdot A_1 \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] [W]$

gdzie: C_0 - stała promieniowania = 5,67 [W/m²·K⁴]



Gęstość strumienia
cieplnego

$$q_{1-2} = \varepsilon \cdot C_0 \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right] \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

ZASTĘPCZY STOPIEŃ CZARNOŚCI ε_{1-2}

wzór ogólny

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

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

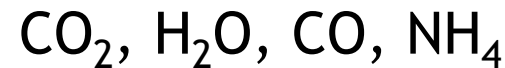
Dla równoległych dostatecznie dużych płyt położonych blisko siebie zastępczy stopień czarność oblicza się z wg poniższego wzoru, gdyż wtedy $A_1 = A_2$:

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

PROMIENIOWANIE GAZÓW

CIECZE - natężenia promieniowania jest zbliżone do ciał stałych; ze względu na małe różnice temperatur występujące pomiędzy poszczególnymi punktami w cieczy i konwekcyjny ruch ciepła udział promieniowania cieplnego w ogólnej ilości ciepła jest mały,

GAZY - w gazach występuje selektywne promieniowanie o określonych długościach fal. Promieniowanie cieplne emitują tylko te gazy, które mają moment dipolowy



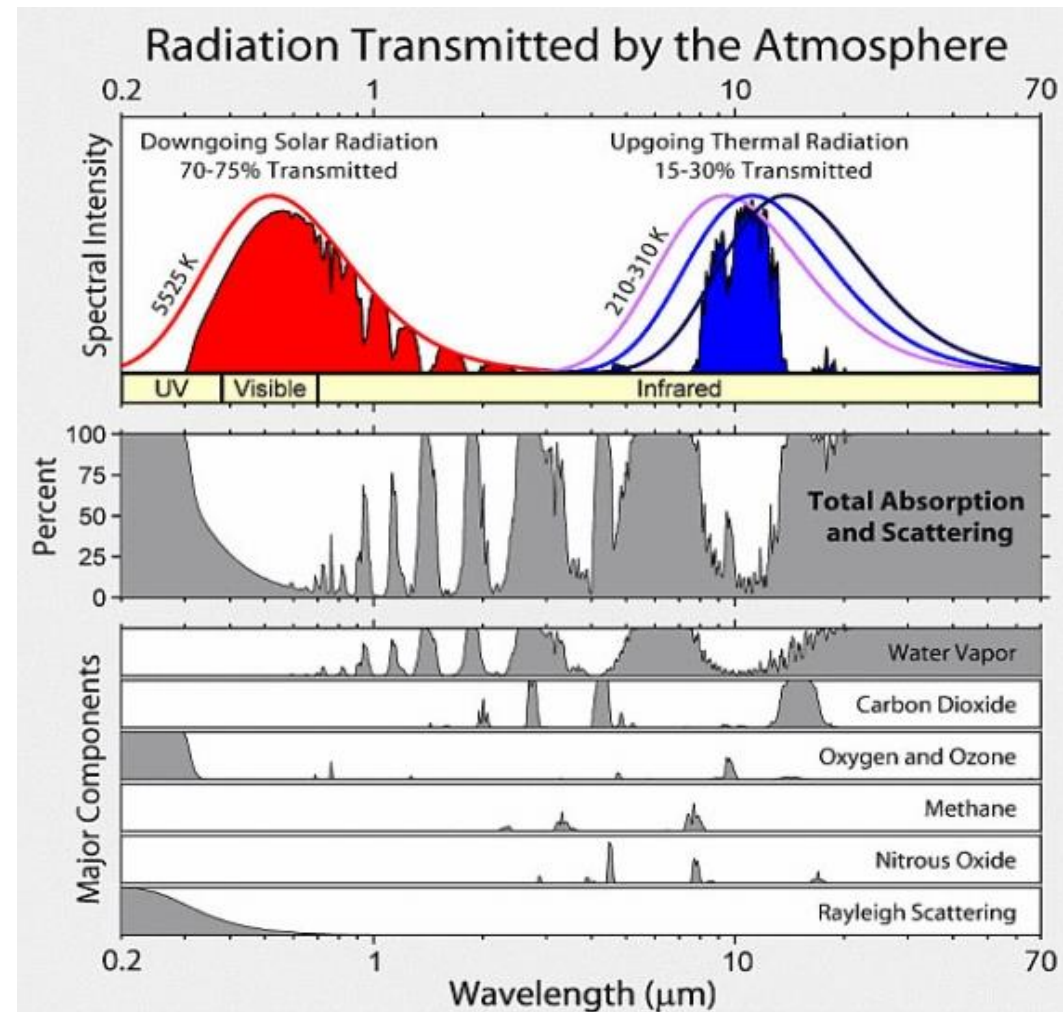
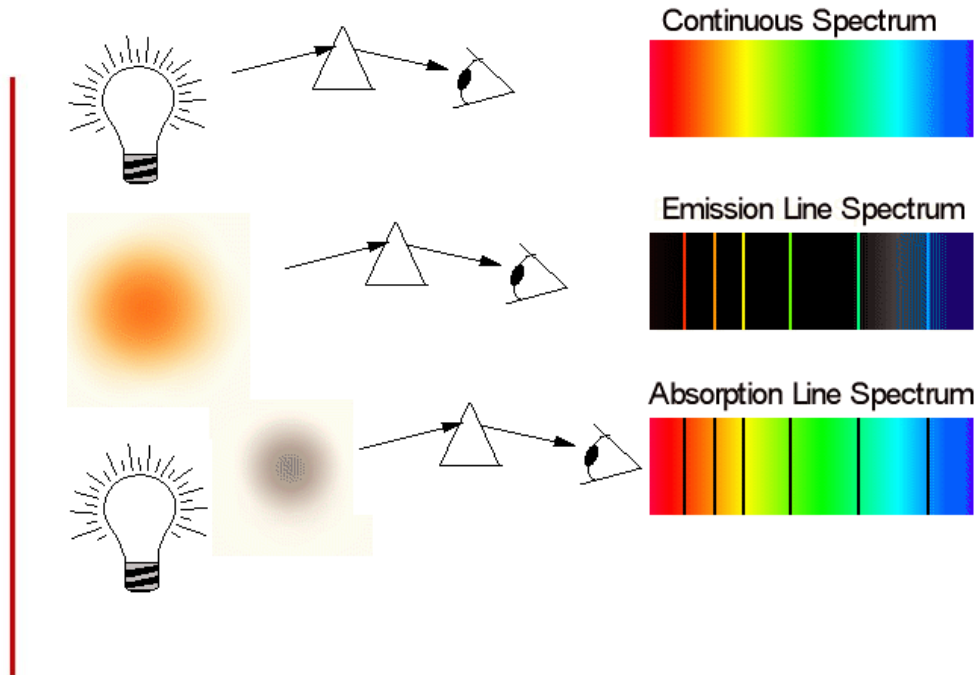
Cząsteczki gazów, które są symetryczne np. H_2 , O_2 , N_2 , są dla promieniowania cieplnego przezroczyste.

SELEKTYWNA ABSORPCJA I EMISJA

W ciałach stałych wymiana energii promieniowania odbywa się w warstwie powierzchniowej, dla gazów w całej ich objętości, zatem:

$$E_{\Delta\lambda} = f(T, L, p_c)$$

PROMIENIOWANIE GAZÓW

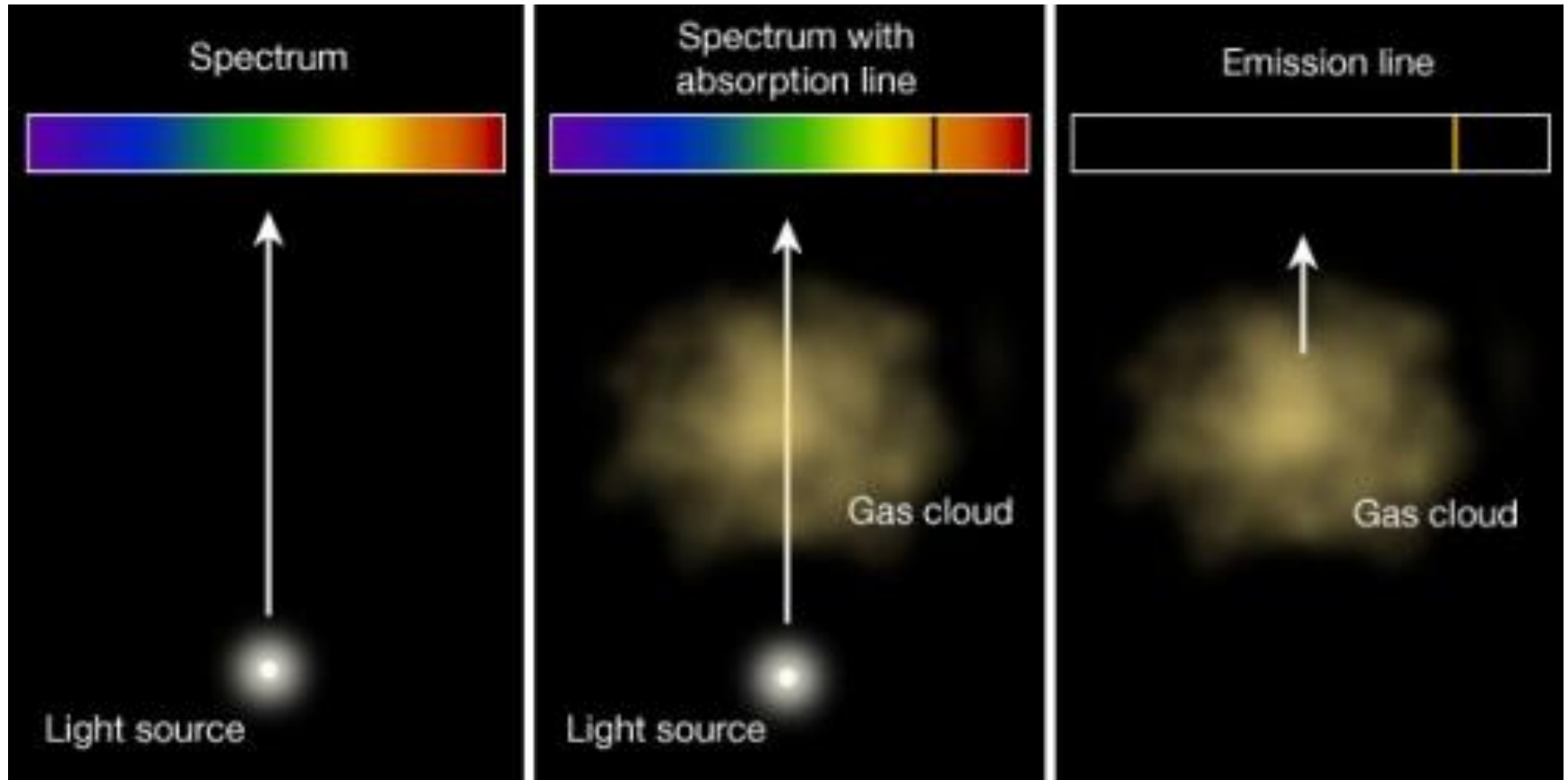


W przypadku mieszaniny gazów złożonych ze składników o budowie polarnej, sumaryczna energia promieniowania jest niższa od sumy energii wypromieniowanej przez poszczególne składniki.

$$E_G = \varepsilon_G \cdot C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

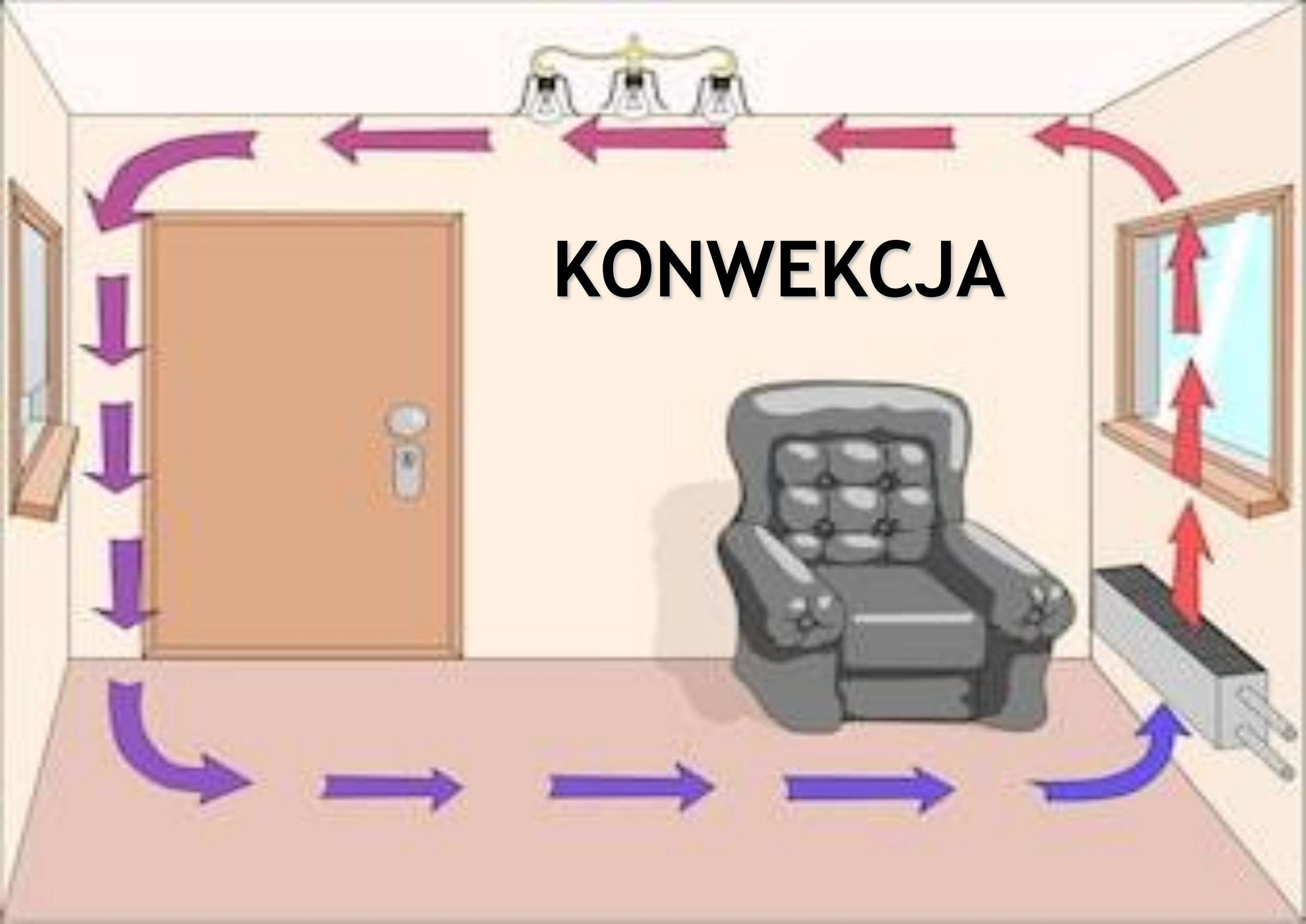
$$\varepsilon_G = f(T, L, p_c)$$

PROMIENIOWANIE GAZÓW



W przypadku mieszaniny gazów złożonych ze składników o budowie polarnej, sumaryczna energia promieniowania jest niższa od sumy energii wypromieniowanej przez poszczególne składniki.

