

WNIKANIE CIEPŁA PRZY PODGRZEWANIU CIECZY W WARUNKACH GRAWITACYJNEGO SPŁYWU PO PIONOWEJ ŚCIANIE WYMIENNIKA

1. Wprowadzenie

Podczas ogrzewania lub oziębiania cieczy płynącej wewnątrz pionowych rur, w kierunku z góry w dół, ekonomiczna prędkość cieczy, zapewniająca wysokie współczynniki wnikania ciepła i wynikające stąd zminimalizowanie wielkości powierzchni wymiany ciepła, może być tak duża, że jej realizacja będzie możliwa tylko w przypadku skomplikowanej konstrukcji wymiennika. Dla małych prędkości przepływu cieczy współczynniki wnikania są małe, a powierzchnie wymienników duże. Bardzo dobrym rozwiązaniem jest w tym przypadku zraszanie powierzchni rury cieczą. Jeżeli na przykład w pionowo-rurkowym wymienniku ciepła, zamiast prowadzić ogrzewaną ciecz pełnym przekrojem rur rozprowadzi się ją po ścianie wewnętrznej w formie ciekłej warstwy, to uzyska się przy swobodnym spływie grawitacyjnym większe prędkości liniowe cieczy i w konsekwencji większe wartości współczynników wnikania ciepła. Jeżeli rurą o średnicy wewnętrznej d przepływa ciecz o natężeniu \dot{m} i średniej temperaturze T , to liczba Reynoldsa dla przepływu pełnym przekrojem (Re) i dla grawitacyjnego spływu filmowego (Re_{zr}) będzie identyczna.

$$Re = \frac{\dot{m} \cdot d}{A \cdot \eta} = \frac{4 \dot{m}}{O \cdot \eta} = \frac{4\Gamma}{\eta} = Re_{zr}, \quad (1)$$

gdzie: A - przekrój poprzeczny rury,
 d - średnica rury,
 η - lepkość cieczy,
 O - obwód zwilżony,
 Γ - jednostkowe natężenie zraszania.

Ponadto dla $T = \text{const}$ i dla danej cieczy liczba Prandtla Pr ma stałą wartość. Zakładając, że wnikanie ciepła zarówno podczas przepływu cieczy pełnym przekrojem rury, jak i podczas spływu grawitacyjnego po ścianie może być opisane równaniem McAdamsa, dla przepływu burzliwego, otrzymamy:

przepływ pełnym przekrojem

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}, \quad (2)$$

grawitacyjny spływ filmowy

$$Nu_z = 0.023 Re_{zr}^{0.8} Pr^{0.4}, \quad (3)$$

Dla określonej cieczy i ustalonych d , \dot{m} , T prawe strony równań (2) i (3) są identyczne, a zatem

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} = Nu_z = \frac{\alpha_f d_e}{\lambda}, \quad (4)$$

przy czym : α_f - współczynnik wnikania ciepła dla grawitacyjnego spływu cieczy po ścianie,
 d_e - średnica zastępcza.

Dla przekrojów niekołowych hydrodynamika przyjmuje $d_e = 4A'/O$, przy czym A' - przekrój poprzeczny ciekłego filmu. Jeżeli grubość ciekłej warstewki wynosi s , to $A' = \pi(d-s)s$, $O = \pi d$ i $d_e = 4s(d-s)/d$.

Uwzględniając wyrażenie na d_e z równania (4) otrzymamy:

$$\frac{\alpha_f}{\alpha} = \frac{d}{d_e} = \frac{d^2}{4s(d-s)}. \quad (5)$$

Jeżeli $s = d/2$ (przepływ pełnym przekrojem), to $\alpha_f = \alpha$. Dla $s < d/2$ (grawitacyjny spływ cieczy po wewnętrznej ścianie rury) z równania (5) wynika, że

$$\alpha_f > \alpha. \quad (6)$$

Jeżeli grubość warstewki ciekłej jest bardzo mała w porównaniu z wewnętrzną średnicą rury $s \ll d$, to z równania (5) otrzymamy:

$$\frac{\alpha_f}{\alpha} = \frac{d}{4s}, \quad (7)$$

skąd wynika, że $\alpha_f \gg \alpha$.

