

Pomiar współczynnika przejmowania ciepła

Celem ćwiczenia jest identyfikacja współczynnika przejmowania ciepła metodą quasi-statyczną z wykorzystaniem próbki o znanej przewodności cieplnej.

1. WSTĘP TEORETYCZNY

Pomiar współczynnika przejmowania ciepła dotyczy badań doświadczalnych wymiany ciepła, w której strumień ogrzanego powietrza uderza prostopadle w powierzchnię czołową cylindrycznej próbki wykonanej z materiału o znanej przewodności cieplnej. Ukierunkowany strumień płynu lub gazu może efektywnie przesyłać duże ilości energii na sposób ciepła pomiędzy powierzchnią a otaczającym ją płynem.

1.1 PRZEWODZENIE CIEPŁA

Przewodzenie ciepła polega na przekazywaniu energii wewnętrznej między bezpośrednio kontaktującymi się częściami jednego lub różnych ciał. Przewodzenie ciepła występuje zarówno w cieczech, ciałach stałych i gazach. Podstawowym mechanizmem przewodzenia ciepła w ciałach stałych są skwantowane drgania sieci krystalicznej oraz uporządkowany ruch swobodnych elektronów (metale i stopy metali). Natomiast w cieczech i gazach mechanizm przewodzenia ciepła wiąże się z przekazywaniem energii kinetycznej podczas zderzeń cząsteczek ośrodka.

Przewodzenie ciepła łączy się z prawem Fouriera:

Prawo Fouriera - gęstość przewodzonego strumienia ciepła jest wprost proporcjonalna do gradientu temperatury:

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}T \quad (1)$$

W układzie kartezjańskim $Oxyz$:

$$\text{grad}T = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \quad (2)$$

czyli

$$\vec{q} = q_x \vec{i} + q_y \vec{j} + q_z \vec{k} = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \right) \quad (3)$$

natomiast w przypadku jednowymiarowym:

$$\dot{q} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

Współczynnik λ występujący we wzorze (1), (3) oraz (4) jest współczynnikiem proporcjonalności, charakteryzującym zdolność badanego ośrodka do przewodzenia ciepła w warunkach ustalonej wymiany ciepła. Współczynnik ten nosi nazwę *współczynnika przewodzenia ciepła* bądź określany jest jako *przewodność cieplna*.

1.2 KONWEKCJA

Konwekcja jest to rodzaj wymiany ciepła pomiędzy ciałem stałym a omywającym je płynem. Polega na przenoszeniu energii wewnętrznej wskutek ruchu makroskopowych części płynu o różnych temperaturach, a zatem i różnych gęstościach.

W przypadku działania sił masowych na części płynu o różnych temperaturach mamy do czynienia z konwekcją swobodną. Natomiast w momencie ruchu płynu wywołanego przez czynniki zewnętrzne tj. urządzenia wentylacyjne, pompy, sprężarki bądź wiatr zajmujemy się konwekcją wymuszoną.

Ilość wymienianego ciepła podczas tego rodzaju wymiany ciepła zależy od różnicy temperatury. Określa je prawo Newtona:

$$\dot{q} = \alpha(T_s - T_p) \quad (5)$$

gdzie: α - współczynnik przejmowania ciepła $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$,

T_s - temperatura ścianki $[K]$,

T_p - temperatura płynu $[K]$.

Zapisując równanie (5) w postaci:

$$\dot{q} = \frac{(T_s - T_p)}{\frac{1}{\alpha}} \quad (6)$$

oraz znając pole powierzchni A możemy określić opór cieplny przejmowania ciepła dla ścianki płaskiej jako:

$$R_\alpha = \frac{1}{A\alpha} \quad (7)$$

Dla ścianki cylindrycznej opór cieplny przejmowania ciepła ma postać:

$$R_\alpha = \frac{1}{2\pi r l \alpha} \quad (8)$$

W przypadku wymiany ciepła zachodzącej między płynami rozdzielonymi ścianką ciała stałego mówimy o *przenikaniu ciepła*. Zjawisko to obejmuje przejmowanie ciepła na obydwu powierzchniach ścianki oraz przewodzenie ciepła przez ściankę ciała stałego.

