

Marcin KARAŚ, Roman ULBRICH, Daniel ZAJĄC

e-mail: m.karas@doktorant.po.edu.pl

Katedra Inżynierii Środowiska, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

## Badania przenoszenia pędu i ciepła przy opływie rur w wymienniku ciepła

### Wstęp

Jednym z wielu czynników wpływających na sprawność urządzeń do wymiany ciepła jest konwekcyjny współczynnik wnikania ciepła  $\alpha$ . Współczynnik ten wyznacza się zwykle doświadczalnie ze względu na trudność jego wyznaczenia w sposób analityczny. Jednym ze sposobów jego wyznaczenia jest zastosowanie metody opartej na analogii przepływu masy i ciepła z wykorzystaniem elektrolizy. W literaturze można spotkać niewiele prac wykorzystujących tę metodę do badania urządzeń do wymiany ciepła. W pracy [Wilk, 2009] zastosowano technikę elektrolizy do badania transportu masy i ciepła w mini kanałach, natomiast w pracy [Siejka, 2006] zbadano nierównomierność wymiany ciepła w pęku rur wymiennika ciepła o konwencjonalnych wymiarach.

Niniejsza praca stanowi opis wykorzystania jednocześnie metody wizualizacji obrazu PIV [Iwaki i in., 2005] z techniką elektrolizy. Takie połączenie ma na celu identyfikację i opis tworzących się struktur przepływu z jednoczesną oceną ich wpływu na nierównomierność rozkładu współczynnika wnikania ciepła na powierzchni rur umieszczonych w pęku.

### Stanowisko pomiarowe

Badaniom poddano dwa układy pęków rur wykonane z pleksiglasu. Pierwszy z nich z równoległym układem rurek, drugi z przestawnym. W dolnej części wymiennika znajdowała się komora mieszania obydwu faz. Średnica rurek wynosiła 15 mm, a podziałka  $t/d = 1,33$ .

Obszar przepływu oświetlano laserem ciągłym o mocy 1 W, wytwarzający wiązkę światła o długości fali  $\lambda = 532$  nm. Oświetlony przepływ rejestrowano kamerą CMOS w rozdzielczości 1024×1024 pikseli. Obrazy przepływu zapisywano bezpośrednio w postaci map bitowych a ich rejestracja odbywała się z częstotliwością 462 Hz.

Do wykonania pomiaru natężenia prądu zastosowano układ elektrod niklowych. Elektrody zanurzono w wodnym roztworze potasu, anoda w postaci niklowanej siatki znajdowała się przy wypływie elektrolitu z wymiennika, a jako katodę zastosowano niklowane blaszki miedziane usadzone na obwodzie rurki którą można zastąpić dowolną rurką w pęku. Zastosowany układ elektryczny pozwalał na dostarczenie określonego, skokowo rosnącego i stabilizowanego napięcia prądu stałego, płynącego przez roztwór elektrolitu pomiędzy katodą i anodą. Zastosowano układ trzech modułów analogowych. Zadaniem pierwszego z nich było przyłożenie do układu prądu o założonym i rosnącym napięciu prądu, pozostałe dwa moduły odpowiadały za odczytanie wartości natężenia prądu na każdej z blaszek z obwodu rurki.

W celu odpowiedniego sterowania wszystkimi modułami napisano oprogramowanie z wykorzystaniem środowiska programistycznego LabVIEW. To umożliwiło określenie takich wartości jak minimalne i maksymalne wartości napięcia prądu, oraz jego skok. Wszystkie dane były archiwizowane natychmiast po pomiarze w postaci pliku tekstowego. Sterowanie i archiwizacja odbywały się za pomocą stacji pomiarowej.

