ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1978

Seria: ENERGETYKA z. 67 Nr kol. 563

Władysław MRÓZ, Krzysztof PAKOŃSKI

Instytut Inżynierii Chemicznej
i Budowy Aparatury

BADANIA WNIKANIA CIEPŁA PRZY BŁONOWEJ KONDENSACJI FREONU 22 NA RURZE POZIOMEJ UMIESZCZONEJ W POZIOMYM KANALE PRZY WYMUSZONYM PRZEPŁYWIE PARY

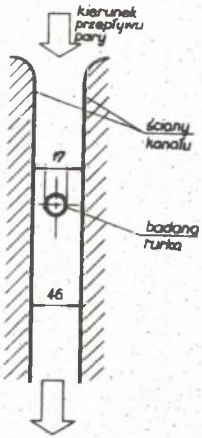
Streszczenie. W pracy przedstawiono stanowisko pomiarowe, metodykę oraz wyniki badań wnikania ciepła na poziomej rurze umieszczonej w poziomym kanale (rys. 3), przy wymuszonym przepływie pary suchej i mokrej. Wzrost prędkości pary suchej od 0,15 do 1,5 m/s powoduje zwiększenie współczynnika wnikania ciepła 65÷80% w zależności od wartości różnicy temperatur Δt. Charakter otrzymanej zależności potwierdza wyniki uzyskane przez Gogonina i Dorochowa [2],[3], którzy badali wnikanie ciepła przy skraplaniu pary na rurze umieszczonej w pionowym strumieniu pary suchej.

1. Wstęp

Badanie przekazywania ciepła w filmie kondensatu na rurze poziomej umieszczonej w strumieniu pary nasyconej było przedmiotem licznych prac obliczeniowych i doświadczalnych. Wyniki badań [1], [2], [3], [4], [5] świadczą, że oddziaływanie strumienia pary, omywającego powierzchnię chłodzoną na przekazywanie ciepła w filmie kondensatu, występuje przy znacznie mniejszych prędkościach niż przewidywała to analiza Nusselta.

Berman [10] postuluje, że przyczyną jest sfalowanie filmu cieczy, powodujące zakłócenie czysto laminarnego ruchu warstwy kondensatu, prędkość pary nie jest jeszcze dostatecznie duża, by spowodować zmniejszenie grubości filmu kondensatu ale wystarczająca, aby zakłócić jego spływ laminarny.

Szekriładze uważa, że główną przyczyną rozbieżności analizy Nusselta i wyników badań dla niewielkich prędkości pary jest użyta przez Nusselta zależność określająca naprężenie styczne na granicy rozdziału faz, jak dla omywania gazem powierzchni nieprzenikalnej. W pracach [6], [7] podaje rozwiązania analityczne kondensacji błonowej, wykorzystując dla określenia naprężenia stycznego zależność podaną przez Schlichtinga [8] dla omywania płaskiej płyty przy jednorodnym powierzchniowym odsysaniu warstwy przyściennej, podtrzymując pozostałe założenia Nusselta i uzupełniając je założeniem, że przepływ pary na zewnątrz warstwy przyściennej ma potencjał taki, jak ustalony przepływ gazu omywającego nieprzenikalny cylinder.



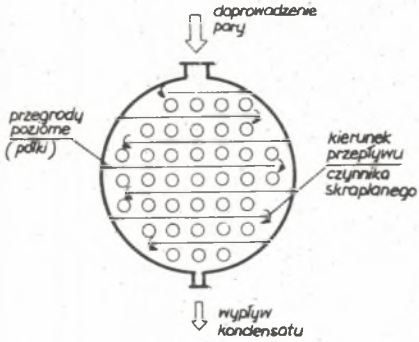
Rys. 1. Odcinek pomiarowy, w którym wykonano badania [2]

Wyniki badań Gogonina i Dorochowa [3], którzy wykonali obszerne badania kondensacji freonu R21 na rurze poziomej umieszczonej w pionowym kanale jak na rys. 1, potwierdziły prawidłowość rozwiązania [7] w przyjętej do obliczeń geometrii.

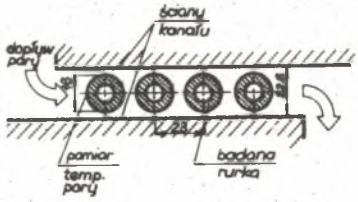
2. Sformułowanie zagadnienia

Informacje znajdujące się w literaturze, których fragment przedstawiono we wstępie, wskazują na istnienie oddziaływania strumienia pary na przekazywanie ciepła w filmie kondensatu już przy niewielkich prędkościach pary. Oddziaływanie to może zostać wykorzystane w projektowaniu skraplaczy, dla zmniejszenia oporów przekazywania ciepła po stronie skraplania.

Jednak wyniki dotychczasowych badań zarówno doświadczalnych, jak analitycznych dotyczą geometrii idealnych, co uniemożliwia użycie otrzymanych zależności do projektowania aparatów. Skraplacz, w którym zwiększono prędkość przepływu pary bez stosowania dodatkowych urządzeń zewnętrznych można wykonać wg rys. 2.



Rys. 2. Skraplacz ze zwiększoną prędkością przepływu pary



Rys. 3. Odcinek pomiarowy w stanowisku (rys. 4)

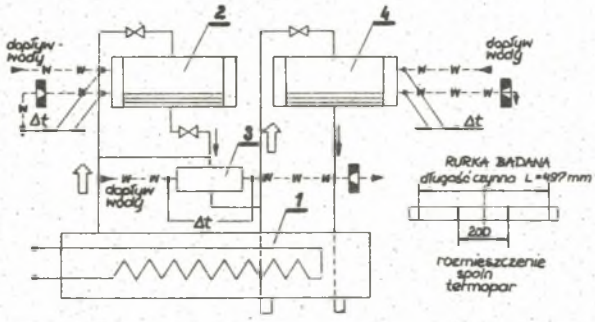
Elementem powtarzalnym w takim aparacie jest kanał poziomy z rurkami jak na rys. 3. Gdy do takiego kanału dostarczać parę nasyconą, zmieniając jej stopień suchości można w kanale (rys. 3) stwarzać kolejno warunki przekazywania ciepła w całym aparacie.

Dla uzyskania informacji potrzebnych do zaprojektowania skraplacza wg rys. 2 podjęto badania współczynnika wnikania ciepła przy skraplaniu pary

na rurce umieszczonej w poziomym kanale, przez który przepływa para mokra, w zależności od zagęszczenia strumienia masy pary i stopnia suchości pary.

3. Stanowisko pomiarowe i metodyka

Schemat stanowiska pomiarowego pokazano na rys. 4. W generatorze pary 1 wypełnionym cieczą R22 następuje odparowanie, kosztem ciepła dostarczanego przez grzejniki elektryczne o mocy 60 kW. Para dopływa do skraplacza wstępnego 2 i kanału 3. Ciecz wypływająca ze skraplacza 2 po zmieszaniu z parą dopływa do kanału 3, gdzie na badanej rurce, chłodzonej wodą, skrapla się część pary.



Rys. 4. Schemat stanowiska badawczego

Po przepływie przez kanał następuje rozdzielenie cieczy i pary, ciecz spływa do generatora pary 1, a para "zasysana" jest przez skraplacz końcowy 4, z którego ciecz również spływa do generatora 1.

Stanowisko pokryto 40 mm warstwą azbestu, na którą nawinięto taśmę aluminiową i drut grzejny w celu wyeliminowania strat ciepła.

Strumień masy pary przepływającej przez kanał określano z sumy bilansów ciepła po stronie wody przepływającej przez skraplacz wstępny, skraplacz końcowy i badaną rurkę, a sprawdzano przy pomocy pomiaru mocy grzejników elektrycznych w generatorze pary.

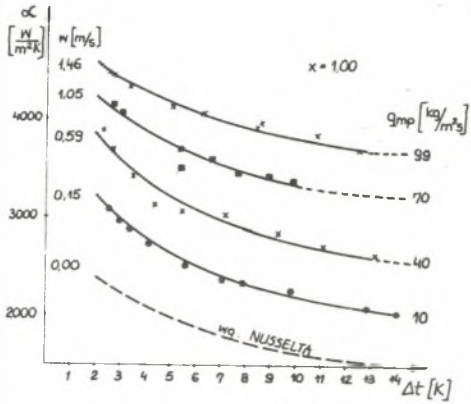
Różnice obliczonych wartości strumieni masy pary nie przekraczały 5%. Stopień suchości pary dopływającej do kanału określano jako stosunek strumienia masy cieczy skroplonej w skraplaczu wstępnym do całkowitego strumienia masy pary. Współczynnik wnikania ciepła obliczono przy pomocy bilansu ciepła dostarczanego przez rurkę badaną do wody chłodzącej oraz pomiaru różnicy temperatur między parą i ścianką rurki. Temperaturę ścianki rurki badanej mierzono ośmioma termoparami Cu-Ko umieszczonymi w dwóch przekrojach, odległych od siebie o 250 mm, po cztery na obwodzie rurki.

