

PAWEŁ OCŁOŃ
MICHAŁ DYŁĄG

Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska, Kraków

Ocena przydatności metody μ PIV w badaniach spływu cienkowarstwowego

Wprowadzenie

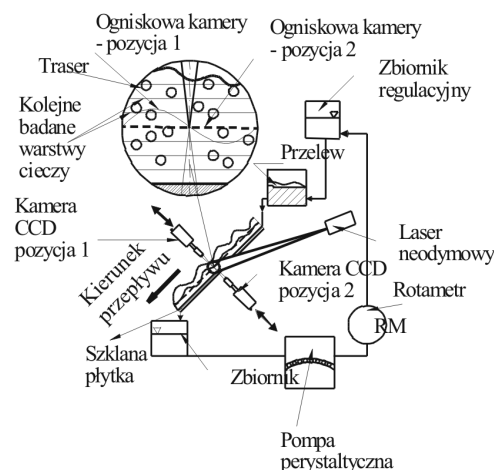
Spływ cienkowarstwowo cieczy stosowany jest w takich aparatach przemysłowych jak absorbery, kolumny z wypełnieniem, czy też wyparki cienkowarstwowo. Charakteryzuje go duża powierzchnia wymiany ciepła i masy przy niewielkiej objętości, oraz występujące na powierzchni swobodnej fale, intensyfikujące międzyfazowy przepływ masy i ciepła [1]. Ciągły postęp i rozwój anemometrii laserowej stwarza nowe możliwości w badaniach kluczowych dla procesów konwekcji i dyfuzji parametrów, takich jak prędkość cieczy oraz kąt zwilżania.

Spływająca cienką warstwą ciecz jest bardzo wrażliwa na zakłócenia przepływu. Dlatego też, w trakcie badań, konieczne jest użycie bezinwazyjnych metod pomiarowych, takich jak np. μ PIV (mikro – anemometria obrazowa). Ta optyczna metoda pomiarowa umożliwia na podstawie porównania par obrazów cząsteczek wyznaczenie ich przemieszczenia, a następnie prędkości. Dotychczas stosując konwencjonalną metodę pomiarową μ PIV [2] wykonywano zdjęcia przez szklaną płaską ściankę, po której spływała ciecz. Ponieważ zdjęcia, przy użyciu tej metody były wykonywane przez płaską powierzchnię, położenie płaszczyzny ogniskowej określającej odległość badanej warstwy cieczy od ścianki było stałe. Zapewniało to wysoką precyzję pomiarów. Jednakże materiały, z których wykonane są części aparatury są nieprzezroczyste, co uniemożliwia pomiary dotychczasową techniką μ PIV w warunkach rzeczywistych. Dlatego też w celu zbadania hydrauliki spływu cieczy w warunkach quasi-przemysłowych zaimplementowano inną technikę pomiarową μ PIV, proponowaną w pracy [3]. W czasie pomiarów tą metodą zdjęcia przepływu wykonywane są nie jak dotychczas przez szklaną ściankę, ale przez ruchomą powierzchnię swobodną cieczy.

W prezentowanej pracy pomiary przeprowadzono dla różnych mieszanin wody i glicerolu spływających po płaskiej płytce, nachylonej pod kątem $\gamma = 45^\circ$ do poziomu. Taka geometria płytki ma imitować wypełnienie strukturalne typu Y, często stosowane w aparatach kolumnowych. Eksperyment przeprowadzono dla przepływów z zakresu laminarnego i przejściowego, analogicznych do występujących w procesach absorpcji i destylacji. Jego celem było oszacowanie – dla różnych typów przepływów – jak falista powierzchnia cieczy wpływa na zgodność pomiarów wykonywanych metodą proponowaną w pracy [3] w porównaniu z użyciem metody dotychczas stosowanej. Porównanie wyników pomiarów było możliwe, ponieważ płytkę wykonano ze szkła.

Założenia oraz schemat stanowiska pomiarowego

Eksperyment zrealizowano na stanowisku pomiarowym przedstawionym na rys. 1.