Opór właściwy przenikania ciepła przez ściankę płaską wielowarstwową opisuje równanie (9), natomiast przez wielowarstwową ściankę cylindryczną równanie (10).

$$r_{kp} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (9)$$

$$r_{kp} = \frac{1}{2\pi r_1 \alpha_1} + \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} + \frac{1}{2\pi r_2 \alpha_2} \quad (10)$$

Wprowadzając współczynnik przenikania ciepła k , gęstość strumienia ciepła przenikającego przez ściankę można opisać za pomocą *prawa Pecleta*, które stanowi podstawę opisu zjawiska przenikania ciepła:

$$q = k(T_{p1} - T_{p2}) \quad (11)$$

gdzie: k – współczynnik przenikania ciepła,

T_{p1} – temperatura płynu na wejściu,

T_{p2} – temperatura płynu na wyjściu.

Współczynnik przenikania ciepła dla ścianki płaskiej wielowarstwowej wyraża się wzorem:

$$k = \frac{1}{r_{kp}} = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1} \quad (12)$$

natomiast dla ścianki cylindrycznej wielowarstwowej:

$$k = \frac{1}{r_{kp}} = \left(\frac{1}{2\pi r_1 \alpha_1} + \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} + \frac{1}{2\pi r_2 \alpha_2} \right)^{-1} \quad (13)$$

1.3 PROMIENIOWANIE CIEPLNE

Promieniowanie cieplne polega na wysyłaniu fal elektromagnetycznych przez ciała o temperaturze wyższej od temperatury zera bezwzględnego. Zachodzi między ciałami rozdzielonymi ośrodkiem przenikliwym dla promieniowania termicznego lub nawet próżnią. Podczas wymiany ciepła na drodze promieniowania energia wewnętrzna ciała zmienia się w energię promieniowania elektromagnetycznego, która po napotkaniu przeszkody w postaci innego ciała lub części tego samego ciała jest przez nie pochłaniana i przekształcana w energię wewnętrzną.

Do określenia fali elektromagnetycznej korzystamy z pojęcia długości fali λ lub częstotliwości ν , oraz prędkości rozchodzenia się światła c . Związek między tymi parametrami jest następujący:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (14)$$

Promieniowanie termiczne może występować przy wybranych długościach fal z zakresu od 0 do ∞ . Zajmując się wymianą ciepłą najistotniejszy jest zakres długości fali $0,4 \div 1000 \mu\text{m}$, w którym:

- 1) $0,38 \div 0,78 \mu\text{m}$ – zakres fal świetlnych,
- 2) $0,78 \div 2,5 \mu\text{m}$ – zakres bliskiej podczerwieni,
- 3) $2,5 \div 25 \mu\text{m}$ – zakres średniej podczerwieni,
- 4) $25 \div 1000 \mu\text{m}$ – zakres dalekiej podczerwieni.

Za czynnik klasyfikujący można również przyjąć częstotliwość promieniowania:

- 1) promieniowanie monochromatyczne – obejmuje zakres jednej częstotliwości promieniowania,
- 2) promieniowanie panchromatyczne – obejmuje zakres wszystkich częstotliwości promieniowania,
- 3) promieniowanie selektywne – obejmuje zakres określonego pasma częstotliwości promieniowania.

Promieniowanie cieplne padając na powierzchnię ciała zostaje częściowo zabsorbowane (a - wsp. absorpcji), odbite (r - wsp. odbicia) oraz może być częściowo przepuszczone (p - wsp. transmisji). Suma tych współczynników wynosi:

$$a + r + p = 1 \quad (15)$$

Strumień energii promieniowania własnego we wszystkich kierunkach oznaczamy $\dot{E}$ i jest nazywany *strumieniem emisji*. Strumień emisji odniesiony do pola powierzchni emitującej promieniowanie to *gęstość strumienia emisji*, którą wyrażamy wzorem:

$$e = \frac{dE}{dA} \quad (16)$$

Gęstość strumienia emisji powierzchni ciała doskonale czarnego wyraża wzór Plancka:

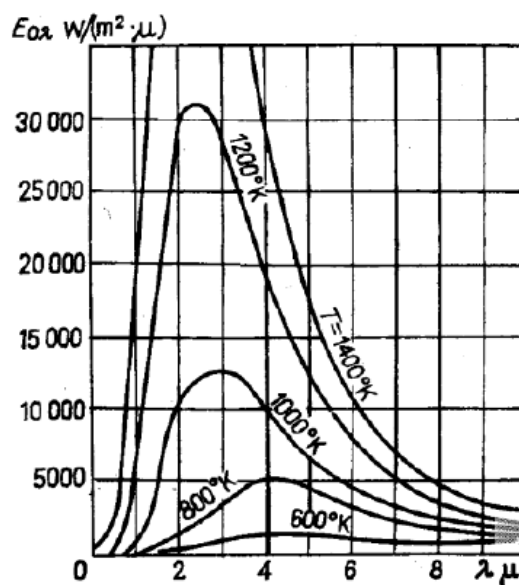
$$e_{\lambda c} = \frac{2\pi h c_0^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc_0}{k\lambda T}\right) - 1 \right]} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (17)$$

gdzie: $h = 6,6256 \cdot 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}]$ – stała Plancka,

$k = 1,3805 \cdot 10^{-23} [\frac{\text{J}}{\text{K}}]$ – stała Boltzmanna,

$C_1 = 2\pi h c_0^2 = 3,74 \cdot 10^{-16} [\text{Wm}^2]$ – pierwsza stała Plancka,

$C_2 = \frac{hc_0}{k} = 14388 [\mu\text{m} \cdot \text{K}]$ – druga stała Plancka.



Rys. 1.1 Zależność gęstości strumienia emisji monochromatycznej ciała doskonale czarnego od długości fali i temperatury

Maksimum gęstości strumienia emisji monochromatycznej ciała doskonale czarnego (rys. 1.1) osiągane jest wtedy, gdy spełniony jest warunek, zwany prawem Wiena:

$$\lambda_m T = C_4 = 2897,6 [\mu\text{m} \cdot \text{K}] \quad (18)$$

Po wstawieniu λ_m do wzoru (17) maksimum to wynosi:

$$e_{\lambda m} = C_5 T^5 \quad (19)$$

gdzie: $C_5 = 1,286 \cdot 10^{-5} [\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^5}]$.

Całkując wzór Plancka (17) w całym zakresie długości fal od 0 do ∞ otrzymuje się wzór określający prawo Stefana–Boltzmann’a:

$$e_c = \sigma T^4 \quad (20)$$

Gdzie: $\sigma = 5,6693 \cdot 10^{-8} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \right]$ – stała Boltzmann’a.

Wzór (20) pozwala określić gęstość strumienia emisji panchromatycznej ciała doskonale czarnego.

1.4 PRZEJMOWANIE CIEPŁA

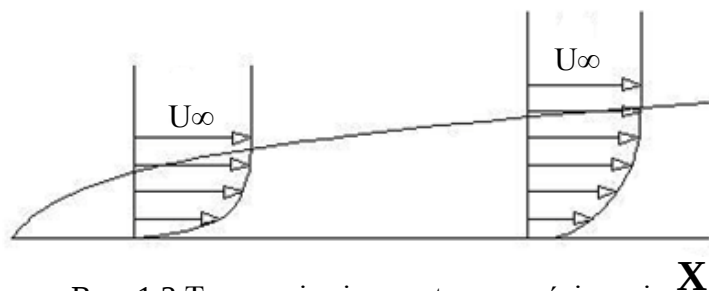
Przejmowanie ciepła jest to wymiana ciepła zachodząca pomiędzy powierzchnią ciała stałego a opływającym ją płynem. Wymianę ciepła przez przejmowanie określa prawo Newtona (5).

Współczynnik przejmowania ciepła α staje się kluczowym parametrem w momencie, gdy chcemy oszacować gęstość strumienia ciepła q przejmowanego od płynu o danej temperaturze do powierzchni ciała stałego o innej temperaturze.

Wzór (5) jest bardzo trudny do opisanie właśnie ze względu na współczynnik przejmowania ciepła, który jest funkcją wielu zmiennych. Zależy on między innymi od:

- prędkości przepływu,
- charakteru przepływu (laminarny, przejściowy, turbulentny),
- kształtu powierzchni wymiany ciepła,
- własności termofizyczne płynu (gęstość, ciepło właściwe, współczynnik lepkości, współczynnik przewodzenia ciepła).

Przy opływie ciała stałego przez płyn, w pobliżu jego ścianki, ujawnia się wpływ lepkości na przepływ. Przejawia się to różnicami prędkości przepływu w otoczeniu ścianki ciała stałego. Prędkość rośnie w miarę oddalania się od powierzchni ścianki aż do wartości charakteryzującej przepływ całej masy płynu. Warstwa płynu będąca w bezpośredniej bliskości ścianki, w której występują znaczne prędkości, nosi nazwę *warstwy przyściennej*.

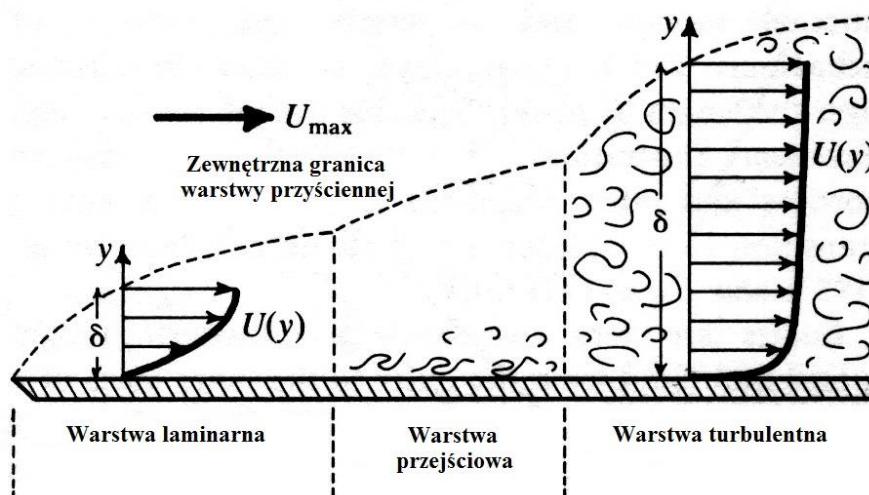


Rys. 1.2 Tworzenie się warstwy przyściennej

Na rysunku 1.2 zilustrowany został proces tworzenia się warstwy przyściennej na płycie płaskiej, wzdłuż której przepływa strumień płynu. Prędkość płynu zmienia się od wartości równej 0 do wartości U_∞ , w dużej odległości od powierzchni. Na rysunku widać profile płynu w różnych przekrojach strumienia nad płytą. Świadczy to o wzroście grubości warstwy przyściennej wzdłuż płyty.

Jak wcześniej wspomniano, współczynnik przejmowania ciepła jest funkcją wielu zmiennych. Bardzo istotnym czynnikiem jest charakter przepływu płynu. Przepływ może być *laminarny* (uwarstwiony), jeżeli tory poruszających się cząstek płynu są równoległe oraz *turbulentny* (burzliwy),

gdy cząstki płynu poruszają się po torach wzajemnie przecinających się, czyli wykazują obok prędkości ruchu głównego, także ruchy poboczne o składowych prędkości prostopadłych do kierunku ruchu głównego. Przejście z ruchu laminarnego w burzliwy następuje wówczas, gdy prędkość przepływu przekroczy wartość, tzw. krytycznej liczby Reynoldsa.



Rys. 1.3 Rozkład prędkości w warstwie przyściennej

Temperaturę odniesienia T_{od} wyszczególniamy dla płynu i ścianki kanału.

W przypadku płynu za temperaturę T_{od} przyjmuje się średnią arytmetyczną ekstremalnych średnich temperatur płynu $T_{p,śr}$, natomiast w przypadku ścianki będzie to średnia arytmetyczna ekstremalnych średnich temperatur ścianki kanału $T_{s,śr}$.