Dla rur pionowych o długości h , zraszanych od wewnątrz tak małą ilością wody, że spływ po ścianie jest uwarstwiony $Re_{zr} = 4\Gamma/\eta < 2100$, McAdams poleca następujący wzór na współczynnik wnikania ciepła:

$$Nu_z = \frac{\alpha \vartheta_z}{\lambda} = 0.67 Re_{zr}^{\frac{1}{9}} Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\vartheta_z}{h} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (8)$$

w którym $\vartheta_z = \left(\frac{\eta^2}{g\rho^2} \right)^{\frac{1}{3}}$ - jest zastępczym wymiarem poprzecznym dla przepływu niewymuszonego.

Dla grawitacyjnego i burzliwego spływu filmowego cieczy po pionowej ścianie rury, w zakresie liczby Reynoldsa od 2100 do 51000 McAdams poleca wzór (9)

$$Nu_z = 0.01 Re_{zr}^{\frac{1}{3}} Pr^{\frac{1}{3}}. \quad (9)$$

Poszczególne parametry fizyczne we wzorach (8) i (9) należy przyjmować w średniej temperaturze warstwy cieczy.

2. Cel ćwiczenia

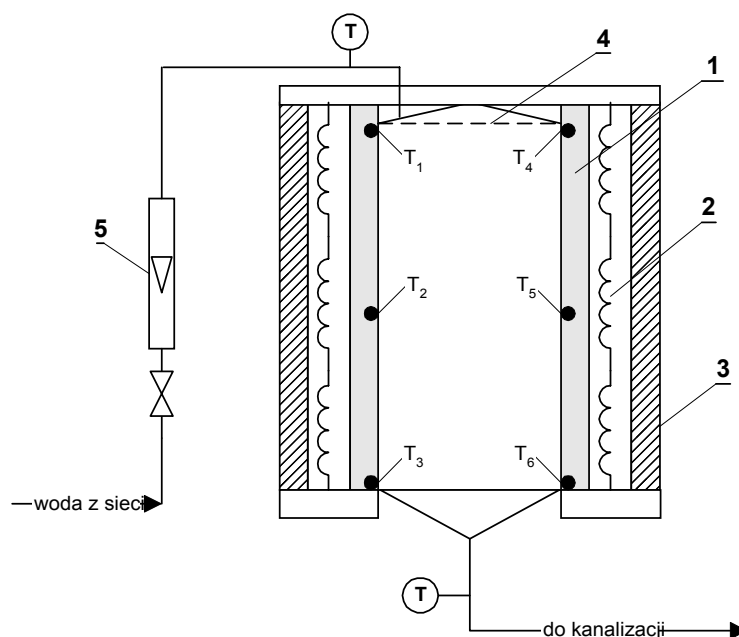
Celem ćwiczenia jest:

1. doświadczalnie wyznaczenie współczynników wnikania ciepła α_d przy podgrzewaniu cieczy spływającej grawitacyjnie po wewnętrznej powierzchni rury.

2. porównanie doświadczalnych współczynników wnikania ciepła α_d , charakteryzujących podgrzewanie cieczy, z danymi obliczonymi α_{obl} za pomocą wzorów (8) i (9).

