

Ćwiczenie 1:

WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA WNIKANIA CIEPŁA PODCZAS KONWEKCJI WYMUSZONEJ GAZU W RURZE

1. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest eksperymentalne wyznaczenie współczynnika wnikania ciepła podczas burzliwej konwekcji wymuszonej gazu w rurze oraz ocena wpływu prędkości przepływu gazu na wartość tego współczynnika.

2. WIADOMOŚCI WPROWADZAJĄCE

Wnikanie ciepła to proces jego przepływu pomiędzy ciałem a otaczającym go płynem, składający się z konwekcyjnego ruchu ciepła w rdzeniu płynu i przewodzenia ciepła przez warstwę przyścienną.

Konwekcyjny ruch ciepła może odbywać się podczas uwarstwionego, przejściowego i burzliwego przepływu płynu. Charakter ruchu płynu wynika z wartości liczby Reynoldsa

$$Re = \frac{w d \rho}{\eta}, \quad (1)$$

gdzie: w - średnia prędkość przepływu płynu, m/s;

d - średnica kanału, m;

ρ - gęstość płynu, kg/m³;

η - współczynnik dynamiczny lepkości płynu, Pa·s.

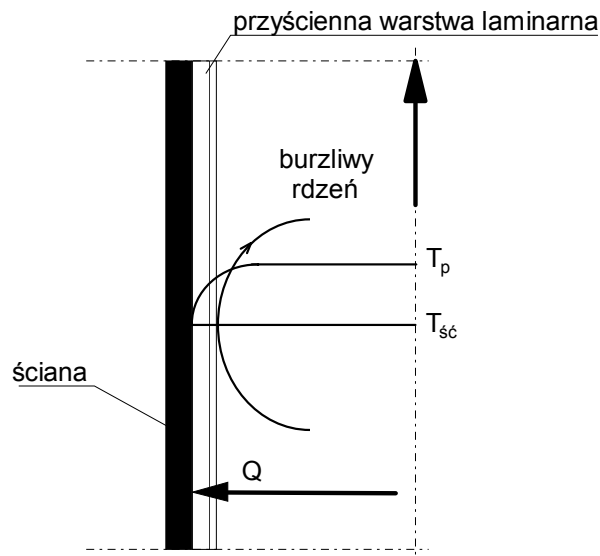
Jeżeli przepływ (konwekcja) płynu odbywa się pod wpływem czynników wymuszających (np. przy zastosowaniu wentylatora lub pompy), to tego rodzaju konwekcję określa się mianem wymuszonej. Przepływ uwarstwiony ma miejsce gdy $Re < 2100$, przepływ przejściowy występuje dla $2100 < Re < 10000$, a w pełni rozwinięty przepływ burzliwy przy $Re > 10000$.

Ruch ciepła pomiędzy warstwami płynu związany jest z ich różną temperaturą. Na rys. 1 przedstawiono rozkład temperatury wewnątrz płynu będącego w kontakcie z chłodniejszą od niego ścianą. Strumień ciepła

przenoszonego na drodze wnikania od rdzenia płynu do powierzchni ściany, można w tym przypadku przestawić w postaci równania

$$Q = \alpha F \Delta T = \alpha F (T_p - T_{śc}) \quad (2)$$

w którym: Q - strumień ciepła, W;
 F - powierzchnia ściany, m²;
 T_p - temperatura rdzenia płynu, K;
 $T_{śc}$ - temperatura powierzchni ściany, K;
 α - współczynnik wnikania ciepła, W/(m²·K).



Rys. 1. Rozkład temperatury w płynie będącym w kontakcie z chłodniejszą ścianą.

Występujący w równaniu (2) współczynnik wnikania ciepła, określa liczbowo strumień ciepła przepływającego w jednostce czasu pomiędzy płynem a ścianą o jednostkowej powierzchni i przy jednostkowej różnicy temperatury na drodze ruchu ciepła. Wartość współczynnika wnikania ciepła podczas konwekcji wymuszonej zależy m.in. od takich parametrów jak:

- właściwości fizyczne płynu (gęstość, lepkość, ciepło właściwe, współczynnik przewodzenia ciepła);
- prędkość ruchu płynu względem ściany (charakter przepływu płynu);
- rodzaj i stan powierzchni ściany (jej chropowatość).

