

## METODA POMIARU PRĘDKOŚCI RUCHU CIECZY ZMODYFIKOWANĄ METODĄ PIV

Mariusz RZAŚA<sup>1</sup>, Sławomir POCHWAŁA<sup>2</sup>, Beata CZAPLA-NIEŁACNA<sup>3</sup>

1. Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej  
e-mail: m.rzasa@po.opole.pl
2. Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej  
e-mail: s.pochwala@po.opole.pl
3. Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej  
e-mail: b.czapla@doktorant.po.edu.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono wyniki badań pomiaru prędkości ruchu cieczy. Prędkość określono na podstawie zdjęć fotograficznych z wizualizacji ruchu cieczy, w której znajdowały się znaczniki optyczne. Przedstawiona metoda umożliwia wyznaczenie prędkości ruchu cieczy z dokładnością do kilku procent wartości mierzonych.

**Słowa kluczowe:** wizualizacja przepływu, pomiar prędkości cieczy.

### 1. WSTĘP

Zjawiska związane z opływem różnego rodzaju przeszkód przez płynący płyn, należą do jednych z trudniejszych zagadnień mechaniki płynów. Struga płynu natrafiając na przeszkodę ulega zakłóceniu, czemu towarzyszy powstawanie wirów. Częstotliwość powstawania wirów oraz ich intensywność bardzo silnie zależy od strumienia płynu i rodzaju przeszkody. Zjawisko to wykorzystuje się w przepływomierzach wirowych [1, 2].

Zasada działania przepływomierza wirowego polega na wytworzeniu regularnych wirów. Wiry są wytwarzane za przeszkodą, której kształt ma bezpośredni wpływ na czułość i zakres pomiarowy przepływomierza. Zależność częstotliwości powstających wirów i prędkości przepływu wyraża liczba podobieństwa Strouhala [1, 2, 3]:

$$St = \frac{f \cdot d}{v} \quad (1)$$

gdzie:  $St$  – liczba Strouhala,  $f$  – częstotliwość generowanych wirów,  $d$  – wymiar charakterystyczny przeszkody,  $v$  – średnia prędkość przepływu.

Podstawową zaletą przepływomierzy wirowych jest to, że wprowadza on bardzo małe opory przepływu. Wadą jest stosunkowo wąski zakres pomiarowy, na który zasadniczy wpływ ma kształt generatora wirów [4, 5]. Poszukiwanie nowych kształtów wiąże się z koniecznością oceny regularności powstających wirów i zjawisk im towarzyszących. Jednym ze sposobów badania tego rodzaju przepływów jest wizualizacja ruchu płynu.

Różne metody wizualizacji są obecnie szeroko stosowane w połączeniu z komputerową analizą obrazu. Pierwsze przepływomierze wirowe powstawały na podstawie badań opartych na wizualizacji strugi płynu. W XV wieku Leonardo da Vinci wykorzystał wizualizację przepływu podczas obserwacji wody w rzece oraz naszkicował profile formowania się wirów [6]. Następnie w 1878 r., Strouhal odkrył, że wysokość tonu generowanego przez drut wystawiony na działanie wiatru jest proporcjonalna do ilorazu średnicy drutu i prędkości wiatru. W 1954 roku Roshko zaproponował wykorzystanie zjawiska generacji ścieżki wirowej von Karmana w przepływomierzach wirowych [7]. W 1911 r. Theodore von Karman na podstawie obserwacji Hiemenz'a, które dotyczyły obserwacji powstawania wirów tworzących się za opływającym przez ciecz walcem, opisał teorię powstawania ścieżki wirowej [8]. Pomimo tego, że wizualizacja nie zapewnia dużej dokładności, umożliwia obserwację dużego obszaru i zjawisk towarzyszącym powstawaniu wirów [2]. Z tego względu ciągle jest ona często stosowaną metodą badawczą.

W pracy przedstawiono stanowisko do wizualizacji opływu generatorów wirów przepływomierzy wirowych. Bardzo ważnym parametrem, który należy wyznaczyć podczas takich badań jest prędkość cieczy w przestrzeni badanej. W pracy zaproponowano metodę pomiaru prędkości ruchu cieczy na podstawie obrazu zarejestrowanego podczas przepływu płynu wraz z cząstkami znacznikowymi w przestrzeni pomiarowej.

### 2. WIZUALIZACJA PRZEPŁYWU

Obecnie stosowanych jest wiele różnych metod wizualizacji przepływu [9, 11, 12, 13]. Większość metod wizualizacji oparta jest na wprowadzeniu do cieczy różnego rodzaju znaczników, a następnie obserwowanie w jaki sposób są one unoszone przez płynącą ciecz lub gaz. Zastosowanie znaczników umożliwia obserwację ruchu płynu oraz pomiar lokalnych prędkości ruchu płynu lub gazu. Anemometria obrazowa - PIV (jęz. ang. PIV – Particle Image Velocimetry) wykorzystuje metodę rejestracji typu mult-exposure oraz optyczną analizę autokorelacji [9, 10,

13]. Obrazy rejestrowane są przy pomocy sprzętu fotograficznego, a pole przepływu wyznaczane jest przez obliczanie przestrzeni korelacji w małych obszarach badawczych. Pewną modyfikacją metody PIV jest cyfrowa metoda obliczeniowa tj. DPIV – Digital Particle Image Velocimetry). Technika ta pozwala na wyszukiwanie wektorów prędkości przepływającego płynu metodą korelacji obrazów [9, 15]. Do płynów dodawane są cząstki wskaźnikowe, takie jak pyłki roślinne, tworzywo sztuczne o zbliżonej gęstości do płynu, aby możliwa była obserwacja przepływu oraz zachowania się warstw płynu. W metodzie tej bardzo istotne jest odpowiednie dobranie wielkości i gęstości znaczników. Znaczniki powinny być tak dobrane aby nie zakłócały ruchu płynu. Ich gęstość powinna być zbliżona do gęstości płynącego medium lub ich masa powinna być na tyle mała, aby znaczniki mogły być swobodnie unoszone przez płynące medium [9, 15].

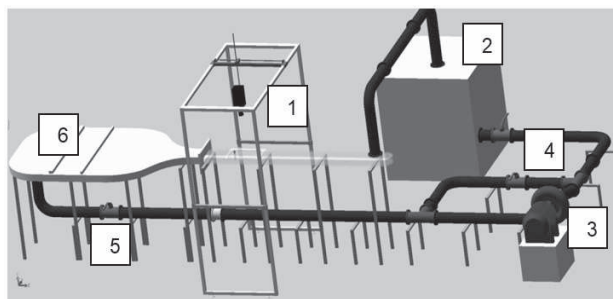
Do wizualizacji przepływów gazów najczęściej stosuje się znaczniki w postaci rozmaitych dymów lub małych kropelek cieczy np. aerozole. Do wizualizacji przepływów cieczy stosuje się różnego rodzaju barwniki, farby oraz małe pęcherzyki gazu np. pęcherzyki wodoru wytwarzane w cieczy metodą elektrolityczną. Niejednokrotnie znacznikami są niewielkie polimerowe cząstki stałe o gęstości zbliżonej do gęstości cieczy.

W pracy przedstawiono metodę pomiarową zbliżoną do PIV, lecz o innym sposobie obliczania wartości lokalnych prędkości. Metoda zaproponowana przez autorów podobnie jak w standardowej metodzie PIV oparta jest na obserwacji ruchu znaczników wprowadzonych do cieczy. Znaczniki posiadają jednak znacznie większe wymiary niż znaczniki stosowane w metodzie PIV. Obliczenie wartości prędkości poruszającego się znacznika oparta jest na analizie obrazu jego ruchu na podstawie tylko jednego obrazu. Nie stosuje się w tym przypadku korelacji obrazowej co najmniej dwóch następujących po sobie obrazów, jak to ma miejsce w metodzie PIV. W metodzie zaproponowanej przez autorów wykorzystuje się analizę śladu ruchu znacznika zarejestrowanego przy stosunkowo długim czasie naświetlania.

## 2.1. Stanowisko badawcze

W celu przeprowadzenia badań opływu różnych generatorów wirów zbudowano stanowisko wyposażone w układ do cyfrowej anemometrii obrazowej (rys.1). Podstawowym elementem stanowiska jest przezroczysty tunel 1 o przekroju prostokątnym, o wymiarach 50 x 250mm. Tunel wykonano ze szkła akrylowego, którego górna pokrywa jest demontowana, umożliwiając umieszczenie wewnątrz tunelu różnego rodzaju generatorów wirów. Tunel jest zasilany wodą ze zbiornika magazynowego 2 o pojemności 1 m<sup>3</sup>. Przepływ cieczy jest wymuszany za pomocą pompy 3 o wydajności 17 m<sup>3</sup>/h i wysokości podnoszenia 18 m. Pompa napędzana jest silnikiem elektrycznym o mocy 3 kW. