

Paweł MODZEL*

ZASTOSOWANIE METODY FOTOGRAFII PLAMKOWEJ DO BADANIA POŁA PRĘDKOŚCI CHWILOWEJ PRZEPŁYWÓW DWUFAZOWYCH

Praca prezentuje możliwość zastosowania bezkontaktowej metody fotografii plamkowej do pomiaru pola prędkości chwilowej w przepływach dwufazowych. Prezentowane są podstawy fizyczne metody oraz zależności i schematy układów pomiarowych. Opracowanie zawiera przykładowe wyniki badań przeprowadzonych tą metodą.

1. WSTĘP

Metodę fotografii plamkowej zaliczyć można do grupy optycznych metod pomiarowych. Są to bezkontaktowe techniki umożliwiające pomiar pola prędkości przepływu dwufazowego. Szczególną ich zaletą jest fakt, iż pozwalają na uzyskiwanie danych dotyczących zarówno kierunku, jak i wartości wektora prędkości przepływu bez wprowadzania zaburzeń miejscowych, które wywołują wszelkiego rodzaju sondy stosowane w metodach kontaktowych.

Do najczęściej stosowanych metod optycznych zalicza się różne odmiany fotografowania wizualizowanego przepływu. Warunkiem niezbędnym do zastosowania tych technik jest przezroczystość ścian kanału przepływowego oraz badanego ośrodka, jeśli pomiar nie ogranicza się do rejonu warstwy przysciennej.

W zależności od zastosowanej aparatury i parametrów rejestracji możliwe jest uzyskiwanie informacji o charakterze ilościowym lub jakościowym. W pewnych warunkach możliwe jest też określenie wielkości poszczególnych składników przepływu oraz ich rozmieszczenie w przestrzeni.

* Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej

Skrótowy wykaz metod wykorzystujących zjawiska optyczne stosowane w badaniach przepływów zawiera tabela 1.

Wymienione w niej techniki obarczone są jednak wieloma niedoskonałościami. Np. metody typowo fotograficzne pozwalają najczęściej na uzyskiwanie informacji o charakterze jakościowym zachodzących zjawisk. Z reguły nie pozwalają też na ścisłe określenie wartości wektora prędkości w dowolnym punkcie kanału przepływowego.

Metoda bardziej wyrafinowana, o bardzo dużej dokładności, jak np. Laserowa Anemometria Dopplerowska, pozwala na wyznaczenie składowej wektora prędkości w jednym punkcie. Kolejne pomiary oznaczają konieczność przemieszczania układu pomiarowego w nowe położenie. Ponadto występuje ograniczenie dotyczące koncentracji fazy stałej w badanym ośrodku.

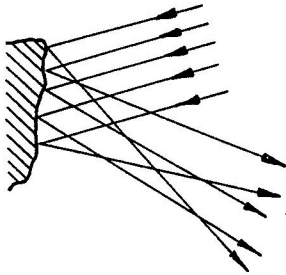
T a b e l a 1.

fotograficzna rejestracja toru:	- jednoekspozycyjna
	- wieloekspozycyjna (stroboskopowa)
	- stereoskopowa
	- z wykorzystaniem pozaoptycznych zakresów promieniowania
rejestracja filmowa:	
	- w układzie względnym
	- w układzie bezwzględnym
rejestracja holograficzna	
metoda cieniowa	
laserowa anemometria dopplerowska	

Na tym tle zwraca na siebie uwagę metoda fotografii plamkowej, która pozwala na zarejestrowanie stanu pola prędkości chwilowej w całym, dowolnie wybranym przekroju kanału przepływowego.

