

PAWEŁ OCŁOŃ  
JAN TALAGA

Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska, Kraków

# Zmodyfikowana metoda pomiaru turbulentnego sływu cienkowarstwowego z zastosowaniem $\mu$ PIV

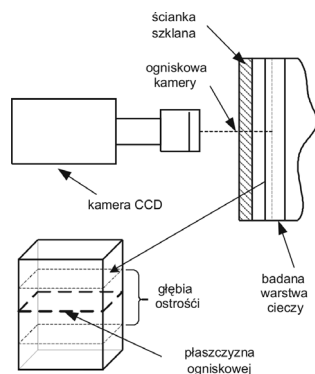
## Wprowadzenie

Turbulentny sływ cienkowarstwowo cieczy, któremu towarzyszy równoczesny, przeciw- lub współprądowy przepływ fazy gazowej ma miejsce w wielu aparatach procesowych, między innymi w absorberach, wyparkach cienkowarstwowym czy w kolumnach destylacyjnych. Cechą charakterystyczną tego typu przepływu jest transport masy i ciepła przez falistą powierzchnię swobodną cieczy oraz duża powierzchnia wymiany ciepła przy niewielkiej objętości cieczy. W modelowaniu sływu cienkowarstwowego istotne znaczenie – obok metod numerycznej dynamiki płynów – mają badania doświadczalne służące między innymi weryfikacji symulacji numerycznych [1].

Jedną z metod pomiaru rozkładu prędkości w sływającej warstwie cieczy jest obecnie anemometria obrazowa – PIV [2, 3]. W przypadku wyznaczania profilu prędkości w cienkiej warstwie cieczy kamera CCD układu PIV wyposażona jest w odpowiednio dobrany zestaw soczewek powiększających, zmniejszających głębię ostrości kamery (mikroanemometria obrazowa  $\mu$ PIV) [4]. Metoda  $\mu$ PIV umożliwia pomiar prędkości przepływu cieczy w funkcji grubości sływającej, cienkiej warstwy cieczy.

## Metody pomiaru sływu cienkowarstwowego za pomocą $\mu$ PIV

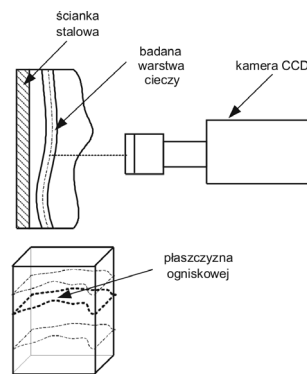
W dotychczasowej, konwencjonalnej technice pomiarowej  $\mu$ PIV, stosowanej do pomiarów prędkości w sływie cienkowarstwowym (Rys. 1), kamera CCD rejestruje przemieszczenia cząstek traserów przez szklaną ściankę, po której sływa ciecz. Zaletą tej metody jest stała wielkość ogniskowej kamery a zarazem możliwość dokładnego określenia położenia płaszczyzny ogniskowej, określającej położenie badanej warstwy cieczy względem ścianki. Natomiast istotną wadą jest w tym przypadku brak możliwości pomiarów prędkości cieczy podczas jej sływu po materiałach nieprzeźroczystych,



Rys. 1. Konwencjonalna metoda pomiarowa  $\mu$ PIV

jak np. po ściance stalowej oraz ograniczenie pomiarów jedynie do sływu cieczy po płaskiej powierzchni. W przypadku zastosowania tej metody do pomiarów prędkości cieczy w sływie cienkowarstwowym po ściance cylindrycznej, jak np. w rurach wyparek cienkowarstwowym, zniekształceniu ulega długość ogniskowej kamery, a w konsekwencji położenie płaszczyzny pomiarowej. Prowadzi to do istotnych trudności w interpretacji wyników pomiarów [5].

Wykonanie pomiarów prędkości cieczy w sływie cienkowarstwowym po powierzchni nieprzeźroczystej jest możliwe przy zastosowaniu metody zilustrowanej na rys. 2. W tym przypadku kamera wykonuje zdjęcia poprzez ruchomą i sfalowaną powierzchnię cieczy. Jednakże rezultaty pomiarów przepływu turbulentnego obarczone są błędem, spowodowanym oddziaływaniem falistej powierzchni swobodnej cieczy na długość ogniskowej kamery. Oddziaływanie to uniemożliwia precyzyjne i jednoznaczne określenie aktualnego położenia płaszczyzny pomiarowej i w konsekwencji utrudnia interpretację rezultatów pomiarów.