Temperaturę skraplania mierzono dwoma termoparami w ściance rurki zaślepionej i odizolowanej cieplnie od kanału, umieszczonej na dopływie pary do kanału.

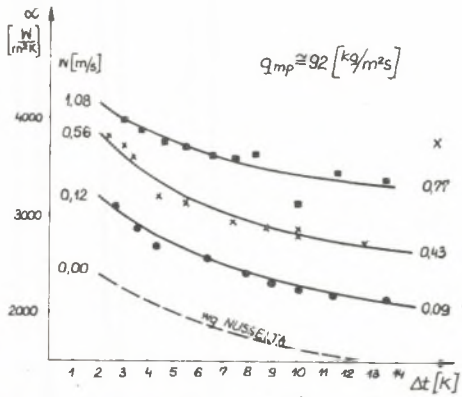
Termopary zostały ułożone w rowkach wyfrezowanych w ściance rurki, a ich spoiny znajdowały się bezpośrednio pod powierzchnią rurki.

4. Wyniki pomiarów

Wartości współczynnika wnikania ciepła α W/m^2 K w zależności od różnicy temperatur pary i ścianki rury Δt K oraz zagęszczenia strumienia masy pary q_{mp} kg/m^{2}s (obliczanego w najwęższym przekroju kanału), przy stałym stopniu suchości x = 1,00, przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Zależność $\alpha = f(\Delta t, q_{np})$ przy x = 1,00

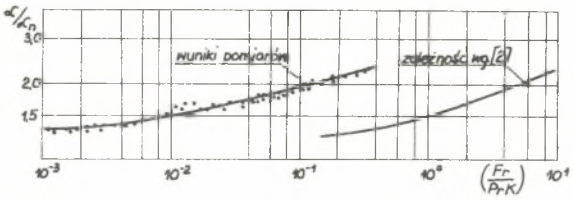


Rys. 6. Zależność $\alpha = f(\Delta t, x)$ przy q_{mp} = 92 (kg/m^{2}s)

Ze wzrostem prędkości pary współczynnik α rośnie tym silniej, im większa jest różnica Δt. Przy prędkości pary w = 1,46 m/s (obliczanej w tym samym przekroju co q_{mp}) współczynnik α jest proporcjonalny do różnicy temperatur Δt w potędze - 0,10, wobec zależności $\alpha \sim \Delta t^{-0,25}$ dla pary nieruchomej w = 0.

Na rys. 6 przedstawiono wartości współczynnika α w zależności od różnicy temperatur Δt i stopnia suchości pary x, przy

stałym zagęszczeniu strumienia masy q_{mp}. Przy krzywych podano również prędkość pary suchej w''. Porównanie rysunków 5 i 6 wskazuje, że zależność $\alpha = f(\Delta t, x, q_{mp})$ można zastąpić w badanym zakresie zależnością $\alpha = f(\Delta t, w'')$ z wystarczającą dokładnością. Wzrost współczynnika wnikania ciepła przy zmianie prędkości pary od 0,15 m/s do 1,46 m/s wynosi w zależności od Δt 65-80%.



Rys. 7. Zależność $\alpha/\alpha_n = f(Fr/PrK)$ wg badań własnych i Gogonina, Dorochowa

Wyniki pomiarów przedstawionych na rys. 5 i 6 zestawiono na rys. 7, w układzie współrzędnych $\frac{\alpha}{\alpha_n}$, $\frac{Fr}{PrK}$, na którym pokazano także zależność, będącą wynikiem badań [2] na stanowisku, którego odcinek pomiarowy przedstawia rys. 1, gdzie

α - współczynnik wnikania ciepła przy skraplaniu pary omywającej rurę z prędkością w

α_n - współczynnik wnikania ciepła przy skraplaniu pary nieruchomej wg Nusselta,

$Fr = \frac{w^2}{gd}$ w - prędkość pary

$Pr = \frac{\nu}{a}$ d - średnica rurki

$K = \frac{r}{C_p \Delta t}$ ν, a, r, C_p - własności fizyczne kondensatu.

Obydwie krzywe na rys. 7 mają podobny charakter, natomiast wartości stosunku $\frac{\alpha}{\alpha_n}$ odpowiadające określonej wartości parametru Fr/Pr K dla kanału poziomego z rurami są wyższe.

Prawdopodobną przyczyną tego jest postulowane przez Bermana zakłócenie czysto laminarnego spływu skroplin spowodowane przepływem pary w kanale o silnie zmiennym przekroju.