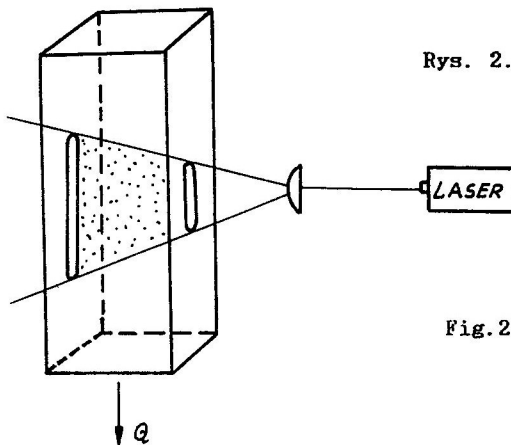
Początkowo metoda ta stosowana była do pomiarów przemieszczeń ciał stałych w oparciu o rejestrację tzw. struktur plamkowych, powstających przy oświetleniu powierzchni optycznie niegładkich. Zjawisko to, przedstawione na rys. 1, jest wynikiem wielokrotnej interferencji promieni światła spójnego odbitych od, traktowanych jako mikrozwierciadła, nierówności powierzchni.

Aplikacja metody do badania zjawisk przepływowych polega na zastąpieniu rejestracji struktury plamkowej rejestracją obrazów drobin unoszonych w badanym przepływie dwufazowym - rys. 2. Stosując oświetlenie tzw. nożem świetlnym wydzielamy z obszaru przepływowego wybrany przekrój do przeprowadzenia analizy. Rejestrując na jednym materiale światłoczułym dwa kolejne położenia drobin, które w czasie Δt przebyły drogę d , uzyskujemy tzw. plamkogram posiadający własności siatki dyfrakcyjnej (rys. 3).



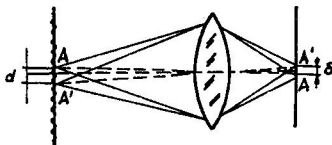
Rys. 1. Schemat tworzenia struktury plamkowej

Fig.1 Scheme of the speckle structure forming



Rys. 2. Schemat rejestracji "struktury plamkowej" w przepływie dwufazowym przy oświetleniu "nożem świetlnym"

Fig.2 Scheme of the speckle structure recording for two-phase flow using light-sheet technique

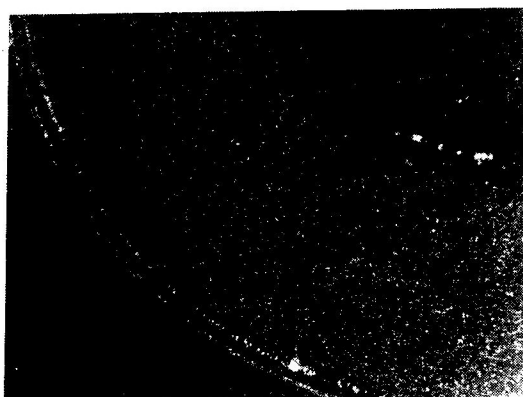


Rys. 3. Schemat tworzenia siatki dyfrakcyjnej przy rejestracji struktur plamkowych

Fig.3 Scheme of the diffraction grating forming in a speckle structure recording

- d - przemieszczenie plamek rzeczywiste,
 δ - przemieszczenie plamek na materiale światłoczułym,
 p - powiększenie fotograficzne
 $\delta = p \cdot d$

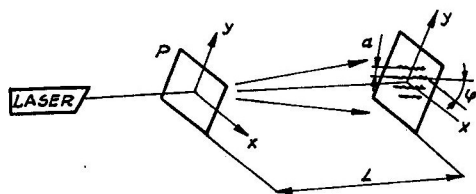
Rys. 4 przedstawia przykładowe zdjęcie struktury plamkowej, zarejestrowanej w trakcie pomiarów pola prędkości chwilowej.



Rys. 4. Zdjęcie kanału przepływowego z zarejestrowanym obrazem plamkowym

Fig.4 Photography of flow channel with speckle structure image

Określenie wartości i kierunku wektora prędkości chwilowej prowadzi się w układzie przedstawionym na rys. 5.