Średnia temperatura płynu w poprzecznym przekroju kanału przepływowego wyliczana jest z porównania dwójako obliczonej entalpii płynu:

$$\int_A \rho c_p w T dA = T_{śr} \int_A \rho c_p w dA \Rightarrow T_{śr} = \frac{\int_A \rho c_p w T dA}{\int_A \rho c_p w dA} \quad (21)$$

Temperatura odniesienia T_{od} ma postać:

$$T_{od} = \frac{1}{2} (T_{p,śr} + T_{s,śr}) \quad (22)$$

i jest równa średniej arytmetycznej ze średniej temperatury płynu i średniej temperatury ścianki. Jest funkcją temperatur T_p i T_s , która dla dużych prędkości przepływu gazów przyjmuje postać:

$$T_{od} = T_{\infty} + \frac{1}{2} (T_s - T_{\infty}) + 0,22 (T_r - T_{\infty}) \quad (23)$$

gdzie: T_{∞} - temperatura spoczynkowa płynu poza warstwą przyścienną [K],

T_s - temperatura powierzchni ścianki [K],

T_r - temperatura ścianki adiabatycznej [K].

Temperatura ścianki adiabatycznej obliczana jest ze wzoru:

$$T_r = T_\infty * \left(1 + r \frac{\kappa - 1}{2} Ma^2\right) \quad (24)$$

gdzie: Ma – liczba Macha,

$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ – wykładnik izentropy,

r – współczynnik odzyskania temperatury.

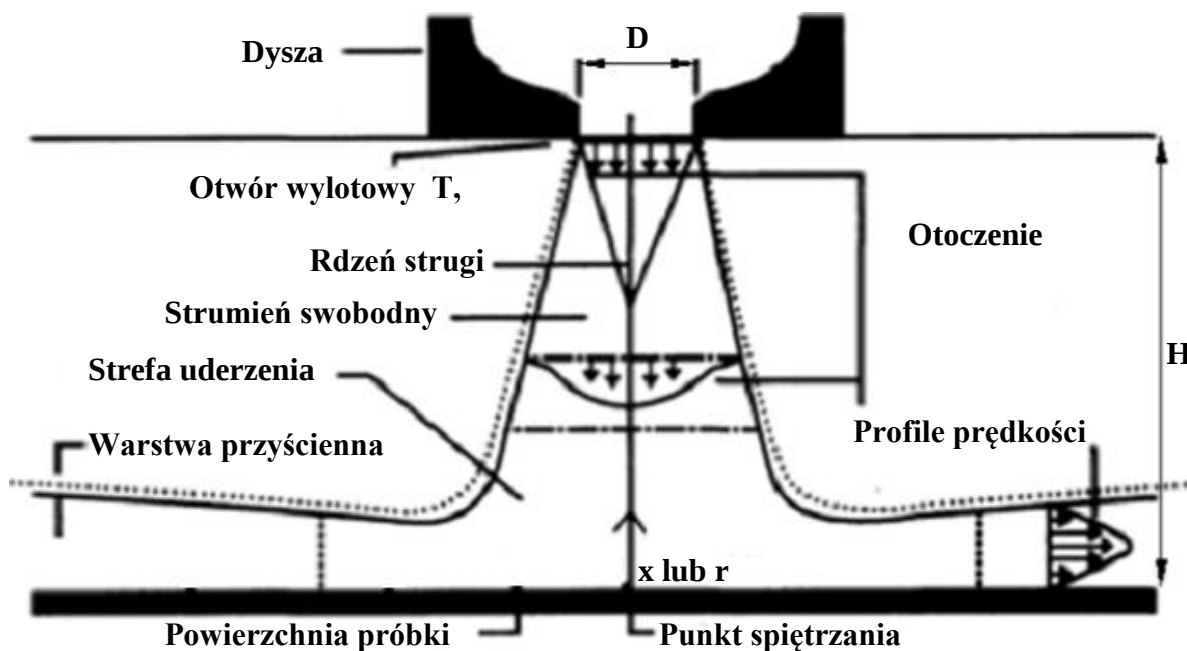
Współczynnik odzyskania temperatury r w zakresie liczb Prandtla od 0,5 do 5 wynosi:

$$\text{dla laminarnej warstwy przyściennej } r = \sqrt{Pr_{(T_{od})}} \quad (25a)$$

$$\text{dla turbulentnej warstwy przyściennej } r = \sqrt[3]{Pr_{(T_{od})}} \quad (25b)$$

2. TEORETYCZNE WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA PRZEJMOWANIA CIEPŁA

Stanowiska laboratoryjne pozwala na badanie współczynnika przejmowania ciepła w przypadku prostopadłego uderzenia strumienia powietrza w powierzchnię próbki (rys. 2.1). Metodyka obliczeń została opracowana zgodnie z [2].



Rys. 2.1 Prostopadłe uderzenie strumienia powietrza w powierzchnię

Aby wyznaczyć teoretyczny współczynnik przejmowania ciepła należy zastosować ogólną zależność wykorzystującą liczbę Nusselta:

$$\overline{Nu} = \frac{\alpha D}{\lambda} \quad (26)$$

Liczbę Nusselta oblicza się na drodze teoretycznej bądź eksperymentalnej wykorzystując znajomość liczb podobieństwa. Średnią liczbę Nusselta można uzyskać przez całkowanie lokalnych

wartości liczby Nusselta na odpowiednim obszarze powierzchni uderzenia strumienia powietrza. Powstałe korelacje przedstawione są w następującej formie:

$$\overline{Nu} = f(Re, Pr, A_r, \frac{H}{D}) \quad (27)$$

gdzie: $D = 0,005$ [m] – średnica dyszy wylotowej,

H – odległość dyszy od powierzchni próbki [m],

Zgodnie z [12] wartość A_r wyraża się wzorem:

$$A_r = \frac{D^2}{4r^2} \quad (28)$$

gdzie: r – promień powierzchni próbki.

W celu wyznaczenia liczby Reynoldsa i liczby Prandtla należy określić temperaturę odniesienia i odczytać z tablic [3] odpowiednie wartości parametrów termofizycznych suchego powietrza. Jako temperaturę odniesienia przyjmuje się średnią arytmetyczną z temperatury powietrza mierzonej przed powierzchnią próbki i z temperatury powierzchni próbki. Mając odpowiednie wartości z tablic liczbę Reynoldsa oblicza się ze wzoru:

$$Re = \frac{vD}{\nu} \quad (29)$$

gdzie: v – prędkość strumienia powietrza $\left[\frac{m}{s}\right]$,

ν – lepkość kinematyczna powietrza $\left[\frac{m^2}{s}\right]$.

Prędkość strumienia powietrza dla odpowiedniego stopnia regulacji prędkości w stacji na gorące powietrze należy odczytać z tabeli 2.1

Tabela 2.1 Prędkość strumienia powietrza dla dyszy wylotowej oddalonej o 50mm od próbki

Stopień regulacji strumienia	Odległość 50mm
1	3.1 m/s
2	3.3 m/s
3	3.5 m/s
4	3.7 m/s
5	4.2 m/s
6	4.8 m/s
7	5.3 m/s
8	5.6 m/s

W celu określenia liczby Nusselta stosuje się następujący wzór korelacyjny:

$$\frac{\overline{Nu}}{Pr^{0,42}} = G \left(A_r, \frac{H}{D} \right) \left[2Re^{1/2} (1 + 0,005Re^{0,55})^{1/2} \right] \quad (30)$$

gdzie:

$$G = 2A_r^{1/2} \frac{1 - 2,2A_r^{1/2}}{1 + 0,2\left(\frac{H}{D} - 6\right)A_r^{1/2}} \quad (31)$$

