

## BADANIE WYMIENNIKÓW CIEPŁA

### a) PŁASZCZOWO-RUROWEGO    b) WĘŻOWNICOWEGO

#### 1. Wprowadzenie

Badanie wymiennika ciepła sprowadza się do pomiaru współczynników przenikania ciepła  $k$  w szerokim zakresie zmian parametrów ruchowych, obejmujących natężenia masowe przepływu cieczy  $\dot{m}$  i różnicę temperatur między kondensującą się, nasyconą parą grzejącą i średnią temperaturą ogrzewanej cieczy.

Jeżeli wzdłuż powierzchni przegrody płynie gaz lub ciecz ruchem burzliwym, to na jej powierzchni tworzy się zawsze tzw. warstewka graniczna Prandtla, w której cząsteczki poruszają się ruchem uwarstwionym, tzn. równoległym do kierunku przepływu. W takiej cienkiej warstewce ruch ciepła odbywa się przez przewodzenie, tak jak w ciele stałym. W następnych warstwach płynącej strugi, cząsteczki wykonują ruchy nie tylko równoległe do kierunku przepływu, lecz także poprzeczne, w wyniku których energia cieplna jest przenoszona od rdzenia płynącej strugi do warstewki granicznej lub odwrotnie. W tych warstwach ruch ciepła odbywa się przez konwekcję. W takim przypadku ruch ciepła między rdzeniem płynącego medium i powierzchnią przegrody jest procesem złożonym, obejmującym zarówno ruch ciepła przez przewodzenie, jak i konwekcję. Ten rzeczywisty, złożony proces ruchu ciepła nosi nazwę wnikania ciepła. Rozkład temperatury i charakter ruchu w procesie wnikania ciepła ilustruje schematycznie rysunek 1, na którym  $T_1$  - temperatura w rdzeniu płynącej strugi,  $T_2$  - temperatura powierzchni przegrody

W przypadku gdy ruch medium jest uwarstwiony w całej masie płynącej strugi, to wnikanie ciepła jest wynikiem jedynie przewodzenia ciepła.

Rys.2 przedstawia rozkład temperatur w przypadku ruchu ciepła między dwoma poruszającymi się mediami gazowymi lub ciekłymi (A i B), rozdzielonymi przegrodą z ciała stałego. Na rysunku tym  $T_A$  oznacza temperaturę w rdzeniu medium A,  $T_1$  - temperaturę powierzchni przegrody po stronie medium A,  $T_2$  - temperaturę powierzchni po stronie medium B,  $T_B$  - temperaturę w rdzeniu medium B,  $\alpha_A$  i  $\alpha_B$  - współczynniki wnikania ciepła po obu stronach przegrody.

W tym złożonym przypadku ruchu ciepła można wyróżnić trzy odrębne fazy:

- 1) ruch ciepła od rdzenia medium A do powierzchni przegrody, zwany wnikaniem ciepła,
- 2) ruch ciepła w przegrodzie, zwany przewodzeniem,
- 3) ruch ciepła od powierzchni przegrody do rdzenia medium B, zwany wnikaniem.

Ruch ciepła między dwoma ośrodkami gazowymi lub ciekłymi poprzez przegrodę z ciała stałego nazywamy przenikaniem ciepła. W pojęciu tym mieści się przewodzenie ciepła przez przegrodę oraz wnikanie ciepła po obu jej stronach.

Współczynnik wnikania ciepła  $\alpha$  wyraża ilość ciepła w dżulach, która jest wymieniana w jednostce czasu ( $\tau=1$  s) na jednostkowej powierzchni ( $A=1\text{m}^2$ ) przy jednostkowej różnicy temperatur ( $\Delta T=1\text{K}$ ).

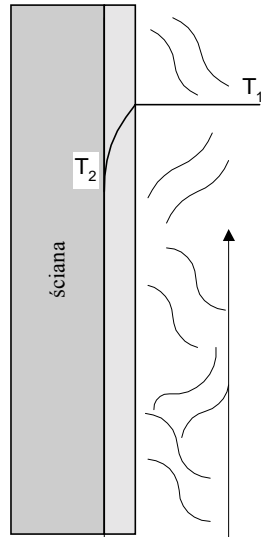
Konwekcyjny współczynnik wnikania ciepła  $\alpha$  zależy przede wszystkim od fizycznych własności medium opływającego przegrodę oraz od charakteru jego ruchu. Nie zależy on natomiast zupełnie od rodzaju materiału przegrody.