Literatura, np. [1], podaje szacunkowe wartości współczynników wnikania ciepła dla typowych przypadków występujących w praktyce. Jednak dla ścisłego

określenia ich wartości, niezbędnych w obliczeniach konstrukcyjnych aparatów do przekazywania ciepła, należy wykorzystywać metody analityczne lub wręcz eksperymentalne, dotyczące danego przypadku wnikania.

Dla konwekcji wymuszonej podczas przepływu płynu przez rurociąg, istnieje wiele propozycji równań opisujących proces wnikania ciepła. Równania te budowane są zwykle w postaci bezwymiarowej, z wykorzystaniem następujących bezwymiarowych liczb podobieństwa:

- liczby Reynoldsa, określonej równaniem (1),
- liczby Prandtla

$$Pr = \frac{c_p \eta}{\lambda}, \quad (3)$$

- liczby podobieństwa geometrycznego

$$K_g = \frac{L}{d}, \quad (4)$$

- liczby Nusselta

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}, \quad (5)$$

w których nieopisane dotąd wielkości to:

c_p - ciepło właściwe płynu przy jego średniej temperaturze, J/(kg·K);

λ - współczynnik przewodzenia ciepła płynu, W/(m·K);

L - długość rurociągu, m.

Zgodnie z literaturą, dla analitycznego wyznaczenia wartości współczynnika wnikania ciepła przy konwekcji wymuszonej podczas przepływu przez rurę, można wykorzystać równania:

- w zakresie przepływu laminarnego, $Re < 2100$

$$Nu = 1,86 \left(Re \ Pr \ \frac{d}{L} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\eta}{\eta_{śc}} \right)^{0,14} ; \quad \text{gdy} \quad Re \ Pr \ \frac{d}{L} > 13 \quad (6)$$

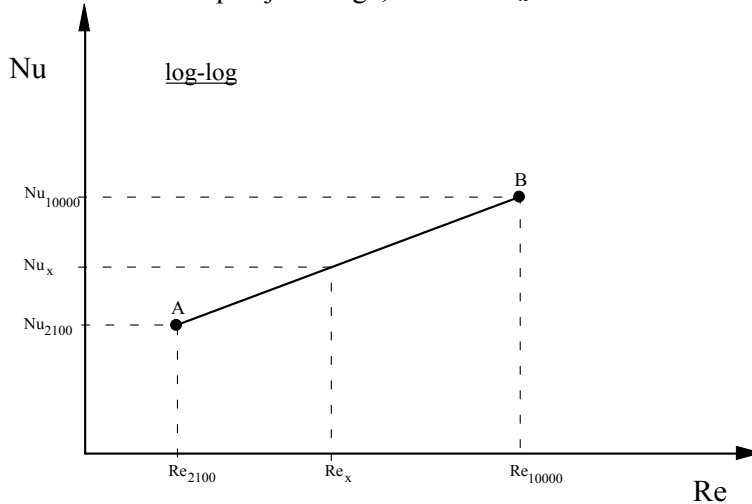
$$Nu = 0,5 \ Re \ Pr \ \frac{d}{L} ; \quad \text{gdy} \quad Re \ Pr \ \frac{d}{L} < 13 \quad (7)$$

- w zakresie przepływu burzliwego, $Re > 10000$

$$Nu = 0,023 \ Re^{0,8} \ Pr^{0,4}, \quad (8)$$

- w zakresie przepływu przejściowego, $2100 < Re < 10000$, brak jest równań szeroko potwierdzonych eksperymentalnie. Dla wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła, można niekiedy skorzystać z metody graficznej, rys.2. Korzystając z niej wykreśla się w podwójnie logarytmicznym układzie współrzędnych, linię prostą łączącą punkty A i B. Współrzędne punktu A

otrzymuje się z zależności (6) lub (7) dla wartości $Re = 2100$ (koniec ruchu laminarnego płynu), współrzędne punktu B z równania (8) przy założeniu $Re = 10000$ (początek ruchu burzliwego). Z wykresu można odczytać wartości Nu_x dla zakresu ruchu przejściowego, $2100 < Re_x < 10000$.