3. DOŚWIADCZALNE WYZNACZANIE WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA PRZEJMOWANIA CIEPA

Przyrównując wzory Fouriera (1) oraz Newtona (5) otrzymujemy wyrażenie na doświadczalne obliczanie wartości współczynnika przejmowania ciepła:

$$\alpha = \frac{\lambda(T_1 - T_2)}{\delta(T_3 - T_1)} \quad (32)$$

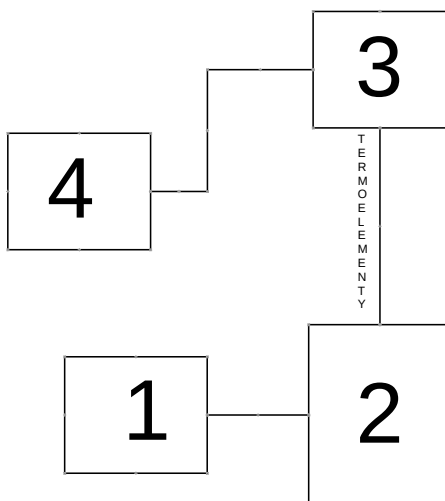
gdzie: $\delta = 0,02$ [m] – wysokość próbki.

Współczynnik przewodzenia ciepła dla stali 1H18N9T należy przyjąć: $\lambda = 14,5$ $\left[\frac{\text{W}}{\text{mK}}\right]$.

4. STANOWISKO LABORATORYJNE

Stanowisko do badania współczynnika przejmowania ciepła (rys. 4.1) składa się z:

- 1) układu wymuszenia przepływu strugi powietrza (rys. 1, p. 1),
- 2) próbki w kształcie walca ze stali nierdzewnej 1H18N9T (rys. 1, p. 2),
- 3) układu akwizycji danych pomiarowych firmy National Instruments (rys. 1, p. 3),
- 4) komputera z oprogramowaniem LabVIEW SignalExpress do odczytu danych (rys. 1, p. 4),
- 5) dwóch termoelementów płaszczykowych typu K o średnicy zewnętrznej płaszcza 0,5mm,
- 6) dwóch termoelementów typu K o średnicy termoelektrod 0,05mm.



Rys. 4.1 Schemat blokowy aparatury pomiarowej

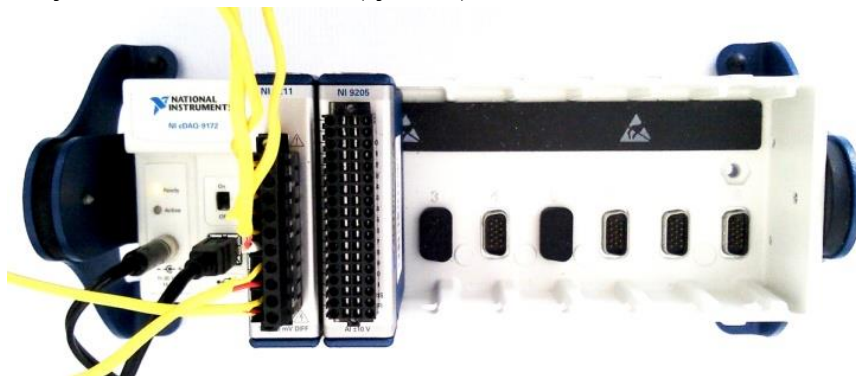
Źródłem wymuszenia przepływu strugi powietrza jest stacja lutowicza HOT-AIR BK-858D (rys. 4.2). Posiada ona możliwość płynnej regulacji strumienia powietrza do $120 \left[\frac{\text{l}}{\text{min}}\right]$ oraz regulacji temperatury od $100[^\circ\text{C}]$ do $450[^\circ\text{C}]$. Urządzenie posiada system antystatyczny zapobiegający uszkodzeniu ogrzewanych elementów. Zainstalowana dysza ma średnicę wewnętrzną 5mm.

Badana próbka to walec wykonany ze stali nierdzewnej 1H18N9T o wymiarach:

- 1) promień podstawy: 20mm,
- 2) wysokość: 20mm.

Do badanej próbki przyspawano dwa termoelementy typu K, które służą do pomiaru temperatury na obydwu powierzchniach czołowych próbki. Temperatura w otoczeniu próbki jest mierzona za pomocą dodatkowych dwóch termoelementów płaszczykowych typu K, umieszczonych przed i za próbką.

