

Marcin KARAS¹, Daniel ZAJĄC², Roman ULBRICH²

e-mail: karas@spm.pl

Katedra Inżynierii Środowiska, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Identyfikacja struktur przy przepływie gaz – ciecz w wymienniku ciepła o niewielkich rozmiarach z wykorzystaniem cyfrowej anemometrii obrazowej DPIV

Wstęp

Zjawisko przepływu gaz ciecz wokół pęku rur występuje w wielu procesach przemysłowych. Tworzące się i towarzyszące przepływowi wiry, przepływające pęcherze gazu, czy strefy martwe mają wpływ na intensywność wymiany ciepła, masy, możliwość osadzania się kamienia, korozję, czy spadek ciśnienia. Przy próbach scharakteryzowania przepływu problemy stwarza jego skomplikowany charakter. Przepływ dwóch faz różni się znacząco od przepływu jednofazowego. Oprócz scharakteryzowania przepływu jako laminarny, czy turbulentny należy określić również jego strukturę. Należy pamiętać o zjawiskach typowych dla przepływu dwufazowego, takich jak: poślizg faz powstający w skutek różnej prędkości przepływu faz, zmienne lokalne prędkości przepływu, gęstości poszczególnych faz, rodzaj powierzchni rozdziału faz. Niejednokrotnie w procesach wymiany ciepła zachodzi przemiana fazowa. Proces wymiany masy często wymaga rozwinięcia powierzchni międzyfazowej.

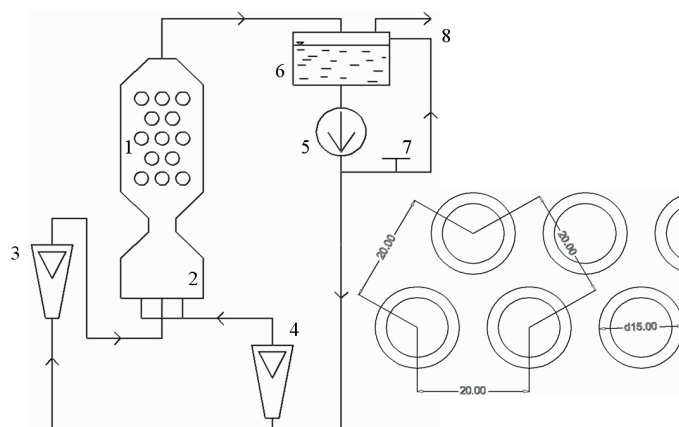
W ciągu kilku ostatnich lat przeprowadzono badania nad przepływem dwu- i jednofazowym techniką cyfrowej anemometrii obrazowej DPIV z wykorzystaniem kamer o dużej prędkości rejestracji obrazu w wysokiej rozdzielczości. Bin i Liejin [1] przeprowadzili badania nad przepływem wokół pęku rur. Opisali tworzące się wiry, porównali przepływ w przestrzeni międzyrurowej z przepływem wokół pojedynczej rury, przeprowadzili analizę statystyczną fluktuacji prędkości w strefach stagnacji przepływu. Burnside i in. [2] wykorzystali metodę PIV do badań nad wrzącym pentanem w modelu płaszczowo rurowego wymiennika ciepła. W tej pracy autorzy scharakteryzowali przepływ płynu nie w przestrzeni międzyrurowej, a przy samym płaszczu wymiennika. Iwaki i in. [5, 6] przeprowadzili analizę przepływu dwufazowego wokół pęku rur dla przestawnego jak i szeregowego układu rur. Wyznaczyli pola prędkości oddzielnie dla obydwu faz. Chen i Guo [3] przeprowadzili analizę formowania się, łączenia i zanikania wirów Harmana w przestrzeni międzyrurowej. Elvis i Yassin [4] zbadali przepływ cieczy wzdłuż modelu prętów paliwowych stosowanych w elektrowniach jądrowych.

W tej pracy przedstawiono wyniki badań przepływu dwufazowego woda-powietrze w modelu płaszczowo rurowego wymiennika ciepła.

Stanowisko pomiarowe

Do badań przepływu wykorzystano cyfrową anemometrię obrazową DPIV (*Digital Particle Image Velocimetry*). Zastosowano algorytm obliczeniowy którego zadaniem było wyznaczenie współczynników korelacji rozkładu cząstek znacznikowych w poszczególnych fragmentach kolejnych obrazów, oraz ich zamiana na pola prędkości. Przepływ faz rejestrowano kamerą cyfrową a uzyskane obrazy dzielono na poszczególne sekcje. Rozkład cząstek w poszczególnych sekcjach jest porównywany na kolejnych obrazach za pomocą funkcji korelacji krzyżowej, co pozwoliło na wyznaczenie wektorów prędkości.