Rys. 2. Graficzny sposób wyznaczania współczynnika wnikania ciepła w zakresie przejściowego ruchu płynu

Wobec złożoności zjawisk towarzyszących wnikaniu ciepła dla konwekcji wymuszonej, niekiedy zachodzi potrzeba eksperymentalnego wyznaczenia wartości współczynnika wnikania ciepła dla interesującego przypadku orientacji przestrzennej powierzchni przez którą następuje przepływ ciepła lub warunków hydrodynamicznych panujących w strudze płynu. W praktyce wykorzystuje się dwa sposoby prowadzenia badań w tym zakresie. Pierwszy z nich polega na stosowaniu równania definicyjnego (2), przekształconego do postaci

$$\alpha = \frac{Q}{F \Delta T} \quad (9)$$

Praktyczne zastosowanie równania (9) wymaga znajomości strumienia wnikającego ciepła, wielkości powierzchni wnikania oraz temperatur rdzenia płynu i powierzchni ściany. Strumień wnikającego ciepła może być wyznaczony w oparciu o bilans cieplny płynu na wlocie i wylocie z układu pomiarowego

$$Q = G_p c_p (T_{p,wl} - T_{p,wyl}) \quad (10)$$

gdzie: G_p - strumień masowy płynu, kg/s;

c_p - średnie ciepło właściwe płynu, J/(kg·K);

$T_{p,wl}$ - temperatura wlotowa płynu, K;

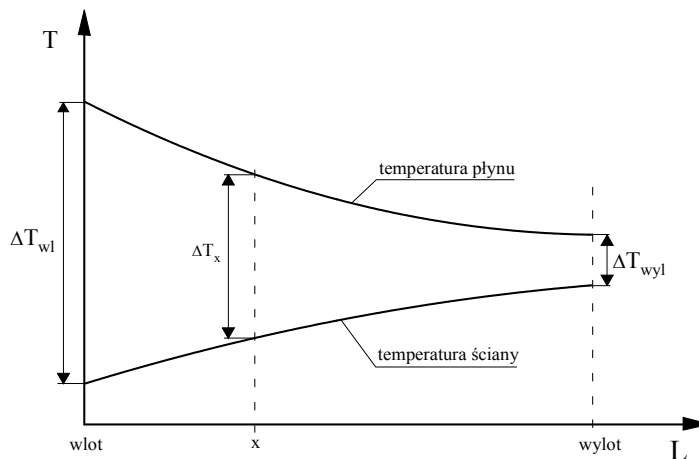
$T_{p,wyl}$ - temperatura wylotowa płynu, K;

Określenie różnicy temperatury ΔT wymaga jednak znajomości temperatury powierzchni ściany, której pomiar może być w niektórych przypadkach (np. wiązka rurek w rekuperatorze) trudny do praktycznego zrealizowania. Należy również pamiętać o tym, że płyn przepływając wzdłuż ściany oddaje lub przyjmuje od niej określoną ilość ciepła, a zatem zmienia się temperatura jego rdzenia. Podobnie temperatura ściany jest zwykle wielkością zmienną na długości przepływu. Dla określenia różnicy temperatury wykorzystuje się zatem jej wartość średnią; w szczególności średnią logarytmiczną

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_{wl} - \Delta T_{wyl}}{\ln \frac{\Delta T_{wl}}{\Delta T_{wyl}}}$$

(11)

w której: $\Delta T_{wl,wyl}$ - różnica temperatury wg oznaczeń na rys. 3



Rys. 3. Rozkład temperatury ściany i ochładzającego się płynu na długości przepływu

Wyznaczony, na podstawie równania (9) i średniej różnicy temperatury, współczynnik wnikania ciepła nosi nazwę średniego, w odróżnieniu od współczynnika lokalnego dotyczącego danego przekroju i występującej w nim różnicy temperatury $\Delta T_x = T_{p,x} - T_{śc,x}$, (rys. 3).