Pomiar temperatury odbywa się za pomocą wyposażenia stanowiska pomiarowego w moduł akwizycji danych firmy National Instruments (rys. 4.3).



Rys. 4.3 Moduł akwizycji danych firmy National Instruments

Moduł Ni cDAQ – 9172 pozwala zamontować osiem różnych kart pomiarowych. Do pomiaru temperatury zamontowano specjalną kartę pomiarową Ni – 9211. Posiada ona cztery przewody ze specjalnymi końcówkami umożliwiającymi podłączenie termoelementów zlokalizowanych przy badanej próbce. Cztery termoelementy mierzą następujące wartości temperatury:

- 1) temperatura T_1 próbki od strony źródła przepływu strugi powietrza,
- 2) temperatura T_2 próbki na tylnej powierzchni,
- 3) temperatura T_3 otoczenia próbki od strony przepływu strugi powietrza (przed próbką),
- 4) temperatura T_4 otoczenia próbki za jej tylną powierzchnią.

Moduł Ni cDAQ – 9172 należy podłączyć do sieci elektrycznej za pomocą zasilacza. Za pomocą przewodu USB podłączono moduł z komputerem wyposażonym w środowisko wirtualnych przyrządów pomiarowych National Instruments.

Informacje zebrane przed moduł Ni cDAQ – 9172 są przesyłane do komputera. Oprogramowanie wykorzystywane do odczytu danych to LabVIEW SignalExpress.

5. PRZEBIEG ĆWICZENIA

1. Złączyć końcówki termoelementów w kolejności:

- T_1 - temperatura próbki od strony źródła strugi powietrza,
- T_2 - temperatura próbki od strony tylnej próbki,
- T_3 - temperatura otoczenia próbki od strony wejścia strugi powietrza (przed próbką),
- T_4 - temperatura otoczenia próbki od strony tylnej próbki (za próbką).

2. Uruchomić program LabVIEW SignalExpress

3. Wprowadzić następujące dane sterujące:

Rodzaj termoelementów (ang. *termocouple type*): K (dla wszystkich)

Częstotliwość pomiaru (ang. *sample period*): 1s

4. Wykonać serie pomiarów:

Seria nr 1: ustawić temperaturę w stacji na 100°C, odmierzyć odległość dyszy wylotowej od próbki na 50mm, regulować pokrętkiem w stacji prędkość przepływu strumienia powietrza (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8),



LABORATORIUM TERMODYNAMIKI

Opracował: J. Zmywaczyk, P. Koniorczyk, M. Łysanowicz

Seria nr 2: ustawić pokrętko regulacji prędkości przepływu strumienia powietrza na stopień 1., odmierzyć odległość dyszy wylotowej od próbki na 50mm, regulować temperaturę w stacji. (100°C, 150°C, 200°C),

Seria nr 3: ustawić temperaturę w stacji na 100°C, ustawić pokrętko regulacji prędkości przepływu strumienia powietrza na stopień 1., regulować odległość dyszy wylotowej od próbki (50mm, 40mm, 30mm, 20mm, 10mm).

6. Korzystając z rozdziałów 2. i 3. wyznaczyć odpowiednio:

- teoretyczną wartość współczynnika przejmowania ciepła α_t ,
- doświadczalną wartość współczynnika przejmowania ciepła α_p .

6. PYTANIA KONTROLNE

1. Opisać metodykę wyznaczania teoretycznego współczynnika przejmowania ciepła,
2. Jak wyznaczyć wartość współczynnika przejmowania ciepła z pomiarów,
3. Co rozumiesz pod pojęciem ustalonej/nieustalonej wymiany ciepła,
4. Opisać podstawowe rodzaje wymiany ciepła,
5. Wyjaśnić pojęcie oporu cieplnego przewodzenia,
6. Wyjaśnić zjawisko przenikania ciepła.

LITERATURA

- [1] Wiśniewski S.: *Wymiana ciepła*, PWN Warszawa 1979.
- [2] Martin H., *Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces*. Academic Press, New York, 1977.
- [3] http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html