5. Wnioski

Wyniki wykonanych pomiarów są jakościowo zgodne z wynikami prac dotyczących wpływu prędkości pary na przekazywanie ciepła w filmie kondensa-

tu; wykładnik przy różnicy temperatur Δt ze wzrostem pary maleje podobnie, jak w wynikach badań [1], [2], [5]; niewielki rozrzut punktów wokół krzywej na rys. 7 wskazuje, że wyniki można przedstawić w postaci jednoparametrowej zależności $\frac{\alpha}{\alpha_0} = f(\frac{Fr}{Pr\ K})$, która wg [3] i [9] winna być słuszna zarówno przy laminarnym, jak i turbulentnym ruchu skroplin.

Otrzymane wartości stosunku $\frac{\alpha}{\alpha_n}$ przy prędkościach pary do 1,5 m/s potwierdzają możliwości wykorzystania wyników badań dla intensyfikacji procesu przekazywania ciepła w skraplaczach.

LITERATURA

[1] Berman L.D.: Iseliedowanie tiepłootdaczi pri kondensacii dwiżuszczegosja para na gorizontalnoj trubie, Tiepłoenergetika 10/1962.

[2] Gogonin I.I., Dorochow A.R.: Eksperymentalnoje iseledowanie tiepłoobmiena pri kondensacii dwiżuszczegosja para freona-21 na gorizontalnych cilindrach, PMTF 2/1976.

[3] Gogonin I.I., Dorochow A.R.: Tiepłoobmien pri kondensacii dwiżuszczegosja para freona-21 na gorizontalnoj trubkie, PMTF 2/1971.

[4] Fujii T., Uehara H., Kurata Ch.: Laminar filmwise condensation of flowing vapour on a horizontal cylinder, Int. J. of Heat and Mass Trans. V. 15 pp. 235-246, 1972.

[5] Iwanow O., Butyrskaja S.T., Mamczenko B.O.: Tiepłoobmien pri kondensacii dwiżuszczegosja para freona 12 na puczkach gładkich i oriebriennych trub, Chołodilnaja Tiechnika 9/1971.

[6] Szekriładze J.G., Gomelauri: Theoretical study of laminar film condensation of flowing vapour, Int. J. of Heat and Mass Trans. V. 9, pp. 581-591, 1966.

[7] Szekriładze J.G., Żorżoliani G.J.: Analiz procesa plenocznoj kondensacii dwiżuszczegosja para na gorizontalnom cylindrie, Inż.Fiz. Żurnał Tom 25, nr 1/1973.

[8] Schlichting H.: Grenzschicht-Theorie przekład rosyjski z piątego wydania niemieckiego, Moskwa 1974.

[9] Berman L.D.: O wlijani skorosti para na tiepłoobmien pri kondensacii PMTF 6/1971.

[10] Berman L.D.: O tiepłootdacze pri plenocznoj kondensacii dwiżuszczegosja para, Tiepłoenergetika 7/1966.

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ПЛЕНОЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ДВИЖУЩЕГОСЯ ПАРА ФРЕОНА 22 НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ, ПОМЕЩЁННОЙ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ЩЕЛИ

Р е з ю м е

В статье описывается стенд, методика и экспериментальные данные теплоотдачи при конденсации движущегося сухого и влажного пара на горизонтальной трубке, помещённой в горизонтальной щели (рис. 3).

Рост скорости сухого пара от 0,15 до 1,5 м/с вызывает увеличение коэффициента теплоотдачи на 65÷80% в зависимости от термического напора Δt.

Характер полученной зависимости подтверждает экспериментальные данные Гогонина и Дорохова [2], [3], которые исследовали теплоотдачу при конденсации движущегося пара в вертикальной щели.

INVESTIGATIONS OF HEAT TRANSFER AT FILM CONDENSATION OF FREON 22 ON A HORIZONTAL TUBE IN A HORIZONTAL DUCT AT FORCED VAPOUR FLOW

S u m m a r y

The paper presents an experimental stand, methodology and results of investigations of heat transfer on a horizontal tube placed in a horizontal duct (fig. 3) at forced flow of wet and dry vapour.

The increase of a dry vapour velocity from 0,15 to 1,5 m/s causes the increase of a heat transfer coefficient of about 65-80% in dependence on the value of the temperature difference Δt.

The obtained function of $\frac{\alpha}{\alpha_n}$ versus Fr/Pr K confirms the results of Gogonin end Dorochov [2], [3], who investigated heat transfer at vapour condensation on a tube placed in a vertical stream of dry vapour.