

WYMIENNIK CIEPŁA TYPU „RURA W RURZE” - WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKÓW WNIKANIA I PRZENIKANIA CIEPŁA

1. Wprowadzenie

W przypadku gdy płynący przewodem płyn (gaz lub ciecz) ma temperaturę różną od temperatury ściany przewodu wówczas występuje ruch (przenoszenie) ciepła pomiędzy ścianą przewodu i płynem. Ruch ten występuje na powierzchni międzyfazowej ciało stałe-płyn. Intensywność tego ruchu jest proporcjonalna do iloczynu powierzchni międzyfazowej (równej powierzchni ściany przewodu) i charakterystycznej różnicy temperatur ściany i płynu. Zależność tę wyraża równanie Newtona:

$$\dot{Q} = \alpha A \Delta T \quad (1)$$

gdzie:

\dot{Q} - strumień cieplny, którego kierunek jest zgodny z kierunkiem gradientu temperatury [W],

A - powierzchnia wymiany ciepła [m²],

ΔT - różnica temperatur ścianki wymiennika i płynu (lub odwrotnie) [K],

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

Liczbowe wartości współczynników wnikania ciepła α oraz ich charakter są bezpośrednio związane z definicjami powierzchni wymiany ciepła A i charakterystycznej różnicy temperatur ΔT . Dla rur okrągłych o jednolitym przekroju poprzecznym, które są całkowicie wypełnione płynącą cieczą powierzchnia wymiany ciepła jest definiowana jako powierzchnia zwilżana, przez którą ciepło jest transportowane. Jest ona równa:

$$A = \pi D L \quad (2)$$

gdzie: D- średnica [m], L- długość rury [m].

Charakterystyczna różnica temperatur może być zdefiniowana w różny sposób lecz najczęściej jest wyrażana jako średnia logarytmiczna:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}, \quad [K] \quad (3)$$

gdzie : ΔT_1 - różnica temperatur ścianki rury i płynu na wlocie do wymiennika [K],

ΔT_2 - różnica temperatur ścianki rury i płynu na wylocie z wymiennika [K].

Dla ustalonego przepływu płynu strumień cieplny określa równanie:

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_1 - T_2), \quad [W] \quad (4)$$

w którym : \dot{m} - masowe natężenie przepływu płynu [kg/s],

c_p - ciepło właściwe płynu [J/kg·K],

T_1 - średnia temperatura płynu w przekroju „1” wymiennika [K]

T_2 - średnia temperatura płynu w przekroju „2” wymiennika [K].

Z równań (1) - (4) wynika następujące równanie na współczynnik wnikania ciepła:

$$\alpha = \frac{\dot{m}c_p(T_1 - T_2)}{\pi DL\Delta T_m}, \quad [\text{W/m}^2\cdot\text{K}] \quad (5)$$

Intensywność ruchu ciepła pomiędzy gorącym płynem i ścianką rury można także określić na podstawie strumienia cieplnego na zwilżanej powierzchni rury. W tym przypadku jednak konieczna jest znajomość gradientu temperaturowego na powierzchni międzyfazowej ciało stałe - płyn.

Dla ustalonego i całkowicie ukształtowanego profilu prędkości spełnienie tego warunku jest możliwe, dając w rezultacie następującą korelację:

$$\text{Nu} = f\left(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Br}, \frac{L}{D}\right), \quad (6)$$

gdzie: $\text{Br} = \frac{\eta w^2}{\lambda \Delta T_m}$ - liczba Brinkmana,

D - wewnętrzna średnica rury, [m.]

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

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

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

$\text{Re} = \frac{w D \rho}{\eta}$ - liczba Reynoldsa,

η - lepkość płynu.

Wyprowadzenie korelacji (6) oparte jest na założeniu, że własności fizyczne płynącego medium są w badanym zakresie temperatur stałe. W większości praktycznych przypadków energia wytwarzana w wyniku tarcia wewnętrznego płynu (lepkościowa dyssypacja energii) jest mała i dlatego liczba Brinkmana może być zaniedbana. Wtedy równanie (6) sprowadza się do postaci:

$$\text{Nu} = f\left(\text{Re}, \text{Pr}, \frac{L}{D}\right). \quad (7)$$

Jeżeli jest znany gradient temperatury płynu przepływającego przewodem, to można określić dokładną postać funkcji (7). Dokładne rozwiązania zostały otrzymane dla przepływu laminarnego, przy stałej temperaturze ścianki rury i stałym strumieniu cieplnym na powierzchni międzyfazowej. W tych warunkach bowiem profil rozkładu prędkości jest paraboliczny. Dla dużych różnic temperatur w przekroju poprzecznym płynącej cieczy zmiany lepkości mogą być znaczne i dlatego

w korelacjach szczegółowych występuje wyrażenie poprawkowe $(\eta_c/\eta_s)^a$ lub $(Pr_c/Pr_s)^b$ uwzględniające kierunek strumienia cieplnego, (gdzie indeks „s” oznacza wartość w średniej temperaturze ścianki). Szczegółowe korelacje dla wnikania ciepła w warunkach przepływu laminarnego i burzliwego podano w literaturze[1,2].

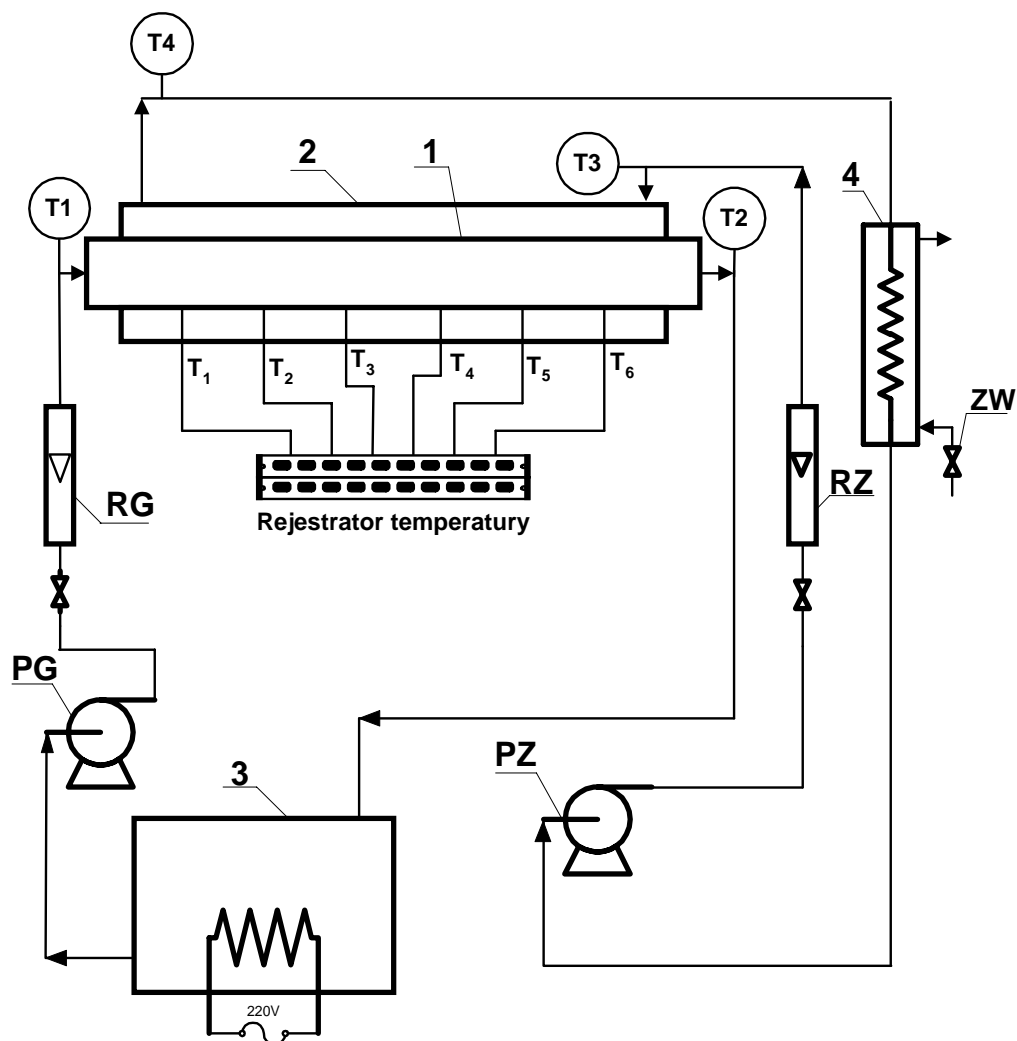
2. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie współczynników wnikania i przenikania ciepła w przeciwprądowym wymienniku ciepła typu „rura w rurze”, w warunkach przepływu laminarnego, przejściowego lub burzliwego i porównanie wartości doświadczalnych z obliczonymi teoretycznie za pomocą odpowiednich korelacji.

3. Aparatura

Schemat aparatury doświadczalnej przedstawiono na rys.1. Zasadniczym elementem stanowiska jest wymiennik ciepła typu „rura w rurze” wykonany z mosiądzu. Powierzchnię grzejącą wymiennika stanowi rura wewnętrzna **1** o średnicy zewnętrznej $d_z = 35$ mm, grubości ścianki $s_w = 1.5$ mm i długości 1.54 m, co daje średnią powierzchnię wymiany ciepła $A = 0.1621$ m². Średnica zewnętrzna rury zewnętrznej **2** $D_z = 50$ mm, zaś grubość ścianki $s_z = 3$ mm. Na zewnętrznej powierzchni rury wewnętrznej zainstalowano 6 termoelementów T_1 - T_6 , których czujniki są rozmieszczone w sześciu, równomiernie od siebie oddalonych, przekrojach rury.

Pomiar i zapis temperatur w poszczególnych punktach pomiarowych rury odbywa się w sposób ciągły za pomocą rejestratora. Rurą wewnętrzną przepływa gorąca woda, w przekroju pierścieniowym natomiast w przeciwnym kierunku przepływa woda zimna. Temperaturę wody gorącej na wlocie **T1** i wylocie **T2** oraz zimnej na wlocie **T3** i na wylocie **T4** mierzy się termometrami rtęciowymi, a regulacja i pomiary natężenia przepływów dokonywane są za pomocą zaworów i rotametrów oznaczonych jako **RG** dla wody gorącej i **RZ** dla wody zimnej, zainstalowanych na przewodach zasilających i wyskalowanych w l/h. Woda gorąca z podgrzewacza 3 jest tłoczona pompą **PG** do wewnętrznej rury wymiennika ciepła. Podgrzewacz ma automatyczną regulację temperatury wody w zakresie 25–95⁰C. Woda zimna tłoczona jest pompą **PZ** przez rotometr **RZ** do pierścieniowej przestrzeni wymiennika ciepła. Z wymiennika woda przepływa do chłodnicy 4, skąd po ochłodzeniu jest zwracana do przestrzeni międzyrurowej aparatu.



Rys. 1. Schemat aparatury wymiennika ciepła typu "rura w rurze":

1 – rura wewnętrzna, 2 – rura zewnętrzna, 3 – podgrzewacz elektryczny wody gorącej, 4 – chłodnica wody zimnej, PG, PZ – pompy obiegowe wody gorącej i zimnej, RG, RZ – rotametry wody gorącej i zimnej, T1, T2, T3, T4 – termometry rtęciowe do pomiaru temperatur wlotowych i wylotowych wody, ZW – zawór odcinający dopływ wody wodociągowej do chłodnicy.

4. Metodyka pomiarów

Badania nad wnikaniem i przenikaniem ciepła w wymienniku typu „rura w rurze” obejmują określenie zależności współczynników wnikania i przenikania ciepła od natężenia przepływu cieczy zarówno w rurze wewnętrznej, jak i w przekroju pierścieniowym. Przed rozpoczęciem pomiaru należy wykonać następujące czynności wstępne:

1. włączyć główne zasilanie tablicy elektrycznej,
2. włączyć bezpieczniki oznaczone symbolami PG, PZ, G1, G2, G3 i S,
3. uruchomić pompy wyłącznikami PG i PZ,
4. włączyć sterownie podgrzewaniem wody wyłącznikiem S oraz grzałki G1, G2 i G3,

5. ustalić zaworami przy rotametrach RG i RZ podane przez prowadzącego natężenia przepływu wody gorącej i zimnej oraz otworzyć zawór wody wodociągowej ZW.

Właściwy pomiar rozpoczyna się wówczas, gdy w aparaturze doświadczalnej ustali się stan równowagi cieplnej. Stan ten charakteryzuje się stałością temperatur wody gorącej i zimnej na wlocie i wylocie z wymiennika.

W chwili rozpoczęcia pomiaru należy zanotować temperatury wody gorącej i zimnej na wlocie i wylocie z wymiennika T1, T2, T3, T4 oraz natężenia przepływu wody gorącej i zimnej. Należy wykonać dwie serie pomiarowe dla ustalonych wartości natężeń przepływu wody gorącej wynoszących 650 l/h i 400 l/h. W każdej serii pomiary wykonuje się dla natężeń przepływu wody zimnej wynoszących kolejno 200, 300, 400 i 500 l/h.

Po zakończeniu pomiarów należy wyłączyć grzałki G1, G2, G3, wyłączniki S, PG i PZ oraz bezpieczniki oznaczone tymi symbolami. Następnie należy wyłączyć zasilanie główne oraz zamknąć zawór ZW.

5. Opracowanie wyników pomiarów.

Doświadczalne wartości współczynników przenikania ciepła k_d oblicza się ze wzoru Pecleta:

$$\dot{Q} = k_d A_m \Delta T_m \quad (8)$$

Wielkość A_m jest średnia logarytmiczną powierzchnią dla rury wewnętrznej, natomiast ΔT_m oblicza się ze wzoru (3), przy czym ΔT_1 i ΔT_2 oznaczają różnicę temperatur między czynnikami na wlocie i wylocie wymiennika. Tak więc $\Delta T_1 = T1-T4$ a $\Delta T_2 = T2-T3$. W warunkach przepływu ustalonego strumień cieplny wyznacza się z bilansu dla wody gorącej:

$$\dot{Q} = \dot{m}_g c_p (T1 - T2) \quad (9)$$

Obliczenia teoretycznych wartości współczynników przenikania ciepła należy przeprowadzić wg równania (10), zanedbując wpływ krzywizny powierzchni wymiany ciepła:

$$\frac{1}{k_{teoret}} = \frac{1}{\alpha_g} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_z}, \quad (10)$$

Współczynniki wnikania ciepła dla wody gorącej α_g i zimnej α_z należy obliczać wg odpowiednich korelacji, po uprzednim określeniu charakteru przepływu wody (liczba Re). Współczynnik przewodzenia ciepła dla mosiądzu wynosi $\lambda = 100 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

W sprawozdaniu należy umieścić:

- wyniki pomiarów,
- zestawienie doświadczalnych i teoretycznych wartości współczynników przenikania ciepła k_d i k_{teoret} .