

BARBARA DYBEK

Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

# Podobieństwa i różnice w ruchu ciepła podczas przepływu dwufazowego gaz – ciecz i ciecz – ciecz

## Wprowadzenie

Określenie wielkości strumienia ciepła transportowanego od lub do ściany rury podczas ogrzewania lub chłodzenia płynącej w niej mieszaniny dwufazowej jest realizowane głównie na drodze empirycznej. Takie podejście wynika ze złożoności zjawisk hydrodynamicznych towarzyszących przepływowi dwufazowemu, np. ze zróżnicowania struktur przepływu. Jednak opracowane w ten sposób modele empiryczne obowiązują najczęściej dla określonych układów dwufazowych i warunków procesowych. Znaczna większość dostępnych w literaturze metod dotyczy przepływu układów gaz – ciecz i obejmuje procesy wrzenia lub kondensacji. Niewiele jest natomiast równań opisujących ruch ciepła w układach ciecz – ciecz, tworzonych przez fazy o identycznym stanie skupienia i bardzo zbliżonych właściwościach fizycznych, w trakcie przepływu których nie następują przemiany fazowe.

## Metody obliczania warunków wnikania ciepła w przepływie dwufazowym

W tabelicy 1 zestawiono równania opisujące proces wnikania ciepła w warunkach przepływu dwufazowego, któremu nie towarzyszy zmiana stanu skupienia składników mieszaniny. Jak już wcześniej wspomniano, w literaturze przedmiotu dostępne są głównie równania odnoszące się do układów gaz-ciecz. W celu adaptacji tych równań dla układów ciecz-ciecz zastąpiono w nich parametry fazy gazowej parametrami fazy ciekłej o mniejszej gęstości, którą w ciekłej mieszaninie stanowi zwykle hydrofobowy składnik olejowy.

Jak wynika z budowy równań prezentowanych w tabelicy 1, proste przeniesienie równań proponowanych dla układów gaz-ciecz na układy ciecz – ciecz może budzić pewne wątpliwości. Wynikają one m.in. z odmiennych relacji pomiędzy właściwościami faz tworzących oba układy. Z tego względu równania (2)–(4), (6) uwzględniają jedynie wartość  $Pr$  dla wody. W układzie gaz-ciecz wartość  $Pr$  gazu jest niewielka, ale w układzie ciecz-ciecz odpowiadający jej parametr  $Pr_{ol}$  powinien być uwzględniony. Również relacje lepkości uwzględnione w równaniach (2)–(4) są zupełnie inne w układzie gaz-ciecz niż w ciecz – ciecz, gdyż zwykle lepkość fazy olejowej jest wielokrotnie większa niż wodnej, a lepkość gazu w stosunku do cieczy jest niewielka. W układzie ciecz – ciecz bardzo wyraźne jest zjawisko inwersji faz. Stąd też jednoznaczne definiowanie względnej wartości  $\alpha_{2F}$  w równaniach (1), (8)–(10) nie wydaje się zbyt poprawne. Z podobnych względów jednoznaczne wyrażanie w równaniach (2)–(5) poziomu burzliwości fazy wodnej lub olejowej poprzez wartość  $Re$  nie wydaje się uzasadnione bez uwzględnienia tego, która z tych faz stanowi ośrodek ciągły dla rozproszonych elementów fazy drugiej. Problematiczne dla układów ciecz-ciecz wydaje się

również ustalanie wartości zastępczych parametrów  $Re$  lub  $Pr$  w równaniach (6), (7), gdyż wymaga to trudnej do określenia lepkości układu ciecz – ciecz oraz jego rzeczywistego składu, zależnego od wyraźnie ujawniającego się w tym układzie poślizgu faz.

