

Wyznaczanie współczynnika wymiany ciepła
w warunkach konwekcji swobodnej

1 Oznaczenia

- a - dyfuzyjność termiczna (współczynnik wyrównania temperatury), $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
- A - pole powierzchni, m^2
- c_p - ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu, $\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
- C_0 - stała promieniowania, $C_0 = 5,67 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}^4}$
- d - średnica, m
- g - przyspieszenie grawitacyjne, $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
- Gr - liczba Grashofa -
- l - długość, m
- Nu - liczba Nusselta, -
- Pr - liczba Prandtla -
- T_p - temperatura płynu, K
- T_s - temperatura powierzchni ścianki pręta, K
- T_{so} - temperatura powierzchni ścian otaczających (ściany pom.), K
- q - gęstość strumienia ciepła, $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
- \dot{Q}_g - strumień ciepła wytwarzany przez grzałkę, W
- α - współczynnik przejmowania ciepła, $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}$
- α_k - współczynnik przejmowania ciepła dla konwekcji, $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}$
- α_r - współczynnik przejmowania ciepła dla promieniowania, $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}$
- β - współczynnik rozszerzalności objętościowej, $\frac{1}{\text{K}}$
- ε_{s-so} - zastępcza zdolność emisji, -
- λ - współczynnik przewodzenia ciepła, $\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$
- ν - współczynnik lepkości kinematycznej, $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
- ρ - gęstość, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie podstawowych zależności pozwalających na obliczenie współczynnika wnikania ciepła przy konwekcji swobodnej. Wyznaczanie współczynnika wnikania ciepła dla konwekcji swobodnej od gorącego pręta ułożonego poziomo do otaczającego powietrza wykorzystując zależności kryterialne oraz metodą eksperymentalną.

2. Wprowadzenie teoretyczne

Konwekcyjna wymiana ciepła występuje, gdy cząsteczki ciała przenoszącego ciepło zmieniają swoje położenie względem ciała oddającego lub pobierającego ciepło. Ten rodzaj wymiany ciepła jest typowy dla płynów (cieczy i gazy). Ruch poszczególnych cząsteczek może być wywołany w sposób naturalny w wyniku zmiany gęstości poszczególnych cząsteczek spowodowanej zmianą ich temperatury - konwekcja naturalna - lub sztuczny (np. wywołany za pomocą wentylatora lub pompy). - konwekcja wymuszona [1].

Gęstość strumienia przejmowanego ciepła określa prawo Newtona

$$q = \alpha(T_s - T_p) \quad (1)$$

Współczynnik przejmowania ciepła α jest funkcją wielu zmiennych tj. gęstość płynu, jego ciepła właściwego, współczynnika lepkości płynu, współczynnika przewodzenia ciepła płynu, prędkości i charakteru przepływu płynu oraz kształtu rozpatrywanej powierzchni wymiany ciepła [2].

Określenie współczynnika wnikania ciepła dla konwekcji sprowadza się najczęściej do określenia współczynnika wnikania ciepła, który w postaci bezwymiarowej przedstawia liczba Nusselta

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \quad (2)$$

Gdzie d to wymiar charakterystyczny. W przypadku omywania poziomego pręta wymiarem charakterystycznym jest jego średnica zewnętrzna. Z powyższego wzoru wynika, że liczba Nu wyraża stosunek szybkości wymiany ciepła w wyniku konwekcji do szybkości wymiany ciepła w wyniku przewodnictwa cieplnego. Liczbę Nusselta można wyrazić w zależności od innych liczb bezwymiarowych: Reynoldsa, Prandtla i Grashofa. W przypadku konwekcji swobodnej interesują nas jedynie: liczba Prandtla oraz liczba Grashofa [2].