Strumień ciepła wymienianego pomiędzy mediami A i B (rys.2.) określa równanie Pecleta

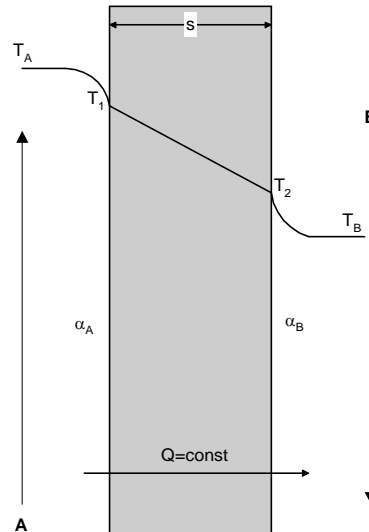
$$\dot{Q} = kA(T_A - T_B), \quad (1)$$

w którym :

- $k$ - jest współczynnikiem przenikania ciepła,
- $A$  - powierzchnia wymiany ciepła ,



Rys.1. Wnikanie ciepła od rdzenia płynu do ścianki



Rys.2. Przenikanie ciepła od rdzenia medium A do rdzenia medium B

Dla jednowarstwowej przegrody płaskiej współczynnik przenikania ciepła  $k$  wyraża się zależnością

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_A} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_B}, \quad (2)$$

w której  $\lambda$  - współczynnik przewodzenia ciepła dla materiału przegrody,  
 $s$  - grubość przegrody.

Współczynniki  $\alpha_A$  i  $\alpha_B$  obliczyć można posługując się odpowiednimi dla danego przypadku korelacjami, lub z równania Newtona (3)

$$\dot{Q} = kA\Delta T, \quad (3)$$

które wymaga uprzedniego, eksperymentalnego wyznaczenia strumienia cieplnego  $\dot{q}$  i różnicy temperatur  $\Delta T$ . W przypadku obliczania  $\alpha_A$ ,  $\Delta T_A = T_A - T_1$ , przy obliczaniu  $\alpha_B$ ,  $\Delta T_B = T_2 - T_B$  (zgodnie z rysunkiem 2)

## 2. Cel ćwiczenia

- 1) Doświadczalne wyznaczenie współczynników przenikania ciepła  $k$  w wymienniku płaszczowo-rurkowym lub wymienniku z zamontowaną wewnątrz węzownicą, ogrzewanych kondensującą parą wodną. Badania obejmują dwie serie pomiarów:
  - a) Zależności współczynnika przenikania ciepła  $k$  przy ogrzewaniu wody destylowanej od natężenia przepływu wody  $\dot{m}$ .
  - b) Zależności współczynnika  $k$  przy ogrzewaniu wody destylowanej od różnicy temperatur, pary  $T_p$  i wody  $T_w$ ,  $\Delta T = T_p - T_w$ .
- 2) Obliczenie współczynników wnikania ciepła dla pary  $\alpha_p$  i dla wody  $\alpha_w$  na podstawie danych doświadczalnych ( $Q$  i  $\Delta T$ ) oraz równania Newtona.