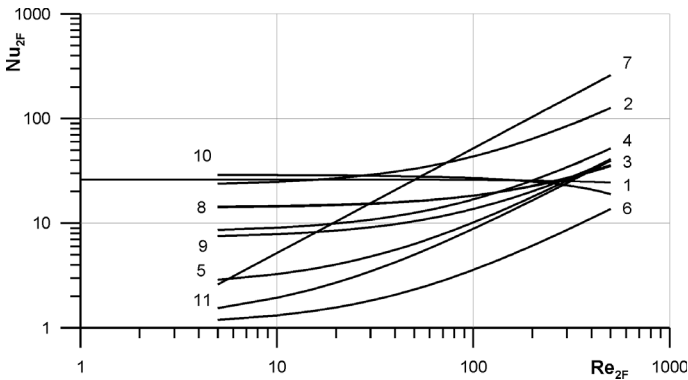
Mając powyższe na uwadze, pomimo ogólnego podobieństwa zjawisk przepływowych w układach gaz-ciecz i ciecz-ciecz, proste przeniesienie opisu warunków wnikania ciepła z jednego układu na drugi może skutkować znacznymi błędami. W celu oceny wielkości tych błędów dokonano obliczeń sprawdzających, wykorzystując zakres danych eksperymentalnych prezentowanych przez autora pracy [2].

Zakładając homogeniczność układu ciecz – ciecz, na rys. 1 przedstawiono wykres obrazujący wpływ liczby *Reynoldsa* na wartość liczby *Nusselta*.

Przebieg linii wykreślono w zakresie danych eksperymentalnych przyjmując, że:

**Tabela 1**  
Metody wyznaczania współczynnika wnikania ciepła zaadaptowane dla przepływu dwufazowego ciecz – ciecz

Nr	Autor	Równanie
1	Palugniok [1]	$\frac{\alpha_{2F}}{\alpha_w} = 1 - \left(1 - \frac{\alpha_{ol}}{\alpha_w}\right) \frac{\varepsilon_{ok}}{\varepsilon_{vwo}}$
2	Kudrika [2]	$Nu_{2F} = 125 Re_{w,0}^{0,25} Pr_w^{0,33} \left(\frac{w_{ol,0}}{w_{w,0}}\right)^{0,3} \left(\frac{\eta_{ol}}{\eta_w}\right)^{0,6} \left(\frac{\eta}{\eta_{sc}}\right)^{0,14}$
3	Goldbold [2]	$Nu_{2F} = 0,56 Re_{w,0}^{0,6} Pr_w^{0,33} \left(\frac{w_{ol,0}}{w_{w,0}}\right)^{0,3} \left(\frac{\eta_{ol}}{\eta_w}\right)^{0,2} \left(\frac{\eta}{\eta_{sc}}\right)^{0,14}$
4	Elamvaluthi [2]	$Nu_{2F} = 0,5 Re_{w,0}^{0,7} Pr_w^{0,33} \left(\frac{\eta_{ol}}{\eta_w}\right)^{0,25} \left(\frac{\eta}{\eta_{sc}}\right)^{0,14}$
5	Zimmerman [3]	$Nu_{2F} = 2,5 (Fr_w Re_{ol,0})^{0,428}$
6	Groothuis [2]	$Nu_{2F} = 0,029 Re_{2F}^{0,87} Pr_w^{0,33} \left(\frac{\eta}{\eta_{sc}}\right)^{0,14}$
7	Kazama [2]	$Nu_{2F} = 8,7 Re_{2F}^{0,25} Pr_{2F}^{0,4} (1 - \varepsilon_{ol})^{1/8}$
8	Sims [2]	$\frac{\alpha_{2F}}{\alpha_w} = \left(\frac{1}{1 - \varepsilon_{ol}}\right)^{0,5}$
9	Witczak [4]	$\frac{\alpha_{2F}}{\alpha_E} = \frac{1}{1 + \Psi}; \Psi = 1,27 x_w^{0,54} x_{ol}^{0,81} \left(\frac{\alpha_w}{\alpha_{ol}}\right)^{0,55}$
10	Hestroni [5]	$\frac{\alpha_{2\Phi}}{\alpha_{ok}} = 1 + 4,8 \left(Fr_w \frac{w_{ol}}{w_w}\right)^{0,57}$
11	Ullman [6]	$Nu_{2F} = 0,6 + 0,87 Ra^{1/6} \left[1 + \left(\frac{0,599}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{-8/27}$



Rys. 1. Wartości liczby Nusselta wg równań z tablicy 1

$$Re_{2F} = \frac{w_{2F} d \rho_{2F}}{\eta_{2F}} \quad (12)$$

$$\rho_{2F} = \varepsilon_w \rho_w + \varepsilon_{ol} \rho_{ol}; \quad \eta_{2F} = \varepsilon_w \eta_w + \varepsilon_{ol} \eta_{ol} \quad (13)$$

$$\varepsilon_w = 1 - \varepsilon_{ol} = V_{2F} / A \quad (14)$$

Jak wynika z rys. 1, przebieg linii wykazuje w większości przypadków zbliżony charakter (za wyjątkiem 1, 7, 10), jednak różnice pomiędzy wartościami  $Nu$  są znaczne.

W celu oceny dokładności otrzymanych wyników wyznaczono średni błąd względny wartości obliczonych i zmierzonych podczas eksperymentu (Tablica 2):

$$\left| \overline{\delta \alpha_{2F}} \right| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\alpha_{2F, zm} - \alpha_{2F, obl}|}{\alpha_{2F, zm}} \quad (15)$$

Uwzględniając wyniki przeprowadzonej analizy należy stwierdzić, że w zakresie przeprowadzonych obliczeń najlepszą zgodność z danymi doświadczalnymi zapewnia metoda Kudriki [2] opisana równaniem (2) oraz metoda Elmalvaluthi [2] opisana równaniem (4). Dla tych metod ponad 90% punktów mieści się w przedziale poniżej 30% błędu względnego. Obydwa równania przedstawione są za pomocą podobnej korelacji, uwzględniającej właściwości fizyczne obu faz.

Analiza błędów poszczególnych równań potwierdza, że definiowanie względnej wartości w równaniach (1), (8)–(10) nie wydaje się poprawne. Potwierdza to, że ważnym zjawiskiem dla przepływu ciecz – ciecz jest inwersja faz.

### Podsumowanie

Przeprowadzona w pracy próba wykorzystania dostępnych w literaturze metod obliczania warunków wnikania ciepła podczas przepływu dwufazowego wykazała, że pomimo podobieństwa zjawisk przepływowych towarzyszących układom gaz – ciecz i ciecz – ciecz, przeniesienie opisu warunków wnikania ciepła z jednego układu na drugi nie przynosi zadowalających rezultatów. Wynika to ze specyfiki układu dwufazowego ciecz – ciecz i towarzyszących temu przepływowi wielu osobliwości mających znaczący wpływ na proces wnikania ciepła.

Tablica 2  
Ocena dokładności metod obliczania warunków wnikania ciepła wg wybranych metod

nr	Metoda	$ \overline{\delta \alpha_{2F}} , [\%]$
1	Palugniok	45,4
2	Kudrika i in.	24,5
3	Goldbold i in.	56,8
4	Elmalvaluthi i in.	28,05
5	Zimmerman i in.	154,87
6	Groothuis i in.	292
7	Kazama i in.	63,02
8	Sims i in.	37,82
9	Witczak	32,95
10	Hestroni i in.	62,81
11	Ullman i in.	60,07

### Oznaczenia

$\alpha$  – współczynnik wnikania ciepła,  $[W/(m^2K)]$ ,  
 $\varepsilon$  – udział objętościowy,  
 $\eta$  – dynamiczny współczynnik lepkości,  $[Pa \cdot s]$ .

### Indeksy

$\acute{s}$  – ściana,  
 $inw$  – stan inwersji,  
 $ol$  – olej,  
 $w$  – woda,  
 $2F$  – dwufazowy.

### Liczby kryterialne

$$Re = \frac{wd\rho}{\eta}$$

$$Pr = \frac{c_p d}{\lambda}$$

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$$

$$Ra = \frac{\tilde{g} \Delta \rho d^3}{\eta \alpha}$$

$$Fr = \frac{w^2}{\tilde{g} L}$$

### LITERATURA

1. H. Palugniok, L. Troniewski: Inż. Ap. Chem. 11, nr 1, 22 (1972).
2. R. Świtła: Praca magisterska WSI, Opole 1994.
3. R. Zimmerman, M. Gurevich, A. Mosyak, R. Rozenblit, G. Hestroni: Int. Journal of Multiphase Flow 32, 1 (2006).
4. S. Witczak: Półempiryczny model procesów ciepło-przepływowych przy wrzeniu amoniaku w rurach, Wyd. Politechniki Opolskiej, 1997.
5. G. Hestroni, D. Mewes, C. Enke: Int. Journal of Multiphase Flow 29, 173 (2003).
6. S. Gat, N. Brauner, A. Ullman: Int. J. of Heat and Mass Transfer 52, 1385 (2009).

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