Rys. 2. Pomiar  $\mu$ PIV przez zwierciadło cieczy

Dodatkowym ograniczeniem obydwu powyższych metod jest możliwość pomiarów tylko dwóch składowych wektora prędkości cieczy. O ile w przypadku laminarnego, czy przejściowego przepływu cieczy, składową wektora prędkości w kierunku prostopadłym do ścianki można pominąć, to takie uproszczenie jest błędne dla przepływu turbulentnego [6]. Znajomość składowej prędkości w tym kierunku, ma istotne znaczenie przy modelowaniu np. procesów międzyfazowego transportu masy i ciepła zachodzących w turbulentnym sływie cienkowarstwowym, któremu towarzyszy równoczesny przeciw- lub współprądowy przepływ fazy gazowej.

## Zmodyfikowana metoda pomiaru prędkości w sływie cienkowarstwowym

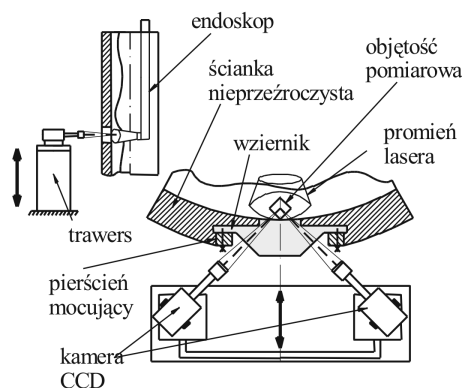
Przedstawione powyżej ograniczenia w stosowanych obecnie metodach pomiaru prędkości w sływie cienkowarstwowo-

wym uniemożliwiają wyznaczenie wszystkich trzech składowych prędkości cieczy, zwłaszcza w przypadku turbulenty sływu po powierzchniach nieprzeźroczystych i cylindrycznych. Dlatego też w pracy zaproponowano odpowiednio zmodyfikowaną metodę pomiaru z zastosowaniem  $\mu$ PIV, eliminującą wspomniane ograniczenia.

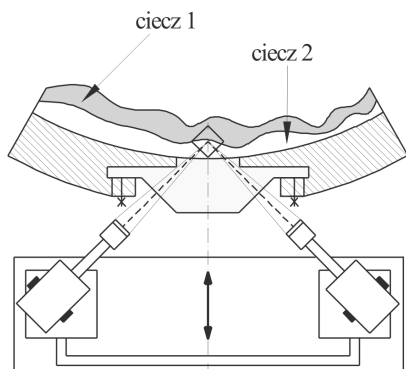
Proponowana zmodyfikowana metoda pomiaru polega na umieszczeniu w płaskiej lub cylindrycznej ścianie, po której sływa ciecz, przeźroczystego i odpowiednio ukształtowanego wziernika, przez który prowadzona jest rejestracja ruchu cząstek trasera za pomocą kamer CCD (Rys. 3). W przypadku pomiarów sływu po ścianie cylindrycznej górna powierzchnia wziernika, po której sływa ciecz, jest również powierzchnią cylindryczną o promieniu krzywizny zgodnym z krzywizną nieprzeźroczystej ścianki cylindrycznej. Wziernik posiada dwie symetryczne, płaskie ścianki boczne, ścięte pod kątem  $45^\circ$ , przez które para kamer CCD rejestruje przemieszczenia cząstek trasera. Taki kąt ścięcia ścianek zapewnia prostopadłość ogniskowych obydwu kamer, dzięki czemu możliwe są pomiary wszystkich trzech składowych prędkości cieczy w układzie współrzędnych  $x_1, y_1, z_1$ . Zastosowanie przeźroczystego wziernika w ścianie eliminuje równocześnie konieczność pomiarów przez falistą powierzchnię sływej warstwy cieczy.