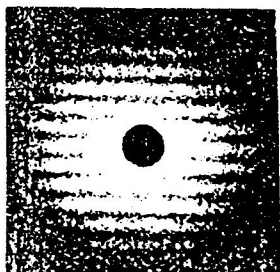
Rys. 5. Schemat układu do analizy obrazów plamkowych

Fig.5 Scheme of the set for specklogram analysis;

- P - plamkogram,
- L - odległość do ekranu,
- a - odległość między prążkami interferencyjnymi,
- φ - kąt pochylenia prążków do przyjętego układu współrzędnych

Prześwietlając wybrany punkt zarejestrowanego obrazu kanału przepływowego równoległą wiązką światła spójnego uzyskujemy na ekranie prążki interferencyjne analogicznie jak w doświadczeniu Younga. Rys. 6 ilustruje widoczne na ekranie efekty optyczne. Kierunek wektora

prędkości jest prostopadły do obserwowanych prążków. Wartość wektora prędkości V wyznacza się z zależności (1) określając uprzednio odległość międzyprążkową:



$$V = \frac{L\lambda}{pa \Delta\tau} \quad (1)$$

Rys. 6. Obraz prążków interferencyjnych widocznych na ekranie

Fig.6 An image of the interference pattern observed on a screen

Uwzględniając φ - kąt pochylenia prążków interferencyjnych do przyjętego układu współrzędnych wyznaczamy składowe wektora prędkości.

$$U = \frac{L\lambda}{pa \Delta\tau} \sin \varphi \quad (2)$$

$$W = \frac{L\lambda}{pa \Delta\tau} \cos \varphi \quad (3)$$

L - odległość plamkogramu od ekranu,

λ - długość fali światła spójnego,

p - powiększenie fotograficzne,

a - odległość między prążkami,

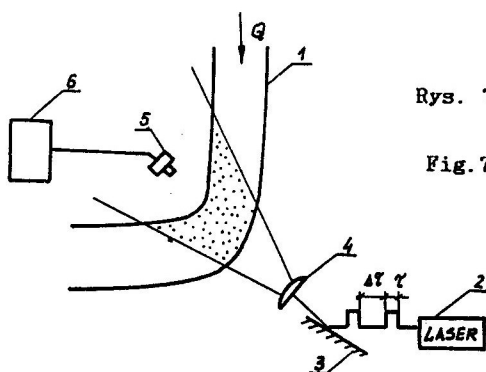
$\Delta\tau$ - odstęp czasu między ekspozycjami,

U, W - składowe wektora prędkości w przyjętym układzie współrzędnych.

Warunkiem dokonania pomiaru jest wystąpienie przemieszczenia drobin na odległość większą od ich rozmiaru, co warunkuje powstanie na plamkogramie struktury dyfrakcyjnej.

2. POMIARY

W Laboratorium Doświadczalnej Analizy Naprężeń i Okształceń Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej podjęto próbę praktycznego zastosowania metody fotografii plamkowej do pomiaru prędkości chwilowej w przepływie dwufazowym. Badania prowadzono na stanowisku przedstawionym na rys. 7.



Rys. 7. Schemat układu pomiarowego

Fig.7 Scheme of the investigation set;

- 1 - kanał przepływowy,
- 2 - źródło światła - laser dwuimpulsowy,
- 3 - zwierciadło kierujące,
- 4 - soczewka formująca "nóż świetlny",
- 5 - sonda optoelektroniczna,
- 6 - oscyloskop

Kanałem przepływowym była rura szklana o średnicy $\phi = 18$ mm, wygięta pod kątem prostym na promieniu $R = 70$. Rejestrowano ruch drobin PCW o średnicy $\phi_d = 40$ μm , unoszonych w przepływie wody.

Parametry przepływu: $V_{sr} = 0,419$ m/s,
 $Re = 6611$.

Przy doborze parametrów rejestracji przyjęto, iż do zarejestrowania ostrego obrazu poruszających się drobin nie mogą one przemieścić się na odległość większą niż 10 % swojej średnicy

$$d_r < 0,1 \phi_d \quad (4)$$

W praktyce badania ośrodków rozdrobnionych oznacza to, iż przy prędkościach rzędu 50 m/s i rozmiarach drobin $\phi_d \cong 50$ μm czasy rejestracji powinny zawierać się w przedziale $\tau_{max} = 50 - 150$ nm.