Liczba Prandtla wyraża stosunek lepkości płynu do jego przewodnictwa cieplnego

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} \quad (3)$$

gdzie:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (4)$$

Liczba Grashofa wyraża stosunek siły wyporu do sił lepkości danego płynu

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot d^3 \cdot \beta \cdot (T_s - T_p)}{\nu^2} \quad (5)$$

gdzie współczynnik rozszerzalności objętościowej

$$\beta = \frac{1}{T_p} \quad (6)$$

3. Wyznaczanie współczynnika wnikania ciepła w przypadku konwekcji swobodnej wokół poziomego pręta na drodze teoretycznej

W celu wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła z zależności (2):

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \rightarrow \alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{d} \quad (7)$$

należy wcześniej obliczyć wartość liczby Nusselta. W przypadku konwekcji swobodnej dla opływu zewnętrznego poziomego pręta, równanie kryterialne przyjmuje następującą postać:

$$\text{Nu} = C \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^A \quad (8)$$

Wartość stałych A i C podano w tab. 1

Tab. 1 Wartości stałych A i C w równaniu kryterialnym konwekcji swobodnej [3]

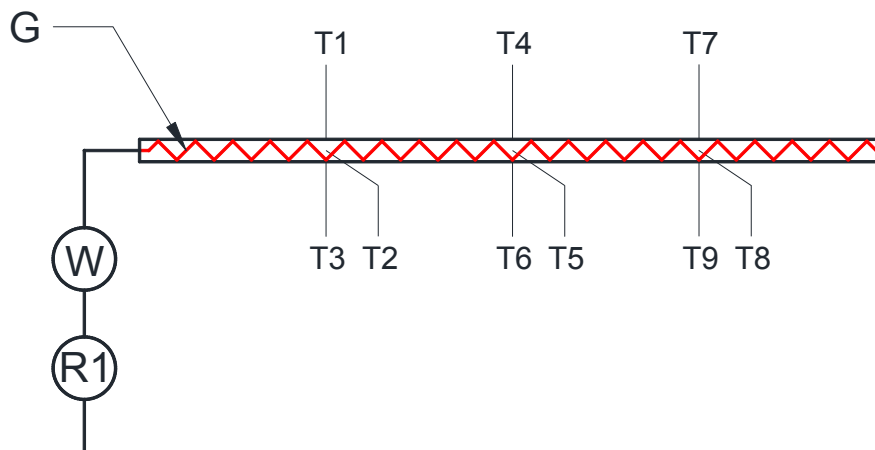
| Zakres wartości $\text{Gr} \cdot \text{Pr}$ | Stała C | Wykładnik A |
|---|-----------|---------------|
| $10^{-3} \div 5 \cdot 10^2$ | 1,18 | 0,125 |
| $5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$ | 0,54 | 0,25 |
| $2 \cdot 10^7 \div 10^{13}$ | 0,135 | 1/3 |

Należy tutaj pamiętać, że w zależnościach (5) i (7) dla przypadku konwekcji swobodnej wokół poziomego pręta wymiarem charakterystycznym jest średnica pręta d .

4. Wyznaczanie współczynnika wnikania ciepła w przypadku konwekcji swobodnej na drodze eksperymentalnej

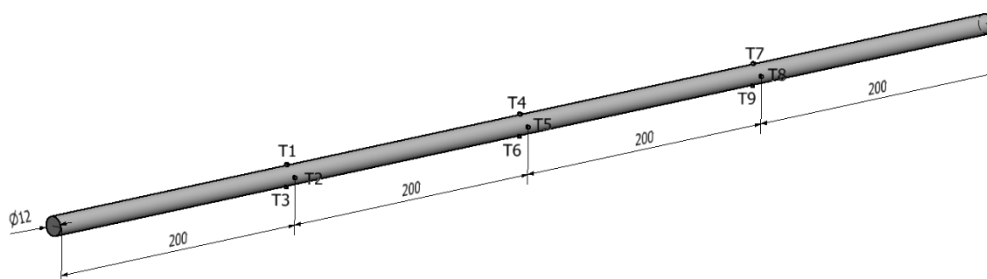
4.1. Stanowisko pomiarowe

Stanowisko pomiarowe zostało przedstawione schematycznie na rys. 1. Głównym jego elementem jest grzałka elektryczna G. Grzałka ma długość $l = 800$ mm i średnicę $d = 12$ mm. Moc grzałki reguluje się w sposób płynny za pomocą regulatora R1. Temperatura na powierzchni pręta jest mierzona za pomocą dziewięciu termoelementami typu T. Dokładne rozmieszczenie termoelementów na powierzchni grzałki przedstawia rys. 2.