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe

Do tłoczenia cieczy ze zbiornika do przewodu użyto pompy perystaltycznej. Przewód zainstalowano tuż nad krawędzią płytki, aby zapewnić równomierne rozprowadzenie cieczy po płytce. Jako traser użyto cząstek *Rodaminy B*, o średnicy $3,23 \mu\text{m}$. Obszar pomiarowy, prostokąt o wymiarach $2,1 \times 1,7 \text{ cm}$, usytuowano w środku płytki. Do dwukrotnego naświetlenia przepływu został użyty laser neodymowy. Za pomocą zsynchronizowanej z laserem kamery wykonywano pary zdjęć, po jednym dla każdego ustawienia oświetlenia. Kamery w zależności od zastosowanej metody pomiarowej ustawiano w dwóch pozycjach. W pozycji 1 podczas wykonywania zdjęć przez ruchomą, falistą powierzchnię cieczy, w pozycji 2 dla badań przepływu przy użyciu dotychczasowej metody pomiarowej. Przesuwając kamerę co $50 \mu\text{m}$ skanowano przepływ cieczy warstwa po warstwie, od ścianki aż po powierzchnię swobodną. Z każdej warstwy cieczy wykonano po 300 par zdjęć, następnie za pomocą analizy statystycznej (korelacji krzyżowej) kolejnych par obrazów uzyskiwano średnie przemieszczenie w skanowanej warstwie widocznych na zdjęciach cząsteczek. Dzieliąc je przez interwał czasowy pomiędzy parą zdjęć, wynoszący dla różnych typów przepływu i badanych warstw cieczy od 30 do $100 \mu\text{s}$, wyznaczano średnią prędkość cząsteczek.

Pomiary przeprowadzono dla mieszanin wody i glicerolu o udziale masowym glicerolu $X_G = [0; 0,7]$. Dla tych wartości X_G uzyskano przepływy z zakresu laminarnego i przejściowego. W tabelicy 1 zestawiono wartości: X_G , objętościowego natężenia przepływu cieczy V , współczynnika załamania światła na drodze powietrze – ciecz $n_{p,c}$, analogu liczby *Reynoldsa* ($Re = V/bv$, gdzie $b = 60 \text{ mm}$, jest szerokością płytki, a v – kinematycznym współczynnikiem lepkości) oraz typ przepływu [4].

Tablica 1

Zestawienie własności cieczy
oraz typu przepływu podczas pomiarów

X_G	V [ml/min]	$n_{p,c}$	Re	Typ przepływu
0,7	250	1,428	4	laminarny
0,6	350	1,415	8	przejściowy I
0,4	700	1,384	65	stabilny falisty przepływ
0	850	1,33	265	przejściowy II

Omówienie rezultatów oraz wnioski

Ponieważ odległość między badanymi warstwami cieczy, była zależna od własności optycznych badanej mieszaniny, dla kolejnych przesunięć kamery co 50 μm wyznaczano na podstawie prawa załamania światła odległości płaszczyzny ogniskowej od ścianki. Otrzymane dla kolejnych pozycji pomiarowych wartości wektora prędkości, porównano z teoretycznym rozkładem prędkości według *Nusselta* [2]:

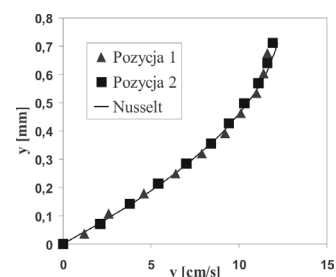
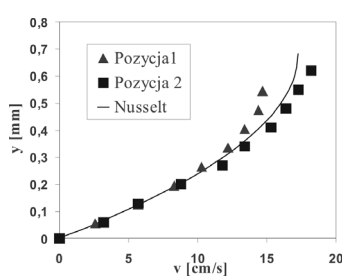
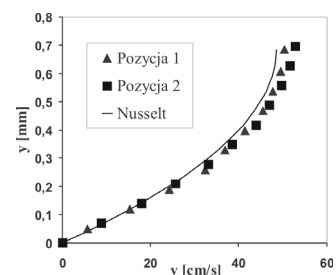
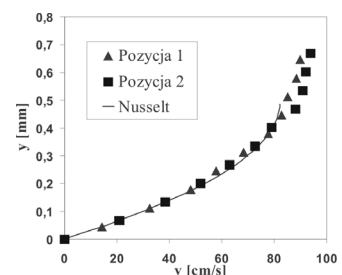
$$v(y) = \left(\frac{g \sin \gamma \cdot \delta^2}{2\nu} \right) \left[\frac{2y}{\delta} - \left(\frac{y}{\delta} \right)^2 \right] \quad (1)$$

Symbolem g oznaczono przyspieszenie ziemskie, y – odległość badanej warstwy cieczy od ścianki, a δ grubość cieczy obliczoną dla teoretycznego modelu *Nusselta* według zależności:

$$\delta = \left(\frac{3\nu^2}{\sin \gamma \cdot g} \right)^{1/3} Re^{1/3} \quad (2)$$

Porównanie wyników pomiarów z modelem teoretycznym *Nusselta*, otrzymanym przy założeniu płaskiej powierzchni cieczy, miało na celu sprawdzenie, czy model ten można stosować dla niektórych typów przepływu przejściowego cieczy. Na rys. 2–5 [5], przedstawiono profile prędkości otrzymane za pomocą obydwu metod pomiarowych μPIV oraz model teoretyczny *Nusselta*.