Drugi sposób eksperymentalnego wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła polega na wykorzystaniu zjawiska przenikania ciepła przez przegrodę (ścianę). W przypadku przenikania można napisać równanie

$$Q = k F \Delta T \quad (12)$$

w którym: k - współczynnik przenikania ciepła, $W/(m^2 \cdot K)$;
 F - powierzchnia przenikania, m^2 ;
 ΔT - różnica temperatury pomiędzy płynami, K .

Odwrotność występującego w równaniu (12) współczynnika przenikania ciepła

$$\frac{1}{k} = R = \frac{1}{\alpha_A} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_B} \quad (13)$$

gdzie: R - opór przenikania ciepła, $(m^2 \cdot K)/W$,

α_A - współczynnik wnikania ciepła dla płynu A, $W/(m^2 \cdot K)$;

α_B - współczynnik wnikania ciepła dla płynu B, $W/(m^2 \cdot K)$;

s - grubość przegrody, m ;

λ - współczynnik przewodzenia ciepła materiału przegrody, $W/(m \cdot K)$.

nosi nazwę oporu cieplnego, a poszczególne składniki sumy w równaniu (13) odpowiadają oporowi wnikania ciepła po obu stronach przegrody oraz oporowi cieplnemu samej ściany. Jeżeli zatem w układzie pomiarowym opór wnikania ciepła po jednej ze stron przegrody jest bardzo mały (duża wartość np. α_B) oraz mały jest również opór cieplny samej przegrody, równanie (13) sprowadzi się do postaci

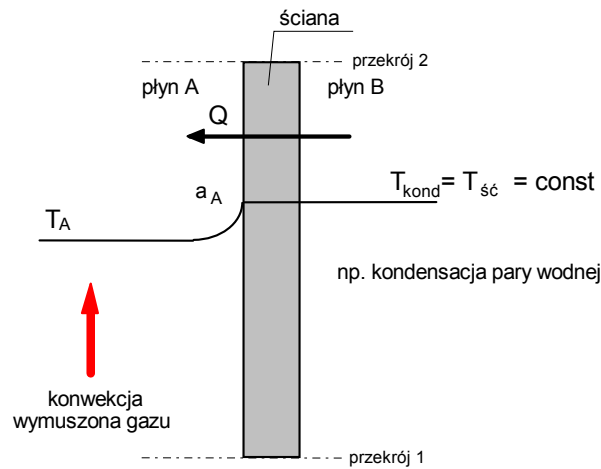
$$\frac{1}{k} \approx \frac{1}{\alpha_A} \quad \text{czyli} \quad k \approx \alpha_A ,$$

(14)

a tym samym równanie (12) można zapisać jako

$$Q = \alpha_A F \Delta T . \quad (15)$$

Występująca w równaniu (15) wartość ΔT dotyczy różnicy temperatury pomiędzy płynami, a zatem w przypadku wykorzystania tej metody pomiaru α , nie jest koniecznym pomiar temperatury ściany. Rozkład temperatury płynów w otoczeniu ściany dla rozpatrywanego przypadku przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Przenikanie ciepła w warunkach jednostronnej kondensacji pary i przy pominięciu oporu przewodzenia ciepła w przegrodzie i wnikania ciepła po stronie pary. Wyznaczenie wartości współczynnika wnikania ciepła odbywa się zatem przy wykorzystaniu zależności