### Metodyka badań

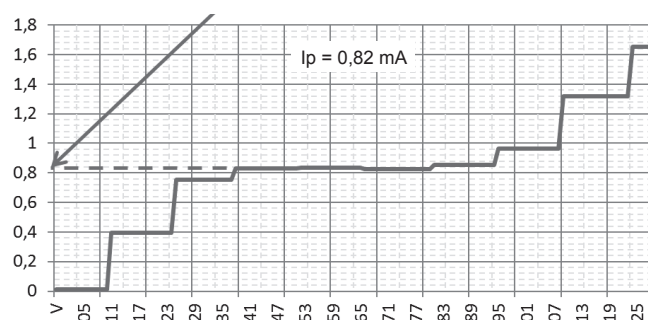
Pomiary wykonano dla trzech różnych strumieni objętości gazu i cieczy, dla fazy ciekłej wynosiły odpowiednio 200, 400 i 600 dm<sup>3</sup>/h, dla gazu 05, 10 i 20 dm<sup>3</sup>/h (Tab. 1). Serie pomiarowe przeprowadzono dla układu przestawnego i równoległego. Obrazy rejestrowano makro obiektywem tak aby uzyskać pola prędkości wokół pojedynczych rurek. Pomiary metodą elektrochemiczną polegają na rejestracji wartości natężenia przy zmianie napięcia prądu elektrycznego w trakcie kontrolowanej dyfuzji jonów przy elektrodzie. Do pomiarów

wykorzystano elektrody zanurzone w roztworze równomolowej mieszaniny K<sub>3</sub>Fe(CN)<sub>6</sub> i K<sub>4</sub>Fe(CN)<sub>6</sub>, w obecności wodorotlenku sodu jako elektrolitu podstawowego.

Tab. 1 Oznaczenia i wartości strumieni dla przeprowadzonych pomiarów

Układ równoległy				Układ przestawny			
No.	Symbol	$\dot{V}_L$	$\dot{V}_G$	No.	Symbol	$\dot{V}_L$	$\dot{V}_G$
		dm <sup>3</sup> /h	dm <sup>3</sup> /h			dm <sup>3</sup> /h	dm <sup>3</sup> /h
1	L20G05L	200	05	1	L20G05S	20	05
2	L20G10L	200	10	2	L20G10S	20	10
3	L20G20L	200	20	3	L20G20S	20	20
4	L40G05L	400	05	4	L40G05S	40	05
5	L40G10L	400	10	5	L40G10S	40	10
6	L40G20L	400	20	6	L40G20S	40	20
7	L60G05L	600	05	7	L60G05S	60	05
8	L60G10L	600	10	8	L60G10S	60	10
9	L60G20L	600	20	9	L60G20S	60	20

Po podłączeniu źródła stałego, stabilizowanego napięcia pomiędzy elektrodami powstaje obwód elektryczny. Początkowo natężenie prądu wzrasta wraz z ze wzrostem napięcia, aż do momentu zajścia dyfuzji kontrolowanej przy której zachodzi transport elektronów na powierzchni elektrod, a wartość natężenia prądu jest stała (Rys. 1).



Rys. 1. Przykład rejestracji prądu plateau

Ta wartość natężenia jest zwana *prądem plateau*. Wykorzystuje się do obliczeń współczynnika wnikania masy wg wzoru:

$$\beta = \frac{I_p}{n_e F A C_b} \quad (1)$$

gdzie:

$\beta$  – współczynnik wnikania masy [kmol/m<sup>2</sup>s],

$I_p$  – natężenie prądu plateau [A],

$n_e$  – elektronowość reakcji elektrodowej [-],

$F$  – stała Faradaya [A·s/kmol],

$A$  – powierzchnia katody [m<sup>2</sup>],

$C_b$  – stężenie jonów w masie elektrolitu [mol/dm<sup>3</sup>].

Wykorzystując analogię *Chiltona-Colburna* między wymianą masy i ciepła [Chilton i Colburn, 1934] wyliczono wartości lokalnych współczynników wnikania ciepła na powierzchni badanych rur:

$$\alpha = \beta \rho c_p \left( \frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} \quad (2)$$

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} \quad (3)$$

gdzie:

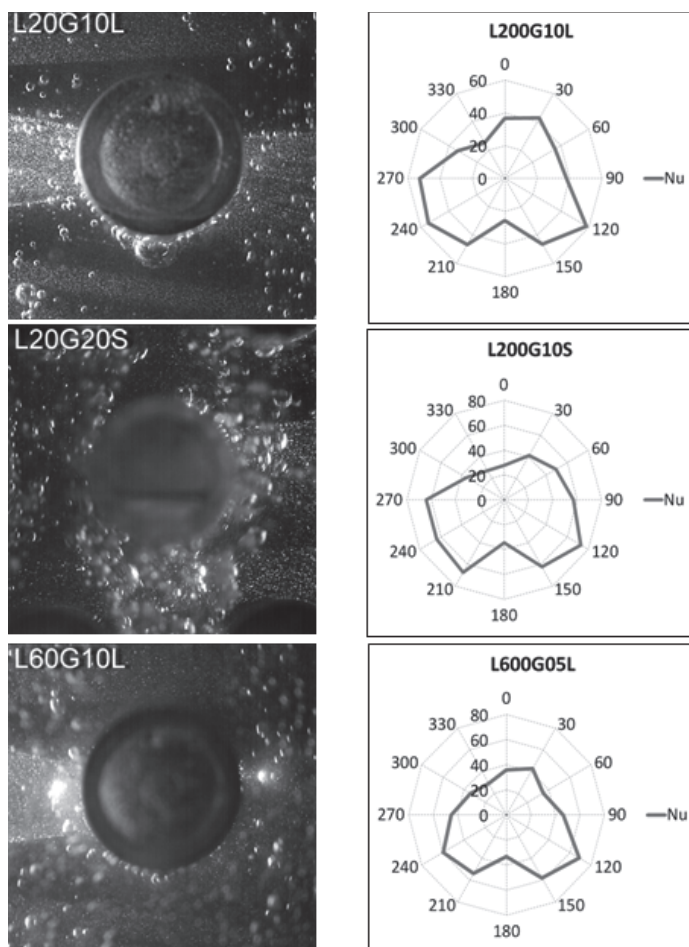
$\alpha$  – współczynnik wnikania ciepła [W/m<sup>2</sup>K],

$\lambda$  – współczynnik przewodzenia ciepła [W/mK],

$\rho$  – gęstość elektrolitu [ $\text{kg/m}^3$ ],  
 $Sc$  – liczba Schmidta,  
 $Pr$  – liczba Prandtla,  
 $Nu$  – liczba Nusselta.

Pola prędkości przepływu płynu wokół badanych rur określono metodą PIV. Cyfrowa anemometria obrazowa DPIV jest metodą polegającą na rejestracji wprowadzonych w obszar przepływu znaczników (Rys. 2). Porównanie dwóch kolejnych obrazów oraz określenie dla nich współczynnika korelacji pozwala na stworzenie chwilowego wektorowego pola prędkości.

Obrazy w postaci map bitowych uzyskane bezpośrednio z rejestracji przedstawione na rys. 3 analizowano za pomocą przygotowanego w środowisku *Matlab* oprogramowania. Analiza ta polegała na wyznaczeniu wektora przesunięcia znaczników przepływu w kilku kolejnych obrazach za pomocą funkcji korelacji krzyżowej. W wyniku analizy otrzymano wektorowe pola prędkości.



Rys. 2. Przykładowe zdjęcia przepływu

Rys. 3. Rozkład liczby  $Nu$  wokół rur dla różnych strumieni

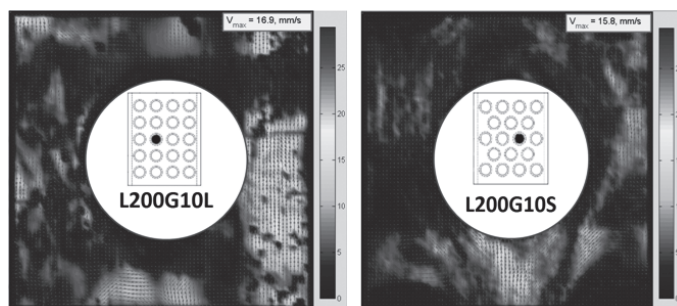
Pomiary wartości natężenia i napięcia prądu w metodzie elektrochemicznej wykonano jednocześnie z rejestracją obrazów wykorzystanych w obliczeniach metodą PIV.

## Wyniki pomiarów

Pola prędkości wokół pojedynczej rurki pokazują jednakowy sposób przepływu cieczy po bokach rurki. Nie zaobserwowano większych zmian prędkości przy zmianie wartości strumienia objętości poszczególnych faz. Maksymalna zarejestrowana prędkość wynosiła 22 mm/s. Widoczne są lokalne wzrosty prędkości cieczy spowodowane przepływającym pęcherzykiem powietrza. W miejscach tych prędkość znaczników była zbyt wysoka, żeby wyznaczyć pole prędkości.

Przepływ badanej mieszaniny faz zarówno dla układu równoległego jak i przestawnego charakteryzował się większymi prędkościami

przepływu w obszarach po bokach rur oraz w czołowej części rur. W strefach za rurami zaobserwowano obszary o mniejszej wartości prędkości, strefy stagnacji przepływu, czy opadający kierunek przepływu. Zaobserwowano liczne struktury wirowe. Większą liczbę tego typu struktur zaobserwowano dla układu przestawnego, również miejsce ich występowania dla tego układu było mniej regularne.



Rys. 3. Przykładowe pola prędkości wokół wybranych rur

Wyniki badań metodą elektrochemiczną przedstawiono w postaci wykresów lokalnych liczb *Nusselta*, będących bezwymiarowymi odpowiednikami współczynników wnikania ciepła. Najwyższe wartości dla większości badanych przypadków można było zaobserwować w czołowej części rury, czyli w miejscu gdzie występowała największa prędkość i najmniejsza grubość warstwy laminarnej. W tylnej części rury wartość liczby *Nusselta* jest zdecydowanie mniejsza. Porównując układ rur równoległy z przestawnym widać wyraźny obszar znajdujący się od czoła rury, gdzie dla układu równoległego wartości  $Nu$  były niższe niż po bokach. Występują dwa wyraźne maksima w okolicach  $120^\circ$  i  $240^\circ$ . Ma to związek z mniejszą prędkością strugi mieszaniny dwufazowej spowodowaną położeniem poprzedzającej rury.

## Wnioski

W celu uniknięcia zakłóceń powodowanych przez cień rzucony przez rurki w badaniach metodą DPIV należy zastosować synchronizację częstotliwości pulsowania światła laserowego z częstotliwością rejestracji kamery. Innym rozwiązaniem jest rozszczepienie wiązki światła na dwie płaszczyzny i oświetlenie obszaru badawczego pod różnym kątem.

Przestawny układ rur charakteryzował się większą równomiernością rozkładu współczynnika wnikania ciepła, rzadziej też dla tego układu występowało minimum na czole rury, tak charakterystyczne dla układu równoległego.

Rozkład krzywych polaryzacyjnych zmienia się wraz z prędkością przepływu płynu. Można wnioskować, że znaczny wpływ na nierównomierność rozkładu współczynnika wnikania ciepła na powierzchni rury ma stochastyczny charakter przepływu dwufazowego. Przepływ pęcherzy znaczenie oddziałuje na prędkość przepływu fazy ciekłej, co ma wpływ na intensywność wymiany masy i ciepła.

Zauważono chaotyczny sposób poruszania się faz tuż za rurkami. W tych miejscach występowało tworzenie, łączenie i zanikanie wirów, ruch mieszaniny we wszystkich kierunkach, stagnację przepływu czy też zmiany prędkości lokalnych przy niezmiennych strumieniach faz doprowadzonych do układu. Strefy stagnacji zmieniały swoją objętość oraz położenie w trakcie pomiarów przy niezmiennych wartościach strumieni faz.

## LITERATURA

- Chilton T.H., Colburn A.P. 1934. Mass transfer (absorption) coefficients prediction from data on the heat transfer and fluid friction. *Ind. Eng. Chem.*, **26**, 1183-1187. DOI: 10.1021/ie50299a012
- Iwaki C., Cheong K. H., Monji H., Matsui G., 2005. Vertical, Bubbly, Cross-Flow Characteristics over Tube bundles. *Experiments in Fluids*, **39**, 1024-1039. DOI: 10.1007/s00348-004-0823-1
- Siejka K., 2006. *Nierównomierność wymiany ciepła w pęku rur przy przepływie dwufazowym*. Praca doktorska, Pol. Opolska, Opole
- Wilk J., 2009. Experimental investigation of convective mass/heat transfer in short minichannel at low Reynolds numbers. *Experimental Thermal and Fluid Science* **33**, 267-272. DOI: 10.1016/j.exptthermfluidsci.2008.09.006