

Wnikanie ciepła przy konwekcji swobodnej

1. Wstęp

Współczynnik wnikania ciepła podczas konwekcji silnie zależy od prędkości czynnika. Im prędkość czynnika jest większa, tym współczynnik wnikania ciepła jest większy. Podczas konwekcji swobodnej prędkość czynnika jest niewielka, mniejsza niż 1 m/s. Z tego powodu współczynniki wnikania ciepła, dla określonego czynnika, są podczas konwekcji swobodnej znacznie mniejsze od tych uzyskiwanych dla tego czynnika podczas konwekcji wymuszonej. Zaletą urządzeń, w których wymiana ciepła odbywa się na drodze konwekcji swobodnej, jest brak potrzeby zastosowania pomp lub wentylatorów do wymuszania przepływu czynnika. W ten sposób oszczędza się na koszcie zakupu pomp lub wentylatorów oraz na koszcie przetłaczania czynników, a także redukuje się poziom hałasu, co czasem jest bardzo ważne. W wymiennikach ciepła zdarza się, że po jednej stronie wymiany ciepła występuje konwekcja swobodna, a po drugiej konwekcja wymuszona (np. grzejniki centralnego ogrzewania wodnego).

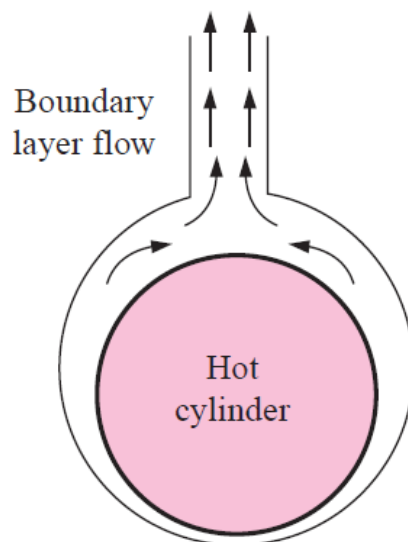
Konwekcja naturalna występuje m.in. w następujących przypadkach:

- chłodzenie skraplaczy w chłodziarkach domowych,
- wnikanie ciepła do parowników chłodziarek,
- ogrzewanie powietrza w pomieszczeniach (grzejniki c.o., ogrzewanie podłogowe),
- chłodzenie układów elektronicznych (np. w telewizorach, tabletach, itp.),
- oddawanie ciepła przez ludzi i zwierzęta.

Zazwyczaj konwekcji swobodnej towarzyszy promieniowanie cieplne. W przypadku gazów, strumień ciepła przekazywanego przez ściankę do gazu na drodze promieniowania jest tego

samego rzędu co konwekcyjny strumień ciepła. Wyjątkiem są ścianki o niskiej emisyjności.

Mechanizm konwekcji swobodnej zostanie omówiony na przykładzie rury poziomej, w której płynie woda o temperaturze wyższej od temperatury otoczenia. Wskutek wnikania ciepła, temperatura powietrza wokół rury jest wyższa od temperatury powietrza znajdującego się w dużej odległości od rury. W bezpośrednim pobliżu ścianki rury tworzy się warstwa przyścienna, najczęściej laminarna, przez którą ciepło jest transportowane na drodze przewodzenia. Temperatura powietrza maleje w kierunku od ścianki rury. Ciepłe warstwy powietrza o mniejszej gęstości są otoczone przez chłodniejsze warstwy powietrza o większej gęstości. Wskutek tego siły wyporu powodują ruch cieplejszego powietrza w kierunku ku górze. W miejsce cieplejszego powietrza napływa powietrze chłodniejsze z okolic rury, które następnie ogrzewane jest ciepłem oddawanym przez rurę. Tworzy się prąd konwekcyjny wzmagający transport ciepła od rury do powietrza.



Rys. 1-1. Konwekcja swobodna wokół poziomego walca.

W zależności od wartości liczby podobieństwa *Grashofa*, Gr , ruch płynu podczas konwekcji swobodnej może być laminarny,

przejściowy lub burzliwy. Jako kryterium zmiany ruchu podczas konwekcji swobodnej jest też przyjmowana wartość iloczynu GrPr.