KONWEKCJA



KONWEKCJA (WNIKANIE, UNOSZENIE)

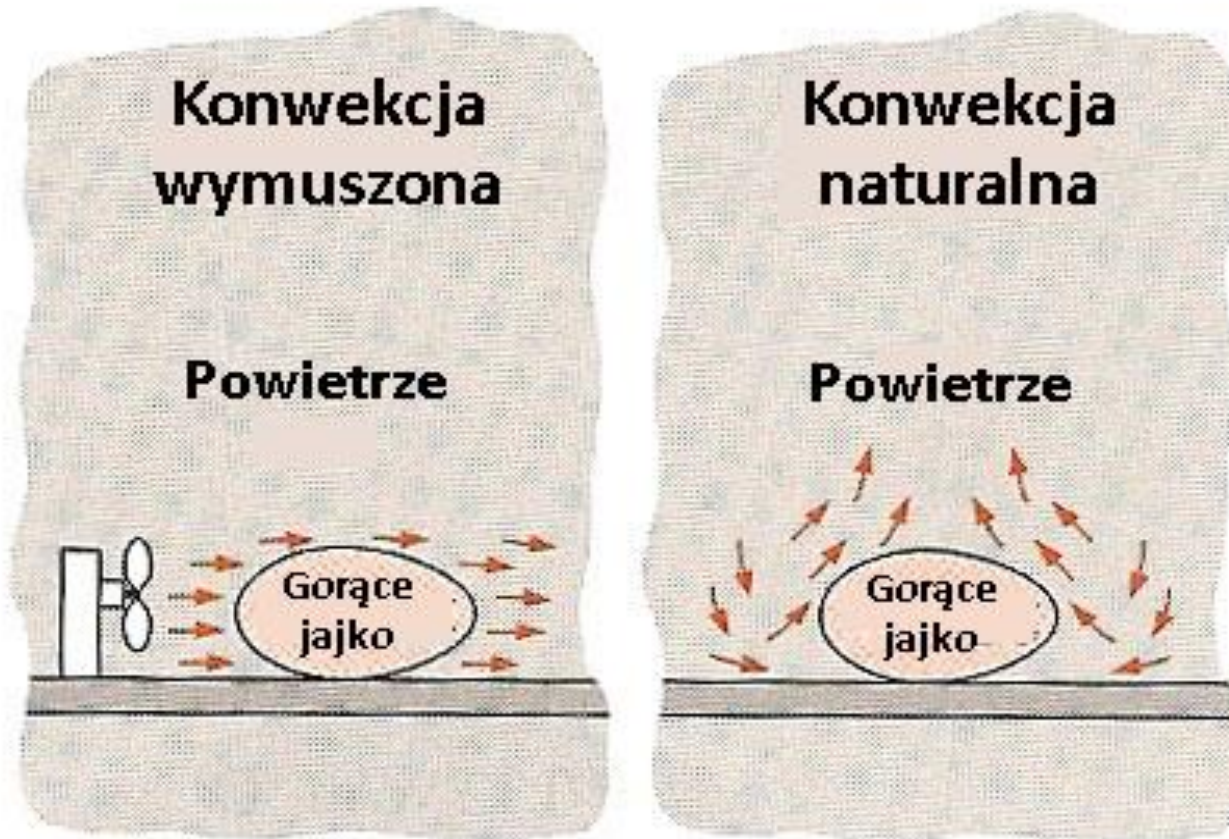
1. Związana jest z ruchem płynów.
2. Konwekcyjny ruch ciepła może się odbywać podczas uwarstwionego, burzliwego czy przejściowego przepływu płynu.
3. Występuje w przewodach transportujących płyny za pomocą wentylatora lub pompy (**konwekcja wymuszona**), w przewodach kominowych gdzie różnica temperatur w różnych punktach wywołuje zmianę gęstości płynu (zmianę ciśnień statycznych), co powoduje ruch płynów (**konwekcja naturalna**), w zbiornikach gdzie wrze ciecz lub kondensuje para (**konwekcja przy zmianie stanu skupienia**).
4. Zachodzi zarówno podczas ogrzewania jak i chłodzenia płynów.
5. Jest trudna do teoretycznego ujęcia przez związek ruchu płynu z ruchem ciepła. Różny charakter ruchu płynu, zmienna lepkość w różnych temperaturach, różny rozkład prędkości, wiry, kłębienia itp. wpływają na zjawisko konwekcji. Formułuje się tzw. równania kryterialne, wyznaczane na podstawie analizy wymiarowej.



AGH

KONWEKCJA (WNIKANIE, UNOSZENIE)

5. Z technicznego punktu widzenia najważniejszym mechanizmem jest przekazywanie ciepła od (do) ścianki do (od) płynącego zarówno ruchem laminarnym jak i burzliwym płynu (WNIKANIE),



KONWEKCJA (WNIKANIE)

Wnikanie ciepła pomiędzy powierzchnią ścianki i płynem opisuje równanie Newtona:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_w - T) [W]$$

gdzie:

Q_* - natężenie przepływu ciepła [W],

α - współczynnik wnikania
(przejmowania) ciepła [W/m²·deg],

A - powierzchnia ścianki [m²].

T_w - temperatura powierzchni
ścianki [K, °C],

T - temperatura płynu [K, °C],

$$\alpha = \frac{\dot{Q}}{A \cdot (T_w - T)} \left[\frac{W}{m^2 \cdot deg} \right]$$



WSPÓŁCZYNNIK WNIKANIA CIEPŁA



α - współczynnik wnikania ciepła, który jest funkcją

$d, L, u, c, \lambda, \eta, \beta, \rho, T, g$

postępując się zasadami analizy wymiarowej można zapisać

$$\frac{\alpha d}{\lambda} = f_1 \left(\frac{ud\rho}{\eta}, \frac{c\eta}{\lambda}, \frac{gL^3}{\nu^2} \cdot \beta\Delta T, \frac{d}{L} \right)$$

Ułamki bezwymiarowe noszą następujące nazwy:

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} \quad \text{liczba Nusselta;}$$

$$Pr = \left(\frac{c\eta}{\lambda} \right) \quad \text{liczba Prandtla;}$$

$$Re = \left(\frac{ud\rho}{\eta} \right) \quad \text{liczba Reynoldsa;}$$

$$Gr = \left(\frac{gL^3}{\nu^2} \right) \cdot \beta\Delta T \quad \text{liczba Grashofa;}$$

$$K_g = \left(\frac{d}{L} \right) \quad \text{liczba podobieństwa geometrycznego;}$$

$$Nu = f_1 (Re, Pr, Gr, K_g)$$

ANALIZA WYMIAROWA

Teoremat π Buckinghama

Równanie zupełne i jednorodne

N = wielkości fizyczne,

n = wielkości o niejednakowych wymiarach,

k = wielkości wymiarowo niezależne,

Równanie będzie zawierać $(N-k)=t$
ułamków bezwymiarowych (liczb, kryteriów)

Liczba kompleksów = $n-k$

Liczba simpleksów = $N-n$

ANALIZA WYMIAROWA

1) $C = L^a \cdot M^b \cdot T^c$

2) $C = k \cdot C_1^a \cdot C_2^b \cdot C_3^c \cdot \dots \cdot C_m^m$

wielkości te są wymiarowo niezależne

3) $C = k \cdot C_1^a \cdot C_2^b \cdot C_3^c \cdot \dots \cdot C_m^m \cdot \dots \cdot C_n^n$

Wielkości m, są wymiarowo niezależne
a wielkości n-m, są wymiarowo zależne

Równania wymiarowe, rozwiązuje się metodami:

- a) **Reyleigha,**
- b) Buckinghamama,
- c) Równań różniczkowych.

KONWEKCJA WYMUSZONA I BURZLIWY RUCHU PŁYNU

$Re > 2100$, dokładnie $Re > 10^4$ wówczas współczynnik wnikania ciepła jest funkcją:

$$\alpha = f(w, d, L, \eta, \rho, c, \lambda)$$

wg analizy wymiarowej:
$$\frac{\alpha d}{\lambda} = f_1\left(\frac{wd}{\eta}, \frac{c\eta}{\lambda}, \frac{L}{d}\right)$$

$$Nu = f_1(Re, Pr, K_g) \quad \text{lub} \quad Nu = A Re^B Pr^C$$

na podstawie doświadczeń wyznacza się wartości współczynników A, B i C.
gdy $L/d > 50$ wówczas jego wpływ na wartość α , można pominąć, wtedy:

$$\alpha = f_2(w, d, \eta, c, \lambda)$$

KONWEKCJA WYMUSZONA I BURZLIWY RUCHU PŁYNU

$Re > 2100$, dokładnie $Re > 10^4$

opierając się na metodzie Reyleigha można zapisać

$$\alpha = A w^B c^C d^D \eta^E \lambda^F$$

Równanie wymiarów fizycznych jest zatem następujące:

$$\left[\frac{J}{m^2 \cdot s \cdot \text{deg}} \right] = \left[\frac{kg}{m^2 \cdot s} \right]^B \cdot \left[\frac{J}{kg \cdot \text{deg}} \right]^C \cdot [m]^D \cdot \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]^E \cdot \left[\frac{J}{m \cdot s \cdot \text{deg}} \right]^F$$