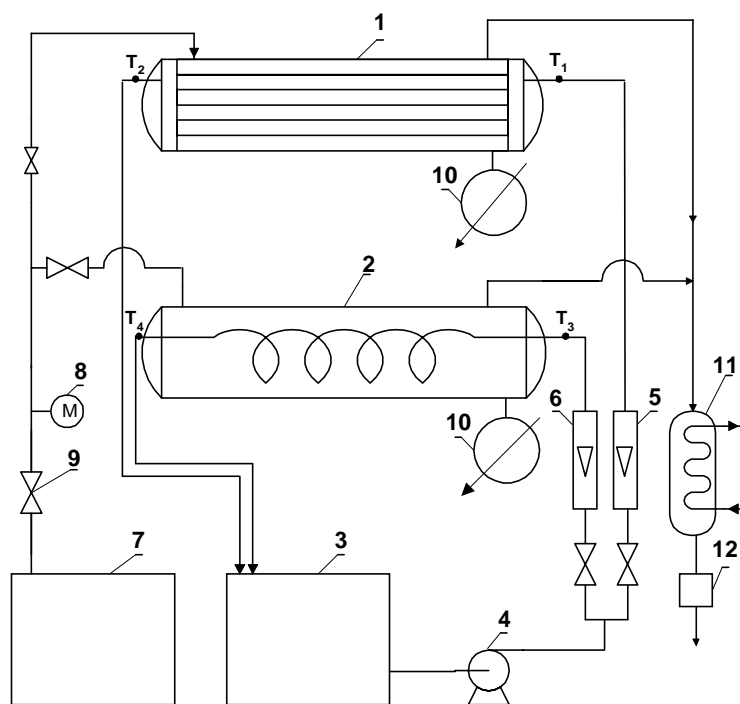
- 3) Obliczenie współczynników wnikania ciepła  $\alpha_p$  i  $\alpha_w$  za pomocą odpowiednich dla poszczególnych przypadków korelacji.

### 3. Aparatura

Najważniejszymi elementami aparatury doświadczalnej są:

- płaszczowo-rurkowy wymiennik ciepła,
- wymiennik ciepła z wbudowaną węzownicą,
- zbiornik wody obiegowej,
- elektryczna wytwornica pary o mocy 25 kW,
- pompa wirowa,
- rotametry,
- skraplacz nadmiaru pary.

Schemat aparatury doświadczalnej do badania wymienników ciepła przedstawia rysunek 3. Płaszczowo-rurkowy wymiennik ciepła 1 ma efektywną powierzchnię wymiany ciepła  $A = 0.43 \text{ m}^2$ , która tworzy 19 rurek stalowych o długości  $L=0.6 \text{ m}$ , średnicy zewnętrznej  $d_z = 0.014 \text{ m}$  i grubości ścianki  $s=0.002 \text{ m}$ . Rurki są wykonane ze stali kwasoodpornej 1H18N9T i są zamocowane w dnach sitowych w układzie heksagonalnym.



Rys. 3. Schemat aparatury doświadczalnej do badania wymienników ciepła

1- wymiennik płaszczowo-rurkowy, 2- wymiennik z węzownicą, 3- zbiornik obiegowej wody, 4- pompa, 5,6- rotametry, 7- wytwornica pary, 8- manometr, 9- zawór regulacyjny, 10- garnki kondensacyjne, 11- chłodnica, 12- latarka kontrolna

Węzownicowy wymiennik ciepła 2 ma dwie węzownice pracujące równolegle (każda o długości  $L=5.7 \text{ m}$ ), wykonane z rurek stalowych (1H18N9T) o średnicy  $d_z=0.014 \text{ m}$  i grubości ścianki  $s=0.002 \text{ m}$ . Efektywna powierzchnia wymiany ciepła obu węzownic wynosi  $A=0.43 \text{ m}^2$ .

Zbiornik wody obiegowej 3 ma za zadanie utrzymanie stałej temperatury cieczy. Dlatego ma on węzownicę chłodzącą zasilaną wodą z sieci miejskiej oraz termometr kontaktowy współpracujący z przekaźnikiem. Woda zimna ze zbiornika 3 tłoczona jest pompą wirową 4

przez rotametry 5,6 do wymiennika płaszczowo-rurkowego 1 lub wężownicowego 2. Po ogrzaniu wraca do zbiornika obiegowego. Para grzejna wytwarzana jest w elektrycznej wytwornicy pary 7 o mocy 25kW, skąd przepływa do badanego wymiennika. Ciśnienie pary kontrolowane jest manometrem 8, a jego regulację zapewnia zawór 9. Skroplona w przestrzeniach międzyrurowych wymienników para odprowadzana jest przez garnki kondensacyjne 10 do kanalizacji. Nadmiar pary grzejjnej wykraplany jest w chłodnicy 11 i przez latarkę kontrolną 12 odprowadzany do kanalizacji.

Temperatura wody na wlocie i wylocie wymienników mierzona jest termoparami żelazo-konstantan  $T_1$ - $T_4$ . Mierzona jest również temperatura zewnętrznej powierzchni rurek w wymienniku 1 i wężownicy w wymienniku 2.

#### 4. Metodyka pomiarów

Pomiar współczynników przenikania ciepła  $k$  w wymiennikach płaszczowo-rurkowym i z zamontowaną wężownicą polega na określeniu w stanie równowagi cieplnej układu:

- a) strumienia cieplnego  $\dot{q}$
- b) różnicy temperatur  $\Delta T_B = T_p - T_w$ , gdzie  $T_p$  - temperatura nasyconej pary grzejjnej,  $T_w$  - średnia arytmetyczna temperatura ogrzewanej cieczy  $T_w = (T_p + T_k)/2$ ;  $T_p$  - temperatura ogrzewanej wody na wlocie do wymiennika;  $T_k$  - temperatura wody na wylocie z wymiennika.

Badania przenikania ciepła podczas podgrzewania cieczy obejmują określenie wpływu natężenia przepływu ogrzewanej cieczy  $\dot{m}$  oraz obciążenia cieplnego powierzchni grzejjnej  $\dot{q}$  na współczynnik przenikania ciepła  $k$ .

Przed rozpoczęciem właściwego pomiaru należy wykonać następujące czynności wstępne:

- a) napełnić zbiornik obiegowy 3 badaną cieczą,
- b) włączyć pompę wirową,
- c) uruchomić elektryczną wytwornicę pary,
- d) włączyć wielomiejscowe mierniki temperatury,
- e) włączyć przepływ wody chłodzącej w skraplaczu i wężownicy zbiornika obiegowego.

Właściwy pomiar rozpoczyna się wówczas, gdy temperatury cieczy na wlocie i wylocie z wymiennika  $T_p$  i  $T_k$  są stałe w czasie, a ilość doprowadzanej do wymiennika pary grzejjnej jest nieco większa od wymaganej. Nadmiar pary grzejjnej jest wykraplany w skraplaczu, a powstały kondensat sływa poprzez latarnię kontrolną do zbiornika wytwornicy pary. Pomiar może być uważany za poprawny tylko wówczas, gdy w czasie jego trwania obserwuje się ciągły sływ kondensatu w latarni kontrolnej.

Podczas trwania pomiaru rejestruje się następujące wielkości:

- a) ciśnienie pary grzejjnej w przestrzeni parowej wymiennika ( $P_p$ ),
- b) temperatury ogrzewanej cieczy na wlocie ( $T_1$  lub  $T_3$ ) i wylocie z wymiennika ( $T_2$  lub  $T_4$ ),
- c) temperatury zewnętrznej powierzchni rurek (6 punktów pomiarowych) lub wężownicy (4 punkty pomiarowe),
- d) natężenie przepływu ogrzewanej cieczy  $\dot{m}$ .

#### 5. Opracowanie wyników

Doświadczalne współczynniki przenikania ciepła  $k$  przy podgrzewaniu wody w wymiennikach ciepła (płaszczowo-rurkowym lub wężownicowym) oblicza się za pomocą równania (1), w którym strumień cieplny  $\dot{Q}$  oblicza się z równania bilansu cieplnego dla ogrzewanej wody

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_k - T_p) \quad (4)$$

Badania obejmują dwie serie pomiarów, podczas których wielkościami zmiennymi są:

- a) prędkość masowa ogrzewanej cieczy  $\dot{m}$ ,
- b) obciążenie cieplne powierzchni grzejnej  $\dot{q}$

Współczynniki ciepła  $\alpha_p$  od kondensującej się pary grzejnej do ścianki ( rurki lub węzownicy) obliczać dla każdego pomiaru na podstawie:

- a) równania (3) , wykorzystując mierzone temperatury zewnętrznej powierzchni rurek bądź węzownicy,
- b) szczegółowej postaci korelacji, obowiązującej dla kondensacji filmowej.

Współczynniki wnikania ciepła  $\alpha_B$  po stronie ogrzewanej cieczy obliczyć dla każdego pomiaru na podstawie:

- a) równania (3) i obliczonej temperatury po wewnętrznej stronie rurki względnie węzownicy,
- b) szczegółowej postaci korelacji, obowiązującej dla danego przypadku, charakteryzującego się określoną wartością liczby Reynoldsa.

Wyniki pomiarów i obliczeń należy zestawić w tabelce.