2. Korelacje Michiejewa

Równanie uogólnione opisujące wnikanie ciepła przy konwekcji swobodnej ma często formę

$$Nu = f(Gr, Pr, \text{kształt ciała}) \quad (2.1)$$

Michiejew zaproponował następującą zależność uogólnioną do opisu wymiany ciepła podczas konwekcji swobodnej

$$Nu = C (Gr Pr)^n \quad (2.2)$$

która obejmuje cały zakres wartości iloczynu GrPr.

W korelacji (2.1) występuje zmienna nazwana „kształt ciała”.

W korelacji (2.2) zmienną tę uwzględnia wymiar charakterystyczny występujący w liczbie *Grashofa*.

Liczba *Grashofa*

$$Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta (T_w - T_\infty) \quad (2.3)$$

Liczba *Rayleigha*

$$Ra = Gr Pr \quad (2.4)$$

gdzie:

$l [m]$ - wymiar charakterystyczny ciała stałego - dla kuli i rury poziomej jest to ich średnica; dla płyty i rury pionowej ich wysokość; dla płyty poziomej mniejszy wymiar,

$\beta [1/K]$ - objętościowy współczynnik rozszerzalności termicznej płynu,

T_w - temperatura ścianki,

T_∞ - temperatura w dużej odległości od ścianki.

Współczynnik wnikania ciepła oblicza się wykorzystując wzór definicyjny na liczbę *Nusselta*

$$\alpha = \frac{\lambda Nu}{l} \quad (2.5)$$

Temperaturą odniesienia we wzorze (2.2) jest średnia temperatura warstwy przyściennej

$$T_m = \frac{T_w + T_\infty}{2} \quad (2.6)$$

Wartości współczynników *C* oraz *n* zależą od wartości iloczynu GrPr.

Tablica 2-1. Wartości współczynników *C*, *n* oraz uproszczone wzory na współczynnik wnikania ciepła przy konwekcji swobodnej dla kuli, rury oraz płyty.

GrPr	<i>C</i>	<i>n</i>	Wzory uproszczone $\alpha \left[\frac{W}{m^2 K} \right] =$
$< 10^{-3}$	0,45	0	$0,45 \frac{\lambda}{l}$
$10^{-3} \div 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8	$C_1 \left(\frac{\Delta T}{l^5} \right)^{1/8}$
$5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4	$C_2 \left(\frac{\Delta T}{l} \right)^{1/4}$
$> 2 \cdot 10^7$	0,135	1/3	$C_3 \Delta T^{1/3}$

$$\Delta T = T_w - T_\infty$$

W przypadku płyty poziomej, gdy ciepło oddaje górna powierzchnia lub gdy ciepło pobiera powierzchnia dolna

$$\alpha' = 1,3\alpha \quad (2.7)$$

a gdy ciepło oddaje dolna powierzchnia lub pobiera górna

$$\alpha' = 0,7\alpha \quad (2.8)$$

gdzie α to wartość wyznaczona za pomocą wzoru (2.2) lub wzorów uproszczonych z tablicy 2-1. Współczynniki C_i w tablicy 2-1 zależą od rodzaju płynu i jego temperatury.

Tablica 2-2. Współczynniki C_i dla powietrza.

T_m [°C]	0	50	100	200	300	500	1000
C_1	0,29	0,30	0,31	0,34	0,35	0,37	0,41
C_2	1,42	1,33	1,27	1,22	1,10	0,99	0,81
C_3	1,69	1,48	1,33	1,13	0,99	0,81	0,56

Tablica 2-3. Współczynniki C_i dla wody.

T_m [°C]	0	20	40	60	80	100	150	200
C_1	9,3	13,1	15,7	17,6	19,0	20,0	21,7	22,6
C_2	69,8	111,6	148,9	177,9	204,7	226,8	273,3	304,7
C_3	102,3	197,7	290,8	362,9	425,7	481,5	607,1	714,1

Kierunek przepływu ciepła można wg *Michiejewa* uwzględnić w równaniu (2.2) wymnażając prawą stronę tego równania przez wyrażenie $(Pr/Pr_w)^{1/4}$

$$Nu = C (Pr Gr)^n \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{1/4} \quad (2.9)$$

Po podstawieniu do uproszczonych wzorów przedstawionych w tablicy 2-1 współczynników C_i z tablic 2-2 lub 2-3 oraz wymiaru charakterystycznego l , w metrach, otrzymuje się współczynnik wnikania ciepła α wyrażony w $W/(m^2 K)$.