Na rys. 4 zilustrowano objętość pomiarową i przepływającą przez nią cząstkę trasera. Kamera 1 rejestruje przemieszczenie  $dx_1$  trasera, natomiast kamera 2 przemieszczenie  $dy_1$ . Obie kamery rejestrują równocześnie przemieszczenie  $dz_1$ . W wyniku podzielenia przemieszczeń  $dx_1, dy_1, dz_1$  przez interwał czasowy  $dt$  pomiędzy wykonywanymi zdjęciami, wyznaczone zostają wszystkie trzy składowe wektora prędkości  $v$ .

Pewnym ograniczeniem proponowanej metody pomiaru jest konieczność zapewnienia identycznego współczynnika zała-



Rys. 3. Zmodyfikowana metoda pomiaru za pomocą  $\mu$ PIV dla ścianki cylindrycznej

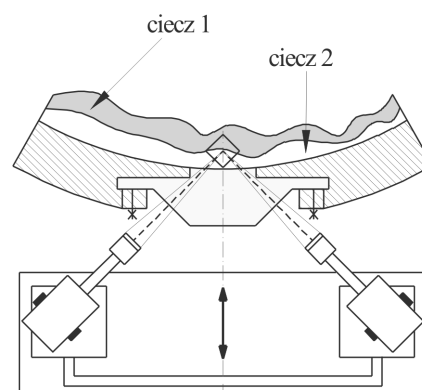


Rys. 4. Objętość pomiarowa w zmodyfikowanej metodzie pomiarowej

mania światła dla materiału, z którego wykonany jest wziernik oraz dla cieczy sływej po ścianie. Równość obu współczynników załamania światła gwarantuje bowiem – w przypadku pomiarów sływu po powierzchni cylindrycznej – możliwość dokładnego określenia położenia punktów pomiarowych wzdłuż grubości warstwy cieczy.

W przedstawionej metodzie pomiaru  $\mu$ PIV założono jednakość chropowatości powierzchni materiałów wziernika oraz ścianki, jak również przyjęto, że wymiary wziernika są na tyle małe w porównaniu z gabarytami powierzchni, po której sływa ciecz, że nie zaburza on warunków przepływu.

Zmodyfikowaną metodę pomiarową  $\mu$ PIV można zastosować również w przypadku badań dwufazowego sływu ciekowarstwowego dwóch wzajemnie nierozpuszczalnych cieczy (Rys. 5). Możliwe jest wówczas określenie zmian prędkości cieczy np. na granicy faz, podczas interakcji dwóch nie miesających się ze sobą faz ciekłych.



Rys. 5. Pomiary zmodyfikowaną metodą  $\mu$ PIV w sływie dwufazowym

## Podsumowanie

W pracy zaproponowano zmodyfikowaną metodę pomiaru prędkości w turbulenty sływie ciekowarstwowym z zastosowaniem techniki  $\mu$ PIV. Podstawowymi zaletami przedstawionej metody pomiaru są:

- możliwość badania sływu ciekowarstwowym po ściankach nieprzeźroczystych, a więc wykonanych z rzeczywistych materiałów stosowanych w budowie aparatury, np. ze stali,
- możliwość badania sływu cieczy po nieprzeźroczystych powierzchniach cylindrycznych, tj. o geometrii odpowiadającej typowym elementom aparatury, w których występuje sływ ciekowarstwowym,
- możliwość równoczesnego pomiaru wszystkich trzech składowych prędkości cieczy w turbulenty sływie ciekowarstwowym.

## LITERATURA

1. W Ludwig, J. Dziak, W. Sawiński, L. Królikowski, J. Kapton, J. Tuta: Chem. and Proc. Eng., **29**, 215 (2008).
2. A. K. Prasad, K. Jansen: Applied Optics **34**, nr. 30, 7092 (1995).
3. K.D.Jensen: J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng. [online] **26**, nr 4, 400 (2004).
4. M. Raffel, M. Willert, J. Kompenhans: Particle Image Velocimetry, A Practical Guide, Heideberg, Springer-Verlag Berlin, 1998.
5. S. Paschke, J.-U. Repke, G. Wozny: Intern. Berlin Workshop on Transport Phenomena with Moving Boundaries, 143, Berlin, 27-28 September, 2007.
6. P. Ocłoń: Detailed analysis of a new  $\mu$ PIV measurement method for film flow investigation, Master's Thesis, TU-Berlin, 2008.