3. Aparatura

Schemat aparatury doświadczalnej do podgrzewania cieczy przedstawia rysunek 1. Zasadniczym elementem aparatury doświadczalnej jest wymiennik ciepła, w którym podgrzewana ciecz sływa grawitacyjnie po pionowej ścianie rury. Powierzchnię grzejną wymiennika stanowi rura miedziana 1 o średnicy wewnętrznej $d=60$ mm i wysokości $H=266$ mm. Efektywna powierzchnia wymiany ciepła $A=0.05$ m². Aby zapewnić równomierną temperaturę na powierzchni grzejnej na rurę jest nasunięty pierścieniowy blok miedziany, na którego zewnętrznej powierzchni zainstalowano grzejnik elektryczny 2 o regulowanej w sposób ciągły mocy w zakresie 0–7.5 kW. Spirala grzejnika została tak zaprojektowana i zainstalowana, że cała zewnętrzna powierzchnia bloku jest równomiernie ogrzewana, niezależnie od stosowanej aktualnie mocy. Aby uniknąć znacznych strat ciepła, na spiralę grzejną nałożono grubą warstwę izolacji 3. Na szczycie rury grzejnej zainstalowane jest urządzenie 4, służące do rozprowadzania cieczy po ścianie rury. Cieczą ogrzewaną w wymienniku jest woda z sieci miejskiej, doprowadzana przez zawór i rotametr 5. Na wlocie i wylocie aparatu mierzona jest temperatura wody. Służą do tego celu termometry rtęciowe T. W sześciu punktach mierzona jest temperatura wewnętrznej ścianki rury: czujniki T_1 i T_4 umieszczone są na szczycie rury, T_2 i T_5 w połowie jej wysokości a T_3 i T_6 na dolnej krawędzi. Są one połączone z rejestratorem temperatury o działaniu ciągłym.



Rys.1. Schemat aparatury do badania wnikania ciepła przy podgrzewaniu cieczy w warunkach grawitacyjnego sływu po pionowej ścianie rury

1- rura grzejna, 2-ogrzewanie elektryczne, 3- izolacja, 4- zraszacz, 5- rotametr

4. Metodyka pomiarów

Pomiar współczynnika wnikania ciepła polega na określeniu w stanie równowagi cieplnej układu:

a) strumienia cieplnego Q ,

b) różnicy temperatur ścianki rury i podgrzewanej wody.

Współczynnik wnikania ciepła α oblicza się za pomocą wzoru Newtona

$$\dot{Q} = \alpha A \Delta T = \alpha A (T_{sc} - T_c), \quad (10)$$

w którym: T_{sc} - średnia temperatura ścianki rury,

T_c - średnia temperatura wody,

A - wewnętrzna powierzchnia rury.

Ilość wymienionego podczas pomiaru ciepła oblicza się z zależności:

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T_w, \quad (11)$$

w której:

\dot{m} - natężenie przepływu wody,

$\Delta T_w = T_k - T_p$:

T_k - temperatura wody na wylocie z wymiennika,

T_p - temperatura wody na wlocie do wymiennika

Badanie wnikania ciepła podczas podgrzewania danej cieczy obejmuje określenie wpływu intensywności zraszania powierzchni grzejnej cieczą Γ oraz obciążenia cieplnego powierzchni grzejnej \dot{q} na współczynnik wnikania ciepła.

Przed rozpoczęciem właściwego pomiaru należy wykonać następujące czynności wstępne:

- ustalić intensywność zasilania wodą wymiennika za pomocą zaworu zamontowanego na rurociągu przed rotametrem 5,
- włączyć ogrzewanie elektryczne wymiennika, ustalając dla danego pomiaru określone napięcie zasilania,
- włączyć rejestrator temperatury.

Z chwilą ustalenia się temperatury cieczy na wlocie i wylocie z wymiennika oraz temperatury ścianki rury należy rozpocząć właściwy pomiar. Podczas trwania pomiaru należy rejestrować natężenie przepływu wody, temperaturę ścianki rury oraz temperatury cieczy na wlocie i wylocie z wymiennika.

5. Opracowanie wyników pomiarów

Doświadczalne współczynniki wnikania ciepła α_d przy podgrzewaniu cieczy spływającej grawitacyjnie po wewnętrznej powierzchni rury oblicza się za pomocą równania (10). Pomiar różni się intensywnością zraszania powierzchni grzejnej Γ oraz obciążeniem cieplnym \dot{q} . W sprawozdaniu należy zestawzić tabelarycznie liczbowe wartości współczynników α_{dosw} oraz α_{teoret} dla wszystkich pomiarów.

Współczynniki wnikania ciepła α oblicza się za pomocą wzorów (8) lub (9) zależnie od wartości liczby Reynoldsa Re_{zr} .

Wyniki pomiarów i obliczeń (Re_{zr} , Nu , Pr , α) należy umieścić w tabelce.