Dla przepływu laminarnego (Rys. 2) maksymalne różnice procentowe wyników pomiarów wynoszą zaledwie 3%. Pozwala to stwierdzić, że metodą μPIV badania sływu ciekowarstwowego przez ruchomą falistą powierzchnię cieczy można stosować dla pomiarów tego typu przepływu. Rezultaty pomiarów otrzymane za pomocą obydwu metod μPIV są zgodne

Rys. 2. Rezultaty pomiarów dla $Re = 4$ Rys. 3. Rezultaty pomiarów dla $Re = 8$ Rys. 4. Rezultaty pomiarów dla $Re = 65$ Rys. 5. Rezultaty pomiarów dla $Re = 265$

z rozkładem prędkości otrzymanym dla teoretycznego modelu *Nusselta*.

Dla przepływu z zakresu przejściowego I rozbieżność wyników jest największa. Maksymalne różnice w rezultatach pomiarów (do 30%), zaobserwowano w warstwach przy powierzchni cieczy. Charakterystyczne dla tego typu przepływu, sporadycznie pojawiające się na powierzchni cieczy fale, nie wpływają znacząco na rozkład prędkości w warstwie cieczy. Zatem różnice w wartościach prędkości wyznaczonych na podstawie wzoru (1) oraz uzyskanych na drodze doświadczalnej powinny być nieznaczne. Tak też dzieje się w przypadku pomiaru dotychczas stosowaną metodą umożliwiającą badania prędkości cieczy przez szklaną ściankę. Natomiast w przypadku pomiaru metodą μPIV przez powierzchnię cieczy, różnice te dochodzą do 20%. Różnice w wynikach pomiarów otrzymanych przy użyciu obydwu metod μPIV oraz różnice w wynikach pomiarów metodą przez powierzchnię cieczy i wartościach prędkości wyznaczonych dla teoretycznego modelu *Nusselta* świadczą o ograniczonej stosowności metody dla badań przepływów z zakresu przejściowego I.

Zarówno dla przepływów z zakresu stabilnego falistego (Rys. 4) oraz przejściowego II (Rys. 5) zaobserwowano wysoką zgodność wyników pomiarów przy użyciu nowo zaproponowanej i dotychczasowej techniki μPIV . Maksymalne różnice w rezultatach wynosiły dla trzech ostatnich pozycji pomiarowych 7%. Jest to zaskakujące, gdyż spodziewano się wyraźnych rozbieżności rezultatów pomiarowych, szczególnie w przypadku występowania fal o dużej częstotliwości i amplitudzie (Rys. 5). Paraboliczny kształt profilu prędkości zgodny z równaniem (1), dla tej pary pomiarów, odzwierciedlają rezultaty badań doświadczalnych. Różnice (do 40%) w otrzymanej doświadczalnie i obliczonej wg wzoru (2) grubości cieczy spowodowane są pojawieniem się fal na powierzchni swobodnej cieczy. W przeprowadzonych pomiarach pominięto składową wektora prędkości cieczy, prostopadłą do kierunku przepływu. Wpływ tej składowej na wartość wektora prędkości musi zostać w przyszłości zbadany.

Podsumowanie

W pracy zbadano możliwość zastosowania metody pomiaru μPIV , przez powierzchnię cieczy, w badaniach sływu ciekowarstwowego (zakres laminarny – $Re < 4$ i przejściowego – $Re = 4-400$). Otrzymane wyniki pomiarów pozwalają stwierdzić, że możliwe jest użycie tej metody do badań laminarnego sływu ciekowarstwowego cieczy. Jednakże dla badań w zakresie przejściowym stosowność metody jest ograniczona ze względu na zniekształcenia płaszczyzny pomiarowej przez falistą powierzchnię cieczy oraz brak uwzględnienia składowej prędkości prostopadłej do kierunku przepływu. Konieczne jest więc opracowanie innej techniki pomiaru μPIV , umożliwiającej badania tego typu przepływu.

LITERATURA

1. H. Brauer: Grundlagen der Ein- und Mehrphasen strömung, Aarau, Verlag Sauerländer, 1971.
2. S. Paschke, I. Ausner, J.U. Repke, G. Wozny: Intern. Conf. Proc. Eng. & Plant Des., 113 Berlin, 2006.
3. S. Paschke, J.U. Repke, G. Wozny: Intern. Berlin Workshop on Transport Phenomena with Moving Boundaries, 143, Berlin, 27th – 28th September, 2007.
4. S. Ishigai, S. Nakanishi, S. Koizumi, T. Oyabi: Bull. JSME 15, Nr. 83, 594 (1972).
5. P. Oclon: Detailed analysis of a new μPIV measurement method for film flow investigation – Master's Thesis TU-Berlin, 2008.