

Barbara DYBEK

e-mail: b.dybek@po.opole.pl

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Wnikanie ciepła przy przepływie dwufazowym ciecz – ciecz

Wprowadzenie

Znajomość warunków wymiany ciepła pomiędzy powierzchnią grzejącą lub chłodzącą a ciekłym rozproszonym układem dwufazowym jest szczególnie ważna wtedy, gdy poprzez zmianę temperatury chcemy wpływać na właściwości tego układu lub przebieg zachodzących w nim zjawisk. Sterowanie temperaturą ciekłej dyspersji pozwala np. wywołać efekt redukcji jej oporów przepływu, gdyż ujawnia się on w ściśle określonych warunkach. Są one związane z udziałem faz oraz strukturą przepływu dwufazowego, ale najbardziej istotna jest relacja lepkości cieczy tworzących sam układ [1]. Zmiana tej relacji jest możliwa jedynie na drodze zmiany temperatury całego układu, co realizowane jest najczęściej w rurowych wymiennikach ciepła. Tym samym możliwe staje się obniżenie zapotrzebowania na energię konieczną do tłoczenia ciekłej mieszaniny dwufazowej przez rurociągi, np. w procesach ekstrakcji lub procesach przetwarzania surowej ropy naftowej i smoły węglowej [2].

Możliwość sterowania temperaturą płynącego w rurze układu ciecz-ciecz wymaga m.in. opisu warunków wnikania ciepła podczas jego konwekcji wymuszonej. Tymczasem znane z literatury przedmiotu metody obliczeniowe dotyczą jedynie wnikania ciepła podczas przepływu układu gaz – ciecz oraz przypadku w pełni rozwiniętego wrzenia w przepływie. W odniesieniu do układu ciecz – ciecz stosunkowo dobrze poznane są jedynie warunki wnikania ciepła przy przepływie zaolejonych czynników chłodniczych [3, 4].

Ze względu na stosunkowo nieliczne wzmianki literaturowe dotyczące wymiany ciepła przy przepływie dwufazowym ciecz – ciecz podjęto badania własne, których celem była eksperymentalna ocena warunków wnikania ciepła od ścianki rury do cieczy dwufazowej.

Wnikanie ciepła w warunkach badań testowych

Instalacja badawcza, której schemat oraz zasadę działania opisano szczegółowo w pracy [5], umożliwia pomiar współczynnika wnikania ciepła w warunkach przepływu ciekłych mieszanin dwufazowych o strukturach przepływu typu O/W, W/O i W+O.

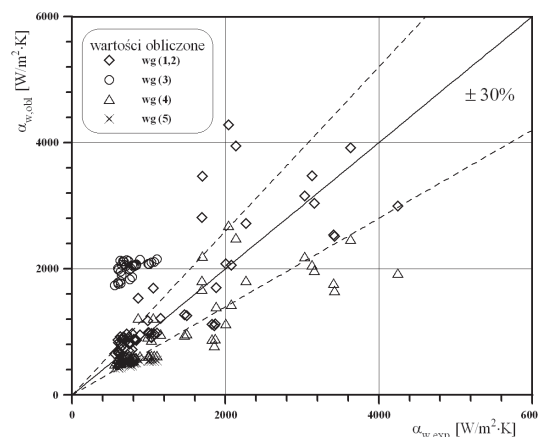
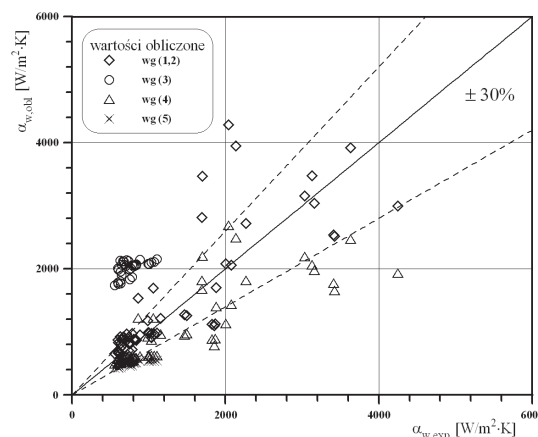
Badania zasadnicze poprzedzono pomiarami testowymi, których celem było sprawdzenie prawidłowości działania przyrządów pomiarowych oraz założonej metodyki wykonywania pomiarów. Testy prowadzono z wykorzystaniem czystych składników późniejszej mieszaniny dwufazowej, czyli wody i typowego smarowego oleju maszynowego. Mierzone wartości współczynnika wnikania ciepła α wynikały z natężenia strumienia ciepła q przekazywanego od ściany do cieczy i różnicy temperatur pomiędzy ścianą rury i płynem ΔT_{w-f} , czyli $\alpha = q/\Delta T_{w-f}$. Uzyskane dla wody i oleju wartości $\alpha_{w,exp}$ oraz $\alpha_{ol,exp}$ porównano z wynikami obliczonymi na podstawie równań podanych w pracy [6]. Są one powszechnie stosowane dla obliczania wartości jednofazowych współczynników wnikania ciepła i mają sprecyzowane zakresy stosowności. Równania te są omówione w pracy [6], a ich postać funkcyjną zamieszczono w tab. 1.

Wyniki badań testowych porównano z wartościami obliczonymi wg równań w tab. 1. Porównanie to ilustrują wykresy pokazane na rys. 1 i 2. Jak z nich wynika, problemem okazał się wybór metody obliczania α , która byłaby skuteczna w odniesieniu do wyników badań własnych. Wartości obliczane według różnych wykazywały spory rozrzut w stosunku do wartości zmierzonych.

Poza tym, charakter wyników uzyskanych według niektórych z metod okazał się wręcz odwrotny, np. wszystkie wartości z równania (3) były zawyżone, a z równania (5) zaniżone, względem wartości zmierzonych. Jednak pokazane w tab. 2 wyniki obliczeń statystycznych, odno-

Tab. 1. Równania wykorzystane do opisu warunków wnikania ciepła

Postać funkcyjna	Zakres
$Nu = 3,65 + \frac{0,068 \left(Re Pr \frac{d}{L} \right)}{1 + 0,045 \left(Re Pr \frac{d}{L} \right)^{2/3}} \quad (1)$	$Re < 2100$
$Nu = 0,166 \left(Re^{0,87} - 125 \right) Pr^{0,33} \left[1 + \left(\frac{d}{L} \right)^{2/3} \left[\frac{\eta}{\eta_{sc}} \right]^{0,14} \right] \quad (2)$	$2000 < Re < 10^5$
$Nu = 0,15 Re^{0,33} Pr^{0,43} Gr^{0,1} \left(\frac{Pr}{Pr_{sc}} \right)^{0,25} \quad (3)$	$Re < 2100$
$Nu = 1,86 \left(Re Pr \frac{d}{L} \right)^{0,33} \left[\frac{\eta}{\eta_{sc}} \right]^{0,14} \quad (4)$	$Re < 2100$
$Nu = 1,615 \left(Re Pr \frac{d}{L} \right)^{0,33} \left[\frac{\eta}{\eta_{sc}} \right]^{0,14} \quad (5)$	$Re < 2100$
$Nu = 0,00069 Re^{1,24} Pr^{0,5} \quad (6)$	$2000 < Re < 10^4$
$Nu = 0,012 \left(Re^{0,87} - 280 \right) Pr^{0,4} \left[1 + \left(\frac{d}{L} \right)^{2/3} \left[\frac{\eta}{\eta_{sc}} \right]^{0,14} \right] \quad (7)$	$2300 < Re < 10^4$

Rys. 1. Porównanie wartości $\alpha_{w,exp}$ z wartościami obliczonymi wg wybranych metod dla przepływu jednofazowego wodyRys. 2. Porównanie wartości $\alpha_{ol,exp}$ z wartościami obliczonymi wg wybranych metod dla przepływu jednofazowego oleju

śnie średniego błędę względnę δ oraz średniego rozrzutu $|\delta|$ wartości obliczonych względem zmierzonych, pozwoliły ustalić, że wyniki badań testowych najlepiej opisują równania (1) i (2).

Tab. 2. Statystyczna ocena zgodności równań z wynikami badań testowych

Równanie	δ , [%]	$ \delta $, %
Jednofazowy przepływ wody		
(1)	11,3	$\pm 14,2$
(2)	1,9	$\pm 28,7$
(3)	62,5	$\pm 62,5$
(4)	-29,6	$\pm 29,6$
(5)	-49,2	$\pm 49,2$
(6)	28,3	$\pm 31,5$
(7)	-83,7	$\pm 92,8$
Jednofazowy przepływ oleju		
(1)	8,0	$\pm 10,4$
(3)	39,4	$\pm 40,1$
(4)	42,1	$\pm 46,4$
(5)	-100,0	$\pm 100,0$

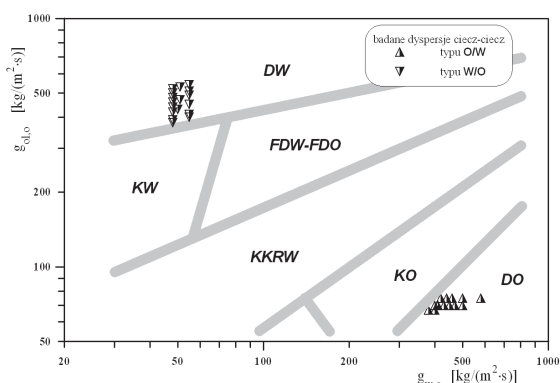
Co więcej, korzystanie z równania (1) okazało się skuteczne zarówno w stosunku do wody, jak i oleju. Zakres jego stosowalności jest zgodny z warunkami prowadzenia badań własnych, a wskazana przez autora dokładność obliczeń zawiera się w granicach $\pm 30\%$. Zdecydowanie lepszą dokładność pomiarów zapewnia stanowisko badawcze opisane w pracy [5]. Wydaje się zatem, że celowe będzie również korzystanie z równania (1) podczas prób opisu warunków wnikania ciepła w układzie ciecz – ciecz zgodnie z założeniami modelu dwufazowego układu homogenicznego.

Wnikanie ciepła podczas przepływu dwufazowego

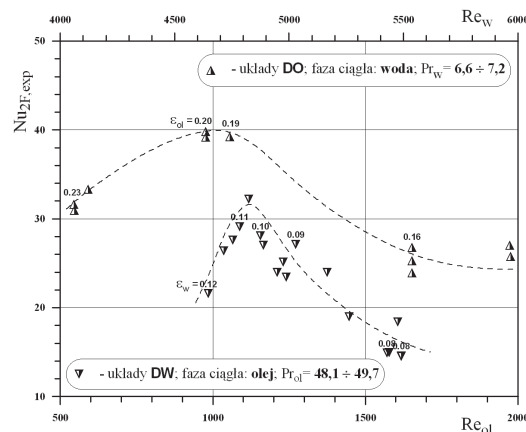
Badania nad wnikaniem ciepła przy przepływie dwufazowym dla struktury DW (układ W/O) przeprowadzono zmieniając odpowiednio strumienie oleju $G_{ol} = (1,6 \div 2,7) \text{ dm}^3/\text{min}$ i wody $G_w = (0,2 \div 0,25) \text{ dm}^3/\text{min}$. Dla struktury DO (układ O/W) parametry te wynosiły odpowiednio $G_{ol} = (0,38 \div 0,42) \text{ dm}^3/\text{min}$ i $G_w = (1,8 \div 2,4) \text{ dm}^3/\text{min}$. Przepływ odbywał się w rurze poziomej o średnicy $d = 10 \text{ mm}$.

Na rys. 3 pokazano fragment mapy struktur przepływu dla układu ciecz – ciecz – zaczerpniętej z pracy [1] – na której zaznaczono punkty odpowiadające natężeniom strumieni wody $g_{w,o} = 4G_w/(\pi d^2)$ i oleju $g_{w,o} = 4G_{ol}/(\pi d^2)$, przy których wykonano pomiary współczynnika wnikania ciepła. Jak wynika z mapy, badania prowadzono dla układów dwójakiego typu. W każdym z nich poziom rozproszenia jednej z faz był duży, co pozwala przyjąć założenie o homogeniczności płynących w rurze mieszanin dwufazowych.

Wyniki badań przedstawiono na rys. 4. Ilustruje on tendencję w rozkładzie punktów pomiarowych dla układów dwójakiego typu, przy czym na osi odciętych odłożono wartość liczby Nusselta, liczonej dla układów O/W jako $Nu_{2F,exp} = \alpha_{2F,exp} d/\lambda_w$, a dla układów W/O jako $Nu_{2F,exp} = \alpha_{2F,exp} d/\lambda_{ol}$. Osie rzędnych reprezentują wartości liczby Reynoldsa fazy ciągłej. Zdefiniowano je z uwzględnieniem sumarycznej prędkości mieszaniny dwufazowej: dla układów O/W jako $Re_w = w_{2F} d\rho_w/\eta_w$, a dla układów W/O jako $Re_{ol} = w_{2F} d\rho_{ol}/\eta_{ol}$.



Rys. 3. Zakres badań na tle mapy struktur przepływu dla układu ciecz-ciecz, wg [1]. D – dyspersja, K – krople, KKR – krople i korki, FD – film i dyspersja -W – wody, -O – oleju



Rys. 4. Zmiany $Nu_{2F,exp}$ w zależności od liczby Reynoldsa fazy ciągłej w układach typu O/W i W/O oraz udziału fazy rozproszonej

Jak wynika z rys. 4, intensywność wnikania ciepła jest większa w tych układach, w których fazą ciągłą jest woda. Jest to zrozumiałe, gdyż ze względu na jej właściwości fizyczne opór cieplny warstwy przyszybywej jest wtedy mniejszy, niż gdy fazą ciągłą stanowi bardziej lepki od wody olej.

Zastanawiający jest jednak efekt występowania lokalnych maksimum wartości Nu , zarówno w układach typu W/O, jak i O/W. Maksima te nie odpowiadają identycznym wartościom Re dla olejowej i wodnej fazy ciągłej. Jednak ich występowanie można tłumaczyć w podobny sposób. Badania własne prowadzono w odniesieniu do struktur dyspersyjnych, zarówno wody w oleju, jak i oleju w wodzie. Wzrost strumienia fazy ciągłej, przy stałym strumieniu fazy rozproszonej (Rys. 3), wywoływał wzrost intensywności mieszania układu w przepływie, a jednocześnie spadek udziału rozproszonych kropelek. Były to warunki korzystne do samoistnego tworzenia się trwałych układów emulsyjnych, w miejsce układów dyspersyjnych. Ruch ciepła w emulsjach jest tłumiony przez ich wysoką lepkość, co objawia się zarówno w układach typu O/W, jak i W/O. Zatem analizując rozkład punktów w obu seriach pomiarowych na rys. 4 należy mieć na uwadze, że w zakresie niższych wartości Re w rurze płynęły układy dyspersyjne, a w wyższych niemal całkowicie emulsyjne. Warto dodać, że podczas badań własnych górne zakresy strumieni faz odpowiadały warunkom trwałej emulgacji w przepływie, opisanym w pracy [1]. Pewien rozrzut punktów w każdej z serii pomiarowych należy również wiązać ze zmienną temperaturą ciekłej mieszaniny w różnych warunkach przepływu. Miało to wpływ na właściwości cieplne faz, wyrażone liczbą Prandtla.

Podsumowanie

Eksperymentalna ocena warunków wnikania ciepła przy przepływie układu ciecz – ciecz w rurze jest trudna i nie zawsze jednoznaczna. Mając jednak na uwadze wyniki badań własnych można założyć, że w warunkach przepływu ciekłych dyspersji o intensywności wnikania ciepła decydować będą głównie parametry fazy ciągłej. Jeżeli jednak w rurze zachodzić będzie proces emulgacji układu ciecz – ciecz, to bardziej istotne będą jego parametry jako całości.

LITERATURA

- [1] J. Hapanowicz: Przepływ ciekłych układów dyspersyjnych. Studia i Monografie 204, Politechnika Opolska, Opole 2007.
- [2] G. Filipczak: Teoretyczna i eksperymetalna ocena odparowania smoły w przepływie dwufazowym z para wodną. Studia i Monografie 206, Politechnika Opolska, Opole 2007.
- [3] S. Witzak: Półempiryczny model procesów ciepłno-przepływowych przy wrzeniu amoniaku w rurach. Studia i Monografie 91, Politechnika Opolska, Opole 1997.
- [4] S. Gat i in.: Int. Journal of Heat and Mass Transfer 52, (2009).
- [5] B. Dybek i in.: Inż. Chem. Proc., 3s, (2010).
- [6] W. M. Rohsenow i in.: Handbook of Heat Transfer, McGraw Hill, 1998.

Pracę zrealizowano w ramach projektu badawczego nr 3611/B/T02/2008/34 finansowanego ze środków na naukę w latach 2008–2011.