Rys. 1 Schemat stanowiska pomiarowego

T1-T9 - pomiar temperatury, R1 - regulator mocy, W - pomiar mocy, G - grzałka.



Rys. 2 Rozmieszczenie termoelementów na powierzchni grzałki

4.2. Wykonanie pomiarów

Ponieważ stanowisko badawcze jest bardzo wrażliwe na warunki zewnętrzne należy zachować szczególną ostrożność, aby nie spowodować dodatkowej cyrkulacji powietrza (zamknięte okna i drzwi, nie przemieszczanie się w pobliżu stanowiska laboratoryjnego). Dodatkowy ruch powietrza w pobliżu układu pomiarowego uniemożliwi osiągnięcie stanu ustalonego, a samo zjawisko konwekcji swobodnej zmieni swój charakter na konwekcję częściowo wymuszoną.

Pomiar należy zakończyć, gdy nastąpi stan ustalony tj. temperatura nie będzie się zmieniać w czasie. W trakcie laboratorium należy wykonać trzy serie pomiarowe dla różnych temperatur powierzchni pręta grzejnego. Po każdej serii pomiarowej należy zapisać parametry powietrza panujące w laboratorium (t_a - temperatura, p_a - ciśnienie).

4.3. Opracowanie wyników pomiarów

W celu eksperymentalnego wyznaczenia współczynnika przejmowania ciepła od gorącego pręta do powietrza korzystając z zależności:

$$\alpha = \frac{q}{t_s - t_p} = \frac{\dot{Q}_g}{A(t_s - t_p)} \quad (9)$$

należy pamiętać, że w procesie wnikania ciepła z płynu do ścianki lub odwrotnie ciepło jest transportowane zarówno na drodze konwekcji jak i promieniowania. Dlatego współczynnik wnikania ciepła α jest sumą współczynnika wnikania ciepła dla konwekcji α_k i promieniowania α_r .

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_r \quad (10)$$

Powierzchnię wymiany ciepła A należy policzyć, jako powierzchnię boczną walca o wymiarach pręta grzejnego ($l = 800$ mm, $d = 12$ mm), ponieważ oba końce grzałki są izolowane cieplnie, a więc ciepło odprowadzane jest z niej do powietrza jedynie przez powierzchnię boczną.

Średnią temperaturę powierzchni pręta t_s należy obliczyć z zależności (11)

$$t_s = \frac{t_{sg} + 2t_{sb} + t_{sd}}{4} \quad (11)$$

gdzie średnia temperatura powierzchni górnej pręta wynosi $t_{sg} = \frac{t_1 + t_4 + t_7}{3}$, średnia temperatura powierzchni bocznej pręta $t_{sb} = \frac{t_2 + t_5 + t_8}{3}$, a temperatura powierzchni dolnej pręta $t_{sd} = \frac{t_3 + t_6 + t_9}{3}$.

Kolejnym krokiem jest obliczenie współczynnika wnikania ciepła przy promieniowaniu α_r . W tym, celu należy przyrównać ze sobą równanie opisujące strumień ciepła przekazywany na drodze promieniowania

$$\dot{Q}_r = A \cdot \varepsilon_{s-so} \cdot C_0 \left(\left(\frac{T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{so}}{100} \right)^4 \right) \quad (12)$$

z zależnością

$$\dot{Q}_r = A \cdot \alpha_r \cdot (T_s - T_p) \quad (13)$$

która również jest prawdziwa, ponieważ powierzchnia pręta omywana jest przez płyn. Z porównania tych zależności otrzymujemy wzór z którego wyliczymy współczynnik wnikania ciepła dla promieniowania α_r

$$\alpha_r = \varepsilon_{s-so} \cdot C_0 \frac{\left(\left(\frac{T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{so}}{100} \right)^4 \right)}{(T_s - T_p)} \quad (14)$$

gdzie zastępczą zdolność emisji między ścianką pręta, a ścianami otaczającymi pręt (ściany pomieszczenia) oblicza się z zależności (15) zwanej wzorem Christiansena

$$\varepsilon_{s-so} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_s} + \frac{A}{A_{so}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{so}} - 1 \right)} \quad (15)$$

Ponieważ stosunek powierzchni pręta do powierzchni ścian otaczających $A/A_{so} \approx 0$ to ostatecznie otrzymujemy $\varepsilon_{s-so} = \varepsilon_s$, więc zależność (14) przyjmuje postać

$$\alpha_r = \varepsilon_s \cdot C_0 \frac{\left(\left(\frac{T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{so}}{100} \right)^4 \right)}{(T_s - T_p)} \quad (16)$$

Do obliczeń przyjmując emisyjność powierzchni pręta $\varepsilon_s = 0,2$.