3. Zależność uogólniona Churchill i Chu dla konwekcji swobodnej przy powierzchni płyty pionowej

Rodzaj ruchu: *swobodny: laminarny, przejściowy i burzliwy*

Rodzaj czynnika: *dowolny płyn (ciecz lub gaz)*

Obiekt: *izotermiczna płyta pionowa*

$$\text{Nu} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387(\text{Gr Pr})^{1/6}}{\left[1 + (0,492 / \text{Pr})^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.1)$$

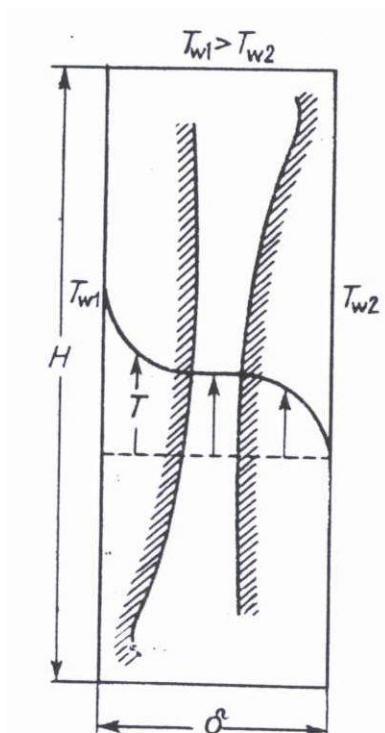
Wzór ważny dla wszystkich liczb *Prandtla* oraz dla

$$10^{-1} < (\text{Gr Pr}) < 10^{12} \quad (3.2)$$

Wymiar charakterystyczny: *wysokość płyty, L*

Temperatura odniesienia: *średnia temperatura warstwy przyściennej, T_m (wzór (2.6))*

4. Konwekcja swobodna w szczelinie pionowej



Rys. 4-2. Rozkład temperatury w szczelinie pionowej podczas konwekcji swobodnej.

$$q = \frac{\lambda_r}{\delta} (T_{w1} - T_{w2}) \quad (4.1)$$

λ_r - zastępczy współczynnik przewodzenia ciepła, uwzględniający wnikanie ciepła na drodze konwekcji swobodnej, $W/(m \cdot K)$

T_{w1}, T_{w2} - temperatury ścianek, z którymi styka się płyn.

Wzór *Jakoba*, ważny dla powietrza, przy $H/\delta > 3$

- dla $20\,000 < Gr < 200\,000$

$$\frac{\lambda_r}{\lambda} = 0,18 Gr^{1/4} \left(\frac{H}{\delta} \right)^{-1/9} \quad (4.2)$$

- dla $200\,000 < Gr < 11\,000\,000$

$$\frac{\lambda_r}{\lambda} = 0,065 Gr^{1/3} \left(\frac{H}{\delta} \right)^{-1/9} \quad (4.3)$$

$$\text{Gr} = \frac{g\delta^3}{\nu^2} \beta (T_{w1} - T_{w2}) \quad (4.4)$$

$$\beta = \frac{1}{\nu} \left(\frac{\partial \nu}{\partial T} \right)_p \quad (4.5)$$

gdzie we wzorze (4.5) $\nu [m^3/kg]$ jest objętością właściwą czynnika.

Temperaturą odniesienia jest średnia temperatura powierzchni ograniczających szczelinę

$$T_{sr} = (T_{w1} + T_{w2}) / 2 \quad (4.6)$$

Dla gazów współczynnik rozszerzalności objętościowej, β , jest równy odwrotności temperatury bezwzględnej, czyli w rozważanym przypadku

$$\beta = \frac{1}{T_{sr} [K]} \quad (4.7)$$