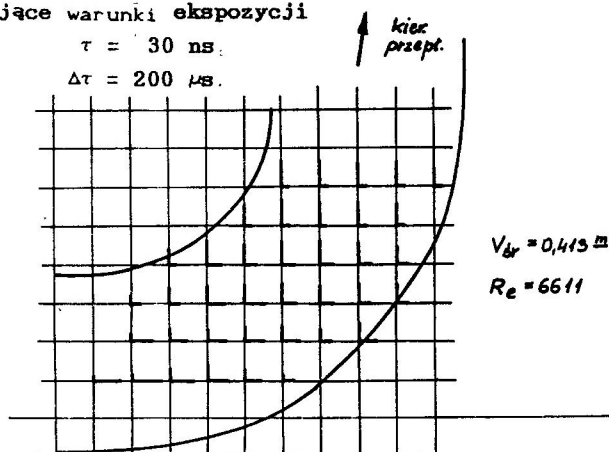
Dobór przedziału czasu między ekspozycjami wymaga uwzględnienia, iż obrazy kolejnych położów drobin nie powinny wyjść z obszaru wiązki analizującej. Jest to warunek zachowania korelacji, pozwalającej na analizę metodą dyfrakcyjną obrazów plamkowych. Dla omawianych zjawisk $\Delta\tau = (4 - 6 \mu\text{m})$.

Prezentowany w niniejszym opracowaniu eksperyment przeprowadzono wykorzystując laser impulsowy znajdujący się w Instytucie Optyki Stosowanej w Warszawie.

Przyjęto następujące warunki ekspozycji

$$\tau = 30 \text{ ns}$$

$$\Delta\tau = 200 \mu\text{s}$$



Rys. 8. Rozkład prędkości w badanym kanale przepływowym

Fig.8 Velocity distribution in a test channel

Analiza plamkogramu przedstawionego na rys. 4 prowadzona była w układzie optycznym prezentowanym na rys. 5.

Zastosowana do analizy wiązka analizująca miała średnicę $\phi_a = 1 \text{ mm}$. Punkty pomiarowe rozmieszczone były w węzłach siatki prostokątnej o gęstości 2 mm . Rys. 8 przedstawia rozkład składowych wektora prędkości chwilowej w przyjętym do analizy prostokątnym układzie współrzędnych.

WNIOSKI

Potwierdzono przydatność przedstawionej w opracowaniu metody fotografii plamkowej do badania pola prędkości chwilowej w przepływach ośrodków dwufazowych. Analiza literatury wskazuje na próbę zastosowania jej także w badaniach ośrodków gazowych.

Ze względu na dużą dokładność metody oraz szeroki przedział prędkości możliwych do zarejestrowania (praktycznie od ułamków mm/s do

kilkuset m/s) metoda ta może stać się w niedługim czasie powszechnie stosowana w badaniach dużej gamy zjawisk przepływowych, takich np. jak: układy dolotowe silników spalinowych, maszyny i urządzenia transportu hydraulicznego i pneumatycznego.

Literatura

- [1] Fomin N.A., Interferometria plamkowa w przepływach gazów. Nauka i Technika, Mińsk 1989
- [2] Szczepiński W., pod red., Metody doświadczalne mechaniki ciała stałego. PWN, Warszawa 1984.
- [3] Barker D.B., Fournery M.E., Optics Letters 1977, Vol. 1, nr 4, pp. 135 - 137.

Modzel P., 1992. Application of a Speckle Photography in an Investigation of Two-Phase Flow Field Velocity. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 26, 41-48 (polish text)

A paper contains a short description of a speckle photography in measurement of flow velocity field. Basing on time intervals between recordings and displacement of markers during the flow and the velocity vector components, the calculation of velocity vector components in every point of the area tested is possible.