Teraz znając współczynnik wnikania ciepła dla promieniowania α_r oraz sumaryczny współczynnik wnikania ciepła α obliczony z zależności (9) można korzystając z zależności (10) obliczyć współczynnik wnikania ciepła dla konwekcji α_k .

5. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

- Cel ćwiczenia;
- Schemat stanowiska pomiarowego;
- Zestawienie wyników pomiarów;
- Przedstawienie toku obliczeń z przykładowymi podstawieniami do wzorów;
- Zestawienie w formie tabelarycznej uzyskanych wartości konwekcyjnego współczynników wnikania ciepła α_k przy użyciu wzorów kryterialnych i pomiarów;
- Wykres zależności konwekcyjnego współczynnika wnikania ciepła α_k uzyskanego przy użyciu wzorów kryterialnych i pomiarów w funkcji różnicy temperatury powierzchni pręta i powietrza $\alpha_k = f(\Delta T)$;
- Uwagi i wnioski.

6. Literatura

- [1] Krystyna Krygier, Tomasz Klinke, Jerzy Sewerynik „Ogrzewnictwo, wentylacja, klimatyzacja” Warszawa : Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, 2000
- [2] Stefan Wiśniewski, Tomasz S. Wiśniewski „Wymiana ciepła” Warszawa : Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2000
- [3] Jan Szargut „Termodynamika” Warszawa : Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa, 2000
- [4] Hobler Tadeusz "Ruch ciepła i wymienniki"
- [5] Pudlik Wiesław "Wymiana i wymienniki ciepła"

Załącznik 1 - Właściwości powietrza suchego przy ciśnieniu atmosferycznym

Tab. 2 Właściwości powietrza suchego przy ciśnieniu atmosferycznym [4, 5]

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ | $c_p, \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ | $\lambda, \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ | $\mu, \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$ | $\nu, \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ |
|---------------------|--------------------------------------|--|---|--|------------------------------------|
| -50 | 1,534 | 1013,2 | 0,02030 | 0,000014612 | 0,00000923 |
| -20 | 1,365 | 1009,0 | 0,02250 | 0,000016279 | 0,00001161 |
| 0 | 1,252 | 1009,0 | 0,02366 | 0,000017168 | 0,00001328 |
| 10 | 1,206 | 1009,0 | 0,02448 | 0,000017751 | 0,00001416 |
| 20 | 1,164 | 1013,2 | 0,02517 | 0,000018224 | 0,00001506 |
| 30 | 1,127 | 1013,2 | 0,02575 | 0,000018668 | 0,00001600 |
| 40 | 1,092 | 1013,2 | 0,02645 | 0,000019224 | 0,00001696 |
| 50 | 1,056 | 1017,4 | 0,02714 | 0,000019613 | 0,00001795 |
| 60 | 1,025 | 1017,4 | 0,02796 | 0,000020113 | 0,00001897 |
| 70 | 0,996 | 1017,4 | 0,02854 | 0,000020390 | 0,00002002 |
| 80 | 0,968 | 1021,6 | 0,02923 | 0,000020974 | 0,00002109 |
| 90 | 0,942 | 1021,6 | 0,02993 | 0,000021585 | 0,00002210 |
| 100 | 0,916 | 1021,6 | 0,03062 | 0,000021779 | 0,00002313 |
| 120 | 0,870 | 1025,8 | 0,03190 | 0,000022751 | 0,00002545 |
| 140 | 0,827 | 1025,8 | 0,03318 | 0,000023530 | 0,00002780 |
| 160 | 0,789 | 1029,9 | 0,03434 | 0,000024113 | 0,00003009 |
| 180 | 0,755 | 1034,1 | 0,03561 | 0,000025002 | 0,00003249 |
| 200 | 0,723 | 1034,1 | 0,03689 | 0,000025891 | 0,00003485 |