Schemat stanowiska pomiarowego pokazano na rys. 1. Badaniom poddano model płaszczowo rurowego wymiennika ciepła wykonanego z pleksiglasu z trójkątnym, przestawnym układem rurek – 1. Średnica rurek wynosiła 15 mm, a podziałka $t/d = 1,33$. Z sieci doprowadzono strumień powietrza mierzony rotametrem – 3. Ciecz z umieszczonymi znacznikami płynęła w obiegu zamkniętym, przed



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

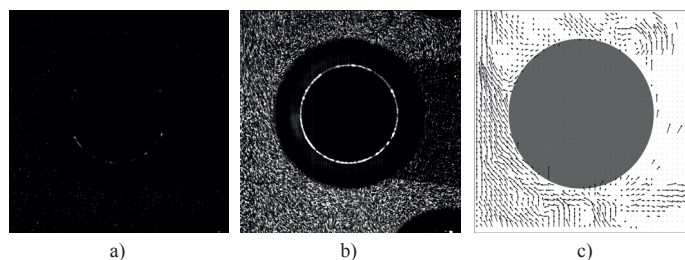
wplynięciem do wymiennika strumień cieczy mierzony rotametrem – 4. W dolnej części wymiennika znajdowała się komora mieszania obydwu faz – 2. Przy braku regulacji obrotów pompy, regulacja strumienia cieczy odbywała się poprzez obieg zwrotny (*bypass*) – 7. Po wypłynięciu z wymiennika mieszanina dwufazowa wpływała do zbiornika w którym zachodził rozdział faz – 6, gaz oddawany był do atmosfery – 8, ciecz krążyła z powrotem do pompy – 5.

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, ich rejestracja odbywała się z częstotliwością 462 Hz.

Metodologia pomiarów

Pomiary wykonano dla trzech różnych strumieni objętości gazu i cieczy, dla fazy ciekłej wynosiły odpowiednio 50, 75 i 100 l/h, dla gazu 10, 30 i 50 l/h. Obrazy rejestrowano makro obiektywem tak aby uzyskać pola prędkości wokół pojedynczych rurek, oraz dla przestrzeni międzyrurowej w celu dokładnej charakterystyki stref stagnacji. Analizie poddano losowo wybrane obrazy dla każdego z ustawień strumieni objętości faz.

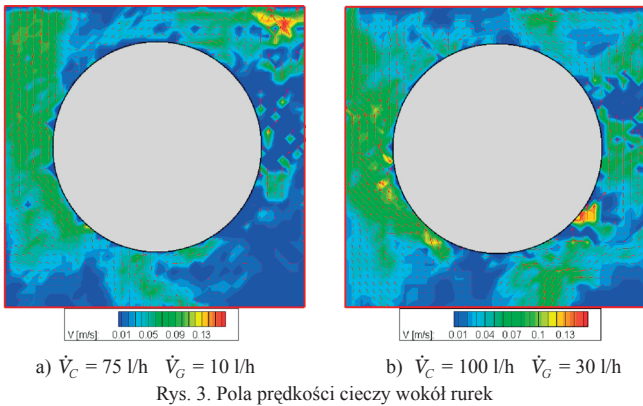
Obrazy uzyskane bezpośrednio w trakcie pomiarów metodą DPIV należy odpowiednio przygotować do analizy w taki sposób aby widoczne były cząstki znacznikowe. Na rys. 2 przedstawiono obraz uzyskany bezpośrednio w trakcie pomiarów (a), obraz po korekcji, czyli poprawieniu kontrastu, jasności i ostrości (b). Kolejnym krokiem jest stworzenie wektorowych pól prędkości, map prędkości (Rys. 2c).



Rys. 2. Przygotowanie danych do analizy

Wyniki pomiarów

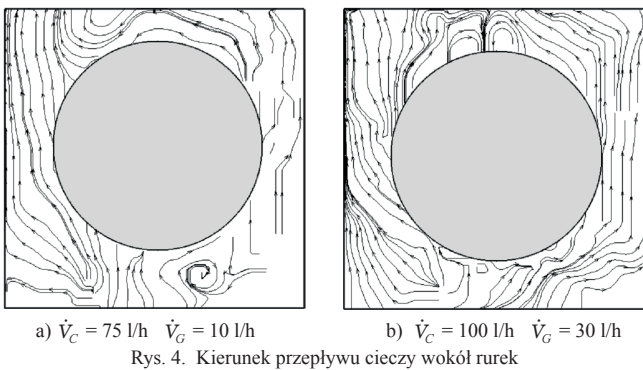
Pola prędkości wokół pojedynczej rurki pokazują jednakowy sposób przepływu cieczy po bokach rurki. Po prawej stronie każdej z rur widoczne są pola w których nie udało się zobrazować pola prędkości. Spowodowane jest to różnym stopniem załamania się wiązki oświetlenia laserowego przy przenikaniu przez różne ośrodki, w tym przypadku wodę, powietrze i pleksiglas. Wynikiem tego był cień rzuty przez rurki którego następstwem było niewystarczające oświetlenie przepływających znaczników, co odbiło się na jakości uzyskanych pól prędkości. Przykłady uzyskanych wyników przedstawiono na rys. 3.