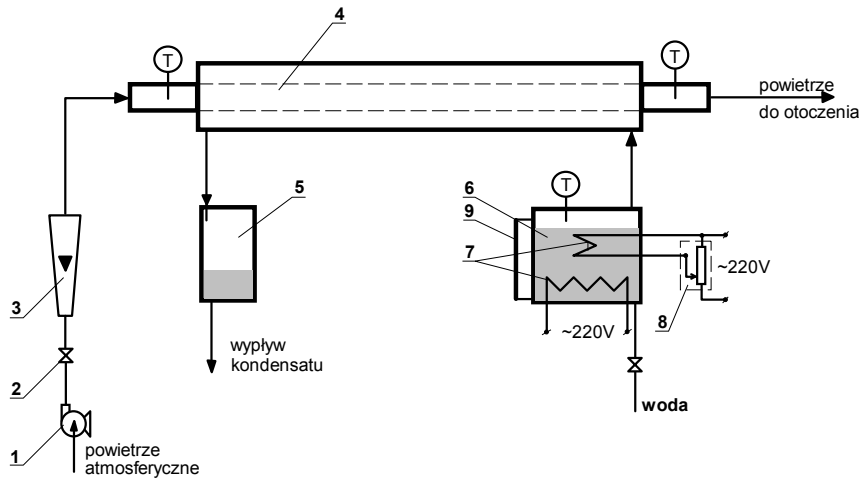
$$\alpha = \frac{Q}{F \Delta T} \quad (16)$$

w której Q określony jest z bilansu cieplnego dla płynu (równanie (10)), a ΔT liczona jako średnia logarytmiczna z temperatury płynów po obu stronach przegrody na ich wlocie i wylocie z aparatu.

Ażeby jednak móc wykorzystać opisany powyżej sposób pomiaru α , należy wytworzyć specyficzne warunki dla przenikania ciepła. Duże wartości współczynnika wnikania ciepła po jednej ze stron przegrody można uzyskać prowadząc na niej proces kondensacji pary ($\alpha \approx 10000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$), natomiast mały opór cieplny samej ściany uzyska się przy jej małej grubości i dużym współczynniku przewodzenia ciepła (np. dla miedzi).

3. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

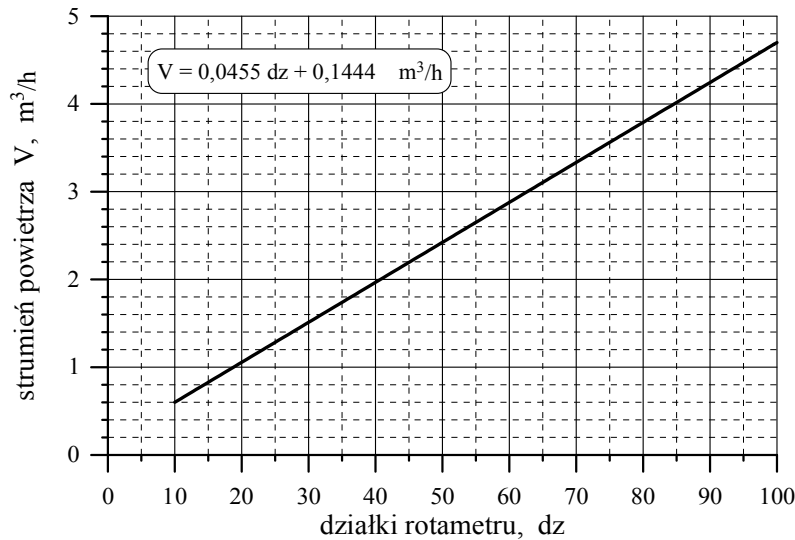
Dla wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła dla konwekcji wymuszonej, wykorzystywany jest w opisywanym ćwiczeniu drugi z przedstawionych w punkcie 2 sposobów. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Schemat stanowiska pomiarowego do wyznaczania współczynnika wnikania ciepła

- 1 - dmuchawa, 2 - zawór regulacyjny, 3 - rotametr, 4 - miedziana rura wewnętrzna, 5 - zbiornik kondensatu, 6 - wytwornica pary, 7 - grzałki elektryczne, 8 - autotransformator, 9 - cieczowskaz, T - punkty pomiaru temperatury

Głównym jego elementem jest rekuperator typu „rura w rurze”. Rura wewnętrzna (4), o wymiarze $\phi 16 \times 1 \text{ mm}$ i długości 1 m wykonana jest z miedzi. Do przestrzeni międzyrurowej, doprowadzona jest nasycona para wodna, która kondensuje na wewnętrznej rurze miedzianej. Para wytwarzana jest w kotle (6) za pomocą dwóch elektrycznych grzałek (7). Jedna z grzałek zasilana jest poprzez autotransformator, co umożliwia, (po doprowadzeniu wody do stanu wrzenia i wyłączeniu drugiej grzałki), regulację mocy grzania, a tym samym ilości wytwarzanej pary. Rurą wewnętrzną rekuperatora przepływa powietrze atmosferyczne tłoczone dmuchawą (1). Strumień powietrza jest regulowany zaworem (2) i mierzony rotametrem (3). Wykres cechowania rotametry przedstawia rys. 6. W celu zminimalizowania ilości ciepła traconego