Aby była zachowana jednorodność wymiarowa muszą być spełnione związki:

$$\frac{J}{\text{deg}} \rightarrow 1 = C + F$$

$$m \rightarrow -2 = -2B + D - E - F$$

$$s \rightarrow -1 = -B - E - F$$

$$kg \rightarrow 0 = B - C + E$$



Wyrażając niewiadome D, E, F przy pomocy B i C otrzymuje się:

$$D=B-1$$

$$E=C-B$$

$$F=1-C$$

Zatem:

$$\alpha = Aw^B c^C d^{B-1} \eta^{C-B} \lambda^{1-C}$$

Dzieląc obie strony równania przez α i grupując wyrazy z wykładnikami potęg B i C otrzymuje się:

$$1 = A \frac{\left(\frac{w \cdot d}{\eta}\right)^B \left(\frac{c \cdot \eta}{\lambda}\right)^C}{\left(\frac{\alpha \cdot d}{\lambda}\right)} \Rightarrow \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} = A \left(\frac{w \cdot d}{\eta}\right)^B \cdot \left(\frac{c \cdot \eta}{\lambda}\right)^C$$

$$\Rightarrow Nu = A \cdot Re^B \cdot Pr^C \Rightarrow Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

ANALIZA WYMIAROWA

Teoremat π Buckinghama - sprawdzenie

$$N = 6$$

$$n = 6$$

$$k = 3 \text{ (średnica; ciepło właściwe; prędkość masowa)}$$

Równanie będzie zawierać $(N-k)=t = 3$ (Re; Nu; Pr)
ułamków bezwymiarowych (liczb, kryteriów)

$$\text{Liczba kompleksów} = n - k = 3$$

$$\text{Liczba simpleksów} = N - n = 0$$

KONWEKCYJA WYMUSZONA

czyli wnikanie przy wymuszonym przepływie ciepła

Opisuje równanie kryterialne:

$$Nu = C \cdot Re^a \cdot Pr^b \cdot (d/L)$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$$

liczba Nusselta (charakteryzująca podobieństwo kinetyczne czyli intensywność przepływu ciepła na granicy płyn - ścianka),

α - współczynnik wnikania ciepła [W/m²·K],

d - średnica przewodu [m],

λ - współczynnik przewodzenia ciepła [W/m·K]

$$Pr = \frac{c \cdot \eta}{\lambda}$$

liczba Prandtla (charakteryzująca właściwości fizykochemiczne płynu),

c - ciepło właściwe płynu [J/kg·K],

$$Re = \frac{u \cdot d \cdot \rho}{\eta}$$

liczba Reynoldsa (charakteryzująca podobieństwo hydrodynamiczne),

u - średnia liniowa prędkość przepływu płynu [m/s],

ρ - gęstość płynu [kg/m³],

η - współczynnik lepkości dynamicznej płynu [Pa·s]

Re charakteryzuje rodzaj przepływu płynu przez rurociąg:

Re < 2100 - przepływ laminarny (uwarstwiony),

2100 < Re < 3000 - przepływ przejściowy,

Re > 3000 - przepływ burzliwy,

$\frac{d}{L}$ liczba podobieństwa geometrycznego (simpleks geometryczny),

L - długość przewodu [m]

burzliwy przepływ płynu $10^4 < Re > 10^6$
ciecze posiadają lepkość zbliżoną do lepkości wody

równanie Kraussolda

ogrzewanie

$$Nu = 0,032 Re^{0,8} Pr^{0,37} \left(\frac{d}{L}\right)^{-0,054}$$

chłodzenie

$$Nu = 0,032 Re^{0,8} Pr^{0,3} \left(\frac{d}{L}\right)^{-0,054}$$

burzliwy przepływ płynu $Re > 10^4$
 $L/d > 50$

ogrzewanie i chłodzenie płynów

równanie Mc Adamsa i Dittusa-Boeltera

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

burzliwy przepływ płynu $Re > 10^4$
 $0,7 < Pr > 160$

równanie Colburna

$$Nu = 0,032 Re^{0,8} Pr^{0,33}$$

ciecze o dużej lepkości ($\eta > 2\eta_{\text{wody}}$)

równanie Sider-Tate'a

$$Nu = 0,027 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33} \cdot (\eta/\eta_w)^{0,14}$$

η - współczynnik lepkości płynu w średniej temperaturze rdzenia strumienia [Pa·s],

η_w - współczynnik lepkości płynu w średniej temperaturze powierzchni ścianki [Pa·s],

zmienna wartość liczby Prandtla

$$10^4 < Re > 10^6 \text{ i } 0,6 < Pr > 2,5 \cdot 10^8$$

równanie Michejewa

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,48} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,25}$$

Pr - liczba Prandtla w średniej temperaturze rdzenia strumienia,

Pr_w - liczba Prandtla w średniej temperaturze powierzchni ścianki,

wówczas obliczając współczynnik wnikania ciepła należy uwzględnić współczynnik poprawkowy ε

$$\varepsilon = f\left(\frac{L}{d}, Re\right)$$

W przypadku gazów liczba Prandtla w dużym zakresie ciśnień i temperatury jest wielkością stałą, zależną od ilości atomów w cząsteczce, czy są to cząsteczki polarne lub niepolarne:

gazy jednoatomowe - 0,67

dwuatomowe - 0,72

trójatomowe - 0,8

cztero- i więcej atomowe - 1

np. dla gazu dwuatomowego : $Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot 0,72^{0,4} = 0,021 \cdot Re^{0,8}$

Jeśli przekrój nie jest kołowy to należy wyznaczyć średnicę zastępczą d_e .

$$d_e = \frac{4 \cdot S(\text{pole powierzchni})}{B(\text{obwód})}$$

przepływ laminarny $Re < 2100$

niewielka różnica temperatur pomiędzy ścianką a płynem

$$Nu = C \left(Re Pr \frac{d}{L} \right)^n$$

wartości współczynnika C i wykładnika n zależą od wartości iloczynu

$$Re Pr \frac{d}{L}$$

iloczyn liczby Reynoldsa i liczby Prandtla to liczba Peckleta

$$Re Pr = Pe$$

zatem

$$Nu = C \left(Pe \frac{d}{L} \right)^n$$

1) dla $Re \cdot Pr \cdot d/L > 13$ współczynnik $C=1,86$ zaś $n=0,33$ stąd:

$$Nu = 1,86 \cdot (Re \cdot Pr \cdot d/L)^{0,33}$$

gdy istnieje silna zależność lepkości od temperatury współczynnik C wg doświadczeń Sider - Tate'a wynosi:

$$1,86 \cdot (\eta/\eta_w)^{0,14}$$

$$Nu = 1,86 \cdot (\eta/\eta_w)^{0,14} \cdot (Re \cdot Pr \cdot d/L)^{0,33}$$

2) dla $Re \cdot Pr \cdot d/L < 13$ współczynnik C wynosi $1,62$ zaś $n=0,33$

$$Nu = 1,62 \cdot (Re \cdot Pr \cdot d/L)^{0,33}$$

3) dla $Re \cdot Pr \cdot d/L < 4,5$

$$Nu = 0,5 \cdot Re \cdot Pr \cdot d/L$$

INNE PRZYPADKI KONWEKCYI

1. Wnikanie ciepła w strefie przejściowej pomiędzy ruchem przejściowym a burzliwym,

$$Nu = 0,008Re^{0,9}Pr^{0,43}$$

2. Wnikanie ciepła podczas przepływu płynu w wężownicach,

$$\alpha_r = \varepsilon_r \cdot \alpha \quad \varepsilon_r = 1 + 3,54 \left(\frac{d}{D} \right)$$

3. Wnikanie ciepła przez warstwę wypełnienia,
4. Wnikanie ciepła podczas ruchu płynu prostopadłego do pojedynczej rury (cylindra),
5. Wnikanie ciepła przy opływie pęku rur,
6. Wnikanie ciepła przy opływie kuli,
7. Wnikanie ciepła przy przepływie płynu wzdłuż ścianki płaskiej,
8. Wnikanie ciepła w procesie mieszania.

KONWEKCJA NATURALNA

Wyróżniamy dwa rodzaje KONWEKCJI NATURALNEJ:

1) wnikanie ciepła w przestrzeni nieograniczonej dla której $Pr \geq 0,5$

$$\alpha = f(l, \rho, c, \lambda, \eta, \beta, \Delta T, g)$$

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n$$

gdzie:

Nu - liczba Nusselta,

$$Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t = \frac{g \cdot l^3 \cdot \rho^2}{\eta^2} \cdot \beta \cdot \Delta t$$

- liczba Grashofa (charakteryzuje oddziaływanie wzajemne sił tarcia

wewnętrznego i sił wyporu, spowodowane różnicą gęstości w poszczególnych punktach płynu),

Pr - liczba Prandtla.

l - charakterystyczny wymiar liniowy [m],

ν - lepkość kinematyczna płynu [m^2/s],

β - współczynnik rozszerzalności objętościowej [$1/K$],

Δt - różnica temperatur między temperaturą powierzchni ściany a temperaturą ośrodka [$^{\circ}C, K$].

wartości współczynnika C i wykładnika n zależą od iloczynu $Gr \cdot Pr$

nr	$Gr \cdot Pr$	C	n	Uwagi
1	$10^{-3} - 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8	ruch laminarny
2	$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4	ruch przejściowy
3	$2 \cdot 10^7 - 10^{13}$	0,135	1/3	ruch burzliwy

Dla iloczynu $Gr \cdot Pr < 10^{-3}$ liczba Nusselta ma wartość stałą, równą 0,45 czyli $C=0,45$ zaś $n=0$, zatem:

$$\alpha = 0,45 \cdot \frac{\lambda}{l} \quad \text{tzn. wnikanie ciepła określa przewodnictwo cieplne płynu}$$

Wszelkie obliczenia dokonuje się dla temperatury warstwy przyściennej obliczanej jako średnia arytmetyczna z temperatury powierzchni ściany i ośrodka:

$$T_m = \frac{T_w + T}{2}$$

Współczynnik rozszerzalności objętościowej gazów oblicza się, jak dla gazów doskonałych, jako odwrotność absolutnej temperatury gazów [K] w warstwie przyściennej:

$$\beta = \frac{1}{T_m}$$

Charakterystyczny wymiar liniowy l :

- pionowa ściana płaska lub cylindryczna - l jest wysokością ściany,
- dla kuli i rury poziomej - l jest ich średnicą,
- dla płyty poziomej, zwykle prostokątnej - l jest długością mniejszego boku, ale l_{\max} wynosi 0,6 m. Większa wartość nie ma wpływu na współczynnik wnikania ciepła α

Dla płyty poziomej, jeżeli istnieją warunki ułatwiające konwekcję (powierzchnia grzejna skierowana do góry lub chłodząca skierowana w dół) wówczas

współczynnik α należy zwiększyć o 30%,

natomiast gdy istnieją warunki utrudniające konwekcję

należy α zmniejszyć o 30%.



AGH

KONWEKCJA NATURALNA

2) wnikanie ciepła w przestrzeni ograniczonej

Jest skomplikowane ze względu na małe rozmiary rozpatrywanej powierzchni. Nie można ustalić osobno współczynników α dla ogrzewania i chłodzenia płynu. Natężenie przepływu ciepła oblicza się z równania na przewodzenie ciepła.

gdy $Gr \cdot Pr < 10^3$

przewodzenie przez warstwę płynu

$$Q_* = \frac{\lambda_z}{\sigma} \cdot A \cdot \Delta T \quad \frac{\lambda_z}{\lambda} = 1$$

równoważny współczynnik przewodzenia ciepła λ_z

jest równy rzeczywistemu współczynnikowi przewodzenia ciepła λ

natomiast gdy $Gr \cdot Pr > 10^3$

$$\frac{\lambda_z}{\lambda} = 0,18 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25}$$

wartość λ_z oblicza się dla temperatury średniej między temperaturami ściany cieplejszej i zimniejszej.

Wymiarem charakterystycznym w liczbie Grashofa jest szerokość komory σ .

WNIKANIE CIEPŁA (KONWEKCJA) PRZY ZMIANIE STANU SKUPIENIA

1) *Wnikanie przy wrzeniu cieczy.*

Jest to proces skomplikowany, różni się m.in. wrzenie w objętościach dużych oraz w objętościach małych np. w rurach.

Różni się m.in. wrzenie pęcherzykowe, błonkowe i inne.

$$\Delta T = T_w - T_b$$

Najczęstszym przypadkiem jest wrzenie pęcherzykowe. Wrzenie to pod ciśnieniem atmosferycznym występuje gdy $\Delta T = 5-25 \text{ K (}^\circ\text{C)}$.



Mechanizm wrzenia cieczy jest złożony, składają się na niego m.in.:

1. Mechanizm tworzenia się pęcherzyka pary,
2. Ustalenie warunków określających miejsca czynne powierzchni grzejnej,
3. Wpływ napięcia powierzchniowego cieczy,
4. Wpływ cyrkulacji wrzącej cieczy na wnikanie ciepła przez ciecz od ścianki grzejnej,

WNIKANIE CIEPŁA (KONWEKCJA) PRZY ZMIANIE STANU SKUPIENIA

Małe ΔT - dominuje wrzenie pęcherzykowe, wsp. wnikania rośnie gdy rośnie ΔT aż do osiągnięcia ΔT_{kryt} .

Duże ΔT - dominuje wrzenie błonkowe nietrwałe i trwałe; wsp. wnikania jest zwykle mniejszy niż dla wrzenia pęcherzykowego,

$$\alpha = 3,14 \cdot (p/10^5)^{0,15} \cdot (q/A)^{0,7}$$

$$\alpha = 45,8 \cdot (p/10^5)^{0,5} \cdot \Delta T^{2,33}$$

gdzie:

q/A - gęstość strumienia cieplnego (natężenie przepływu ciepła na jednostkę powierzchni grzejnej [W/m^2],

p - ciśnienie wrzącej cieczy [Pa],

ΔT - różnica temperatur między temperaturą powierzchni ścianki a temperaturą wrzącej cieczy [K , $^{\circ}\text{C}$].

Dla roztworów wodnych i innych cieczy:

$$\alpha' = \varphi \cdot \alpha_{wody}$$

Roztwory wodne	φ	ciecze	φ
10% NaSO ₄	0,94	Metanol	0,53
20% r. cukru	0,87	Etanol	0,45
40% r. cukru	0,84	Izopropanol	0,70
26% r. gliceryny	0,83	n-butanol	0,32
55% r. gliceryny	0,75	Benzen	0,27
9% NaCl	0,86	Toulen	0,36
24% NaCl	0,61	Czterochlorek węgla	0,35

2) **wnikanie ciepła przy kondensacji pary.** Wnikanie ciepła od pary do ścianki, której temperatura jest niższa od temperatury nasycenia.



skraplanie błonkowe, skropliny tworzą błonkę (film) ciągłą, spływającą grawitacyjnie ku dołowi,



skraplanie kropelkowe, skropliny tworzą na powierzchni ścianki oddzielne krople, które spływają ku dołowi w postaci pojedynczych kropli,

$$\alpha = f(r, \rho, c, \lambda, \eta, l, \Delta T, g)$$

$$Nu = C \cdot (Ga \cdot Pr \cdot Ko)^n$$



AGH

gdzie:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} - \text{liczba Nusselta,}$$

$$Pr = \frac{c \cdot \eta}{\lambda} - \text{liczba Prandtla,}$$

$$Ga = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} - \text{liczba Galileusza (charakteryzuje stosunek sił tarcia wewnętrzznego do sił ciężkości),}$$

$$Ko = \frac{r}{c \cdot \Delta T} - \text{liczba kondensacji (jest to miara stosunku strumienia cieplnego zużywanego na fazowe przekształcenie substancji do ciepła przechłodzenia jednej z faz w temperaturze nasycenia),}$$

gdzie:

α - współczynnik wnikania ciepła od kondensującej pary do ścianki [W/m²·K],

g - przyspieszenie ziemskie [m/s²],

ν - współczynnik lepkości kinematycznej kondensatu [m²/s],

c - ciepło właściwe kondensatu [J/kg·K]

η - współczynnik lepkości dynamicznej kondensatu [Pa·s],

r - ciepło kondensacji pary [J/kg],

ΔT - różnica temperatur między temperaturą kondensującej pary a temperaturą powierzchni ścianki [K, °C].

$$Nu = C \cdot (Ga \cdot Pr \cdot Ko)^n$$

Wartości współczynnika C i wykładnika n są następujące:

1. rura pionowa:

$$C = 1,15 \quad n = 0,25$$

H - wymiar charakterystyczny to wysokość rury,

2. rura pozioma:

$$C = 0,725 \quad n = 0,25$$

d - wymiar charakterystyczny to średnica zewnętrzna rury,

Zastrzeżenia:

- a) kondensacja następuje w sposób błonkowy,
- b) błonka kondensatu sływa ruchem laminarnym z prędkością nie przekraczającą 1,0 [m/s],
- c) para nie zawiera niekondensujących gazów.

Zatem wartości współczynnika wnikania ciepła można wyliczyć na podstawie następujących wzorów:

1) dla rury pionowej:

$$\alpha = 1,15 \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \cdot \rho^2 \cdot r \cdot g}{H \cdot \eta \cdot \Delta T}}$$

H - wysokość rury [m],

2) dla rury poziomej (kondensacja na zewnątrz rury):

$$\alpha = 0,725 \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \cdot \rho^2 \cdot r \cdot g}{d \cdot \eta \cdot \Delta T}}$$

d - średnica zewnętrzna rury [m],

Wartości liczbowe parametrów fizycznych kondensatu t.j. ρ , λ , η □□
podstawia się dla temperatury błonki kondensatu T_m .

$$T_m = \frac{T_w + T_s}{2}$$

T_w - temperatura powierzchni ścianki,

T_s - temperatura nasycenia,

Wartość liczbową ciepła kondensacji r oblicza się dla T_s .



PRZENIKANIE CIEPŁA

PRZENIKANIE CIEPŁA



AGH

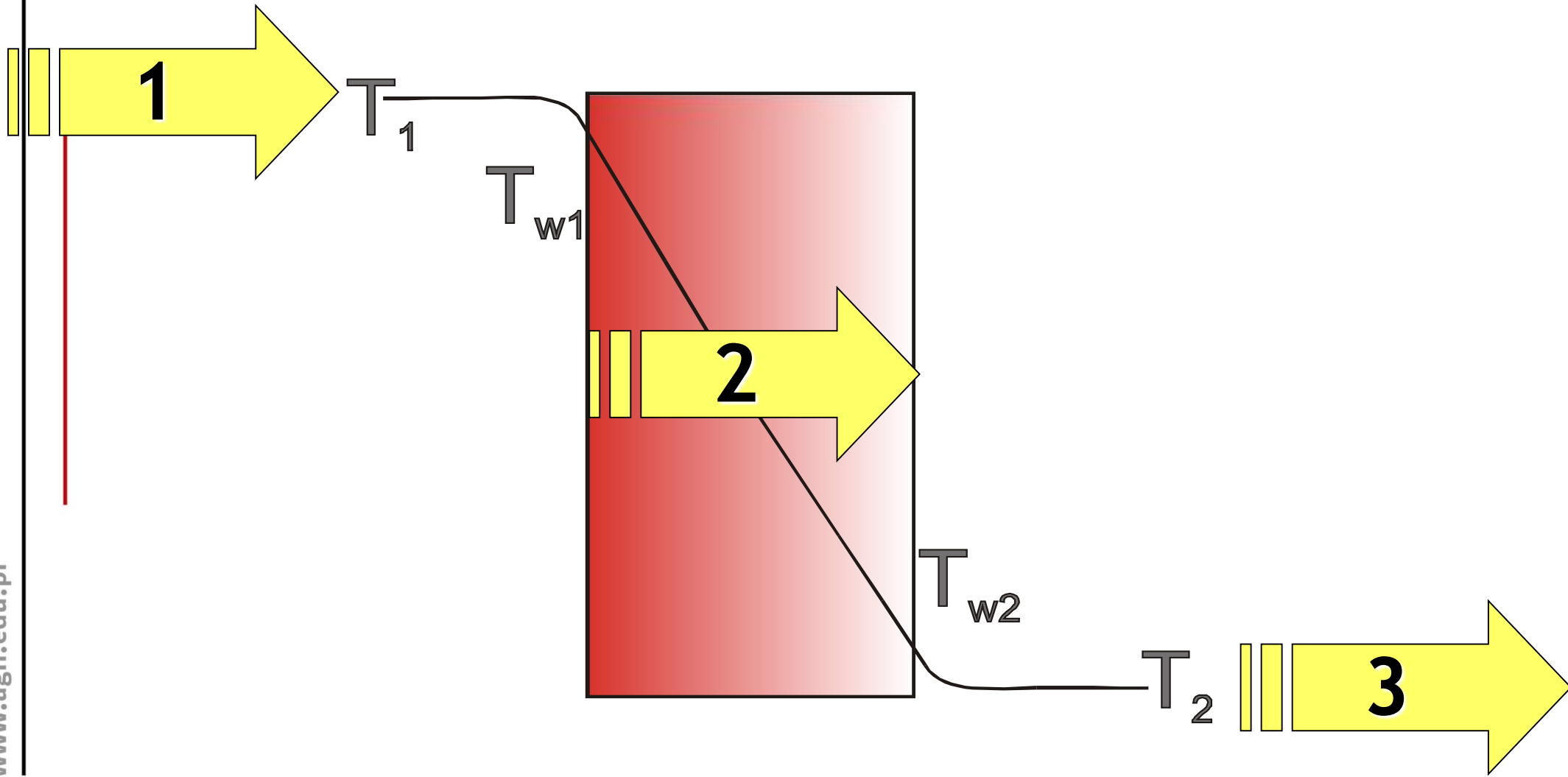
W przemyśle ruch ciepła zachodzi równocześnie dwoma lub trzema sposobami, najczęściej odbywa się przez **przewodzenie** i **wnikanie**. Mechanizm transportu ciepła łączący wymienione sposoby ruchu ciepła nazywa się **PRZENIKANIEM CIEPŁA**.

PRZE(WODZENIE)+(W)NIKANIE
= PRZENIKANIE

Przepływ ciepła jest ustalony, zatem:

$$\frac{dQ}{dt} = \dot{Q} = \text{const}$$

PRZENIKANIE CIEPŁA POMIĘDZY DWOMA OŚRODKAMI PŁYNNYMI ODDZIELONYMI ŚCIANKĄ PŁASKĄ



PRZENIKANIE CIEPŁA POMIĘDZY DWOMA OŚRODKAMI PŁYNNYMI ODDZIELONYMI ŚCIANKĄ PŁASKĄ

Przepływ ciepła odbywa się w trzech stadiach:

1. wnikanie ciepła od ośrodka do ścianki płaskiej,

$$\dot{Q}_1 = \alpha_1 \cdot (T_1 - T_{w1}) \cdot A [W] - \text{prawo Newtona}$$

2. przewodzenie ciepła przez ściankę,

$$\dot{Q}_2 = \frac{\lambda \cdot A}{\sigma} (T_{w1} - T_{w2}) [W] - \text{prawo Fouriera}$$

3. wnikanie ciepła od ścianki do ośrodka ogrzewanego,

$$\dot{Q}_3 = \alpha_2 \cdot (T_{w1} - T_2) \cdot A [W] - \text{prawo Newtona}$$

Ponieważ ruch ciepła jest ustalony $\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dot{Q}_3$

można równania dodać stronami, Strumień cieplny i gęstość strumienia cieplnego na drodze przenikania można, zatem wyrazić następująco:

$$\dot{Q} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\sigma}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot A \cdot (T_1 - T_2) [W]$$

$$q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\sigma}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot (T_1 - T_2) \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

gdzie: $K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\sigma}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \left[\frac{W}{m^2 \cdot \text{deg}} \right]$

współczynnik przenikania ciepła
deg (z ang. degree)- stopień °C, K

$$\dot{Q} = K \cdot A \cdot (T_1 - T_2) [W] \quad q = K \cdot (T_1 - T_2) [W/m^2]$$

zatem:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{1}{K}}$$

gdzie, $1/K$ to opór termiczny R_t równy sumie oporów: ośrodka ogrzewającego, ścianki i ośrodka ogrzewanego :

$$\frac{1}{K} = R_t = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\sigma}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

WSPÓŁCZYNNIK PRZENIKANIA K:

$$K = \frac{\dot{Q}}{A(T_1 - T_2)} = \left[\frac{W}{m^2 \cdot deg} \right]$$

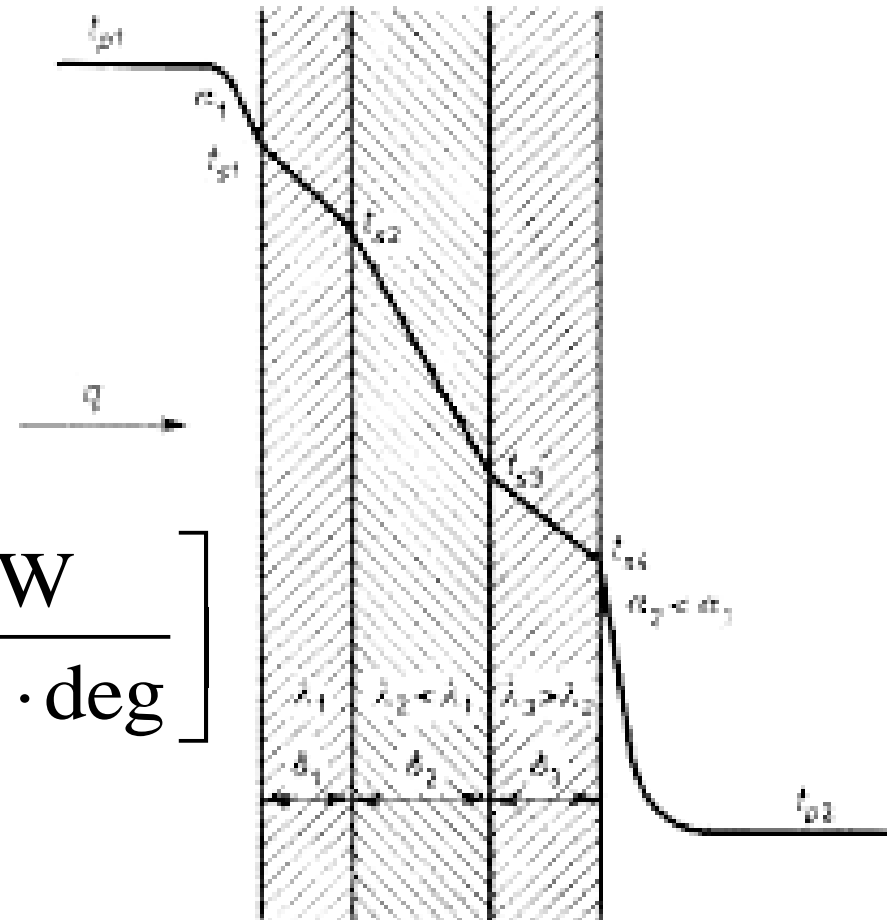
Współczynnik K oznacza tę ilość ciepła jaka przenika przez ściankę od ośrodka grzejącego do ogrzewanego gdy powierzchnia ścianki wynosi 1m^2 a spadek temperatury 1 deg .

PRZENIKANIE PRZEZ ŚCIANKĘ PŁASKĄ WIELOWARSTWOWĄ

$$\dot{Q} = K \cdot A \cdot (T_1 - T_2) [W]$$

$$q = K \cdot (T_1 - T_2) [W/m^2]$$

gdzie: $K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\sigma}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \left[\frac{W}{m^2 \cdot \text{deg}} \right]$



PRZENIKANIE PRZEZ ŚCIANKĘ CYLINDRYCZNĄ JEDNOWARSTWOWĄ



1. Wnikanie od ośrodka grzejącego do ścianki

$$\dot{Q}_1 = \alpha_1 2\pi r_1 L (T_1 - T_{w1})$$

2. Przewodzenie przez ściankę

$$\dot{Q}_2 = \frac{\pi L (T_1 - T_2)}{\frac{1}{2\lambda_1} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

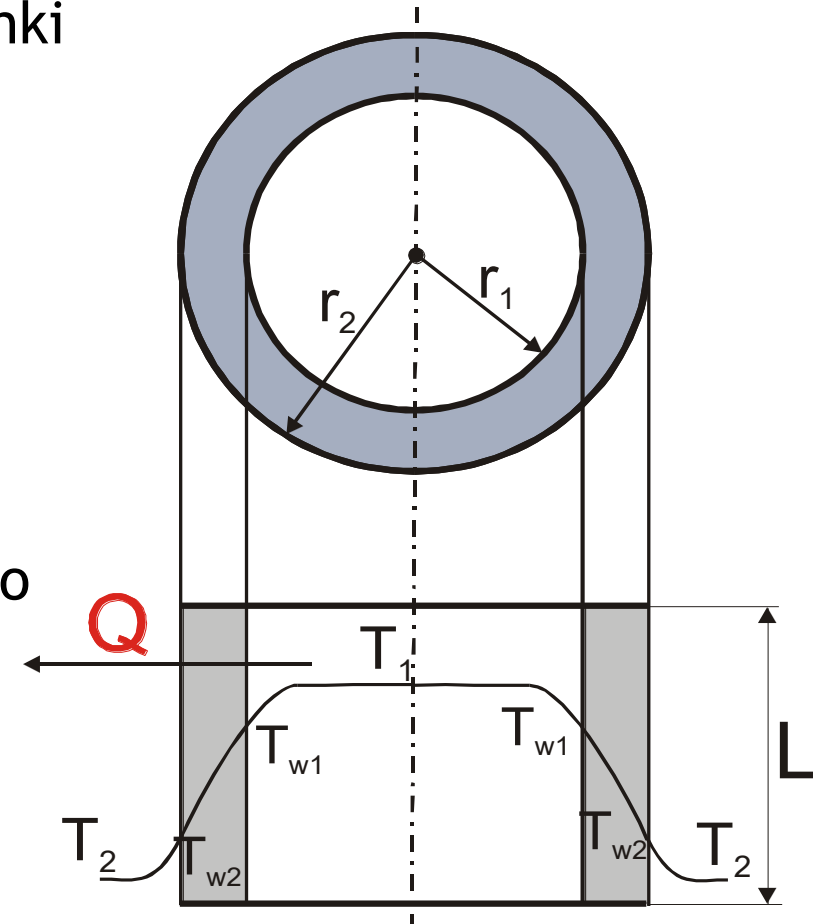
3. Wnikanie od ścianki do ośrodka ogrzewanego

$$\dot{Q}_3 = \alpha_2 2\pi r_2 L (T_{w2} - T_2)$$

Zsumowanie równań na spadki temperatur dla każdego przypadku daje:

$$\dot{Q} = K_d \cdot \pi \cdot L \cdot (T_1 - T_2) [W]$$

$$K_d = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot 2r_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot 2r_2}} \left[\frac{W}{m \cdot \text{deg}} \right]$$



$$K_d = \frac{\dot{Q}}{\pi L(T_1 - T_2)} = \left[\frac{W}{m \cdot deg} \right]$$

Współczynnik K_d oznacza tę ilość ciepła jaka przenika przez ściankę od ośrodka grzejącego do ogrzewanego gdy długość rury wynosi 1m a spadek temperatury 1 deg.

Sumaryczny opór cieplny podczas ruchu ciepła przez ściankę cylindryczną:

$$\frac{1}{K_d} = R_t = \frac{1}{\alpha_1 2r_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\alpha_2 2r_2}$$

PRZENIKANIE PRZEZ ŚCIANKĘ CYLINDRYCZĄ WIELOWARSTWOWĄ

$$K_d = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot 2r_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot 2r_2}} \left[\frac{W}{m \cdot deg} \right]$$

W przypadku ścianek cylindrycznych można stosować uproszczenia:

Gdy rura jest cienkościenna i gdy ΔT jest nieznaczna można stosować wzory dla ścianki płaskiej.

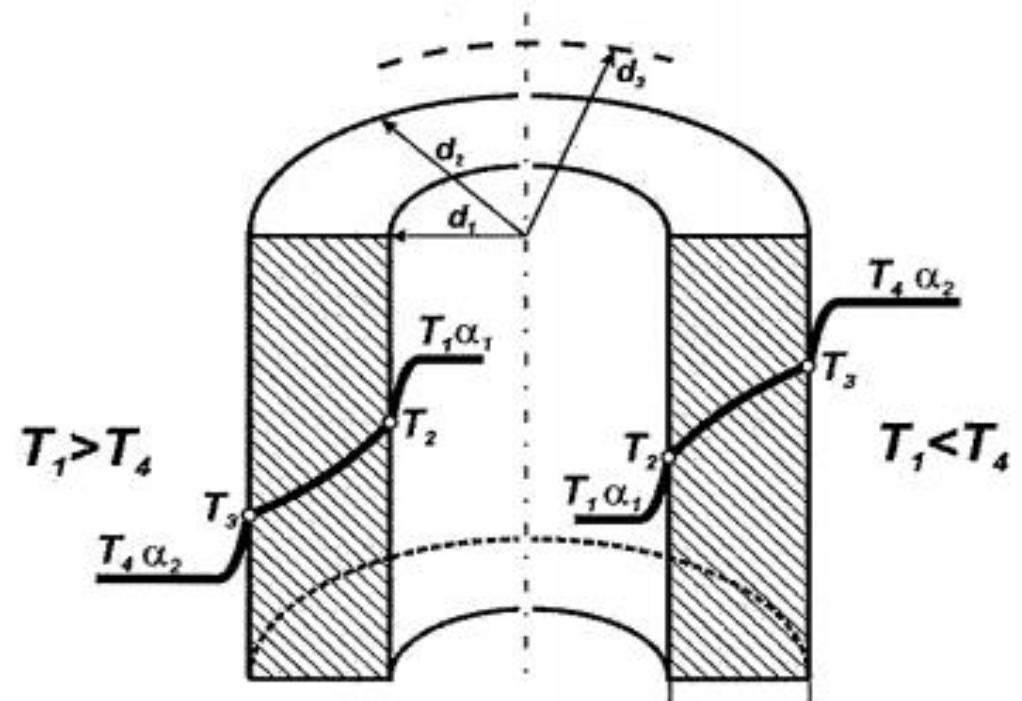
Warunek $d_{ZEWN}/d_{WEWN} \leq 2$.

$$\dot{Q} = K \cdot A \cdot (T_1 - T_2) [W] \quad A = 2\pi r_x L$$

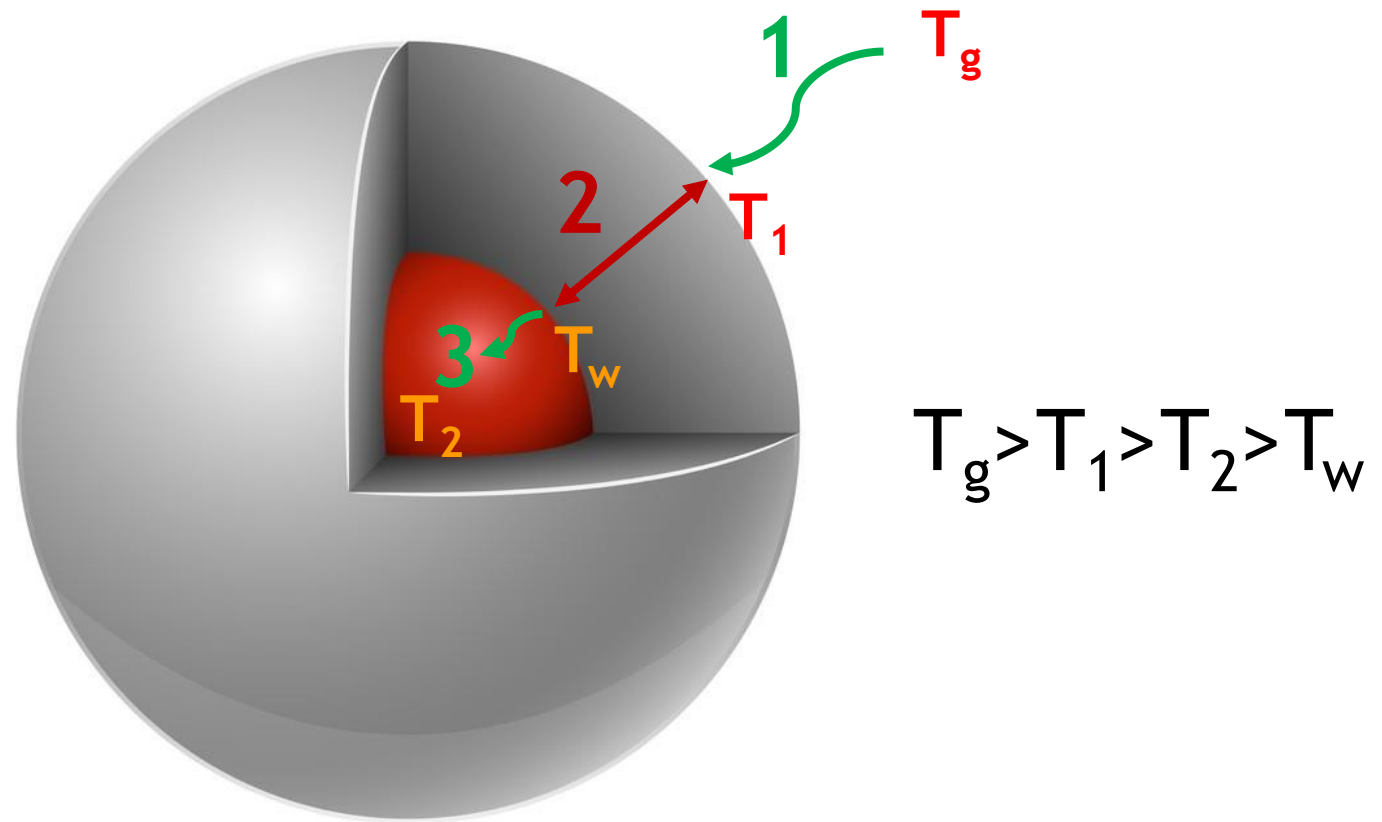
Wówczas we wzorze na powierzchnię za r_x podstawia się:
 jeżeli $\alpha_1 \gg \alpha_2$ to $r_x = r_2$ - promień zewnętrzny rury,
 (przenikanie od wnętrza ścianki do otoczenia)
 jeżeli $\alpha_1 \approx \alpha_2$ to:

$$r_x = \frac{r_1 + r_2}{2}$$

jeżeli $\alpha_1 \ll \alpha_2$ to $r_x = r_1$
 - promień wewnętrzny rury.
 (przenikanie od otoczenia do wnętrza ścianki)



PRZENIKANIE PRZEZ ŚCIANKĘ KULISTĄ JEDNOWARSTWOWĄ



1. Wnikanie od ośrodka grzejjego do ścianki

$$\dot{Q}_1 = \alpha_1 4\pi r_z^2 (T_g - T_1)$$

2. Przewodzenie przez ściankę

$$\dot{Q}_2 = \frac{\pi \cdot \Delta T}{\frac{1}{4\lambda_k} \cdot \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_z} \right)}$$

3. Wnikanie od ścianki do ośrodka ogrzewanego

$$\dot{Q}_3 = \alpha_2 4\pi r_w^2 (T_2 - T_w)$$

Zsumowanie równań na spadki temperatur dla każdego przypadku daje:

$$\dot{Q} = \frac{\pi \cdot (T_g - T_w)}{\frac{1}{\alpha_1 4r_z^2} + \frac{1}{4\lambda_k} \cdot \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_z} \right) + \frac{1}{\alpha_2 4r_w^2}} \quad [W]$$

Współczynnik K oznacza tę ilość ciepła jaka przenika przez ściankę od ośrodka grzejącego do ogrzewanego gdy spadek temperatury wynosi 1 deg.

$$K_k = \frac{\dot{Q}}{\pi(T_1 - T_2)} = \left[\frac{W}{deg} \right]$$

$$K_k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 4r_z^2} + \frac{1}{4\lambda_k} \cdot \left(\frac{1}{r_w} - \frac{1}{r_z} \right) + \frac{1}{\alpha_2 4r_w^2}} \left[\frac{W}{deg} \right]$$

DZIĘKUJĘ ZA
UWAGĘ !!!