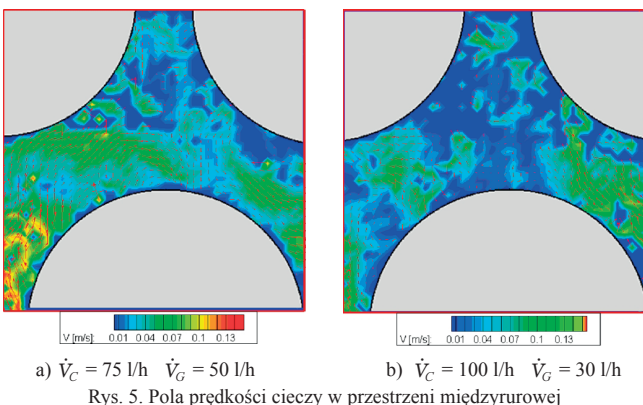
Rys. 3. Pola prędkości cieczy wokół rurek

Nie zaobserwowano większych zmian prędkości przy zmianie wartości strumieni objętości poszczególnych faz. Prędkość ta wahała się w granicach od 0,01 do 0,15 m/s. Widoczne są lokalne wzrosty prędkości cieczy spowodowane przepływającym pęcherzykiem powietrza. Porównując charakter przepływu po bokach rurki widzimy duże podobieństwo, podczas gdy sposób przepływu powyżej i poniżej ma losowy charakter.

Zaobserwowano tworzące się wiry, ich łączenie się i zanikanie. Ruch cieczy ponad rurką odbywał się we wszystkich kierunkach (Rys. 4). Aby dokładniej scharakteryzować przepływ ponad samą rurką ze względu na jego skomplikowany charakter pomiary przeprowadzono



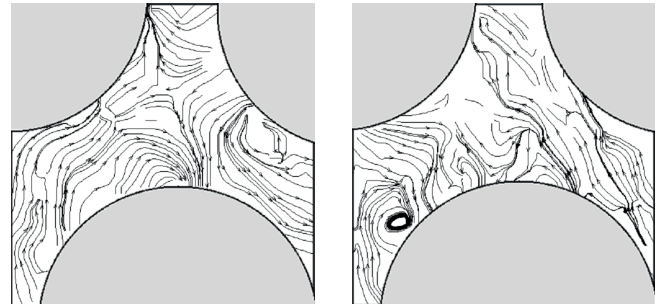
Rys. 4. Kierunek przepływu cieczy wokół rurek



Rys. 5. Pola prędkości cieczy w przestrzeni międzyrurkowej

dla przestrzeni międzyrurkowej znajdującej się ponad rurkami. Podobnie jak w przypadku map stworzonych dla pojedynczej rurki nie widać większych wahań prędkości przepływu (Rys. 5).

Strefy stagnacji nie powstały w każdym przypadku centralnie za rurką. Czasami były przesunięte, innym razem nie występowały. Analizując kierunek przepływu możemy zauważyć chaotyczny ruch mieszaniny (Rys. 6).



a) $\dot{V}_C = 75 \text{ l/h}$ $\dot{V}_G = 50 \text{ l/h}$

b) $\dot{V}_C = 100 \text{ l/h}$ $\dot{V}_G = 30 \text{ l/h}$

Rys. 6. Kierunek przepływu cieczy w przestrzeni międzyrurkowej

Wnioski

W celu uniknięcia zakłóceń powodowanych przez cień rzuty 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.

Uzyskane wyniki potwierdziły skomplikowany charakter przepływu dwufazowego wokół pęku rur płaszczowo rurowego wymiennika ciepła. Szczególnie nieprzewidywalnym jest sposób poruszania się faz tuż za rurkami. Zauważono w tych miejscach tworzenie, łączenie i zanikanie wirów, chaotyczny ruch mieszaniny, 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.

Na podstawie uzyskanych metodą DPIV pól prędkości i wyznaczonych linii prądu można stwierdzić znaczną nierównomierność hydrodynamiki przepływu dwufazowego gaz – ciecz w przestrzeni międzyrurkowej.

LITERATURA

- [1] C. Bin, G. Liejin: Particle Image Velocimetry Measurement of Flow Across Tube Bundle in Waste Heat Boiler, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China 2000.
- [2] B.M. Burnside, K.M. Miller, D.A. McNeil, T. Bruce: International Journal of Heat and Mass Transfer 48, 1000 (2005).
- [3] B. Chen, L. Guo: Journal of Thermal Science 9, nr 3 (2000).
- [4] E.D. Elvis, A.H. Yassin: Nuclear Engineering and Design 239, 888 (2009).
- [5] C. Iwaki, K.H. Cheong, H. Monji, G. Matsui: Experiments in Fluids 39, 1024 (2005).
- [6] C. Iwaki, K.H. Cheong, H. Monji, G. Matsui: Experiments in Fluids 37, 350 (2004).
- [7] G. Matsui, H. Monji, T. Kurihara: "PIV measurement of flow field around bubble", 1st European-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting, Slovenia, 1998