Rys. 6. Wykres cechowania rotametrzu powietrza.

przez parę do otoczenia, elementy instalacji mające z nią bezpośredni kontakt pokryto warstwą materiału ciepłochronnego. Wytworzony w wymienniku kondensat jest doprowadzany do zbiornika (5), a cieczowskaz (9) umożliwia ciągłą kontrolę ilości wody w wytwornicy pary. Zainstalowane na stanowisku termometry pozwalają na pomiar temperatury powietrza na wlocie i wylocie z rekuperatora oraz kontrolę temperatury pary w kotle.

4. METODYKA PROWADZENIA POMIARÓW

W celu przeprowadzenia pomiarów należy:

- po sprawdzeniu i ewentualnym uzupełnieniu poziomu wody w wytwornicy pary, załączyć obie grzałki. Przed załączeniem grzałek należy włączyć dmuchawę powietrza;
- zaworem regulacyjnym ustawić na rotametrze wymagany strumień powietrza przepływającego przez rekuperator;
- po doprowadzeniu wody w wytwornicy do stanu wrzenia, wyłączyć grzałkę główną;
- autotransformatorem regulować moc grzałki pomocniczej w taki sposób, ażeby do zbiornika kondensatu nie wypływała para z przestrzeni międzyrurowej rekuperatora;
- po ustabilizowaniu się temperatury powietrza na wlocie i wylocie z rekuperatora, dokonać ich odczytu;

- f) powtórzyć czynności wymienione w pkt. b)÷e) dla innych nastawów strumienia powietrza;
g) wyniki pomiarów każdorazowo notować w tabeli

Wyznaczanie współczynnika wnikania ciepła podczas konwekcji wymuszonej gazu w rurze			
Rura wewnętrzna:			
- materiał rury: miedź			
- średnica zewnętrzna: ϕ 16 mm			
- grubość ścianki: 1 mm			
- długość strefy skraplania pary: 1 m			
Rodzaj skraplającej się pary: para wodna nasycona			
Strumień powietrza		Temperatura powietrza na wlocie	Temperatura powietrza na wylocie
działki rotametu	m ³ /h	°C	°C
10			
20			
30			
...			

5. ZAKRES OPRACOWANIA WYNIKÓW

- Wykorzystując równania (10), (11), i (16), wyznaczyć wartości zmierzone współczynnika wnikania ciepła.
- Przedstawić w formie wykresu zależność pomiędzy zmierzonym współczynnikiem wnikania ciepła a prędkością przepływu powietrza.
- Określić wartości współczynnika wnikania ciepła na podstawie obliczeń analitycznych (równania (6), (7), (8) lub wykres jak na rys. 2.) i porównać uzyskane wartości z danymi eksperymentalnymi.
- W analizie danych uzyskanych wg pkt. 3, zwrócić szczególną uwagę na różnice pomiędzy zmierzonymi i obliczonymi wartościami α otrzymanymi w zakresie odpowiadającym innemu niż burzliwy charakterowi przepływu powietrza.
- Podać wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

6. LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- [1] TRONIEWSKI L. i inni: Tablice do obliczeń procesowych, Skrypt PO nr 189, Opole 1996
- [2] HOBLER T.: Ruch ciepła i wymienniki, WNT W-wa 1986

7. TEMATYKA ZAGADNIEŃ KONTROLNYCH

1. Mechanizm ruchu ciepła przez wnikanie.
2. Systematyka przypadków wnikania ciepła.
3. Wpływ warunków procesowych na wartość współczynnika wnikania ciepła.
4. Sposoby eksperymentalnego wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła.
5. Lokalny a średni współczynnik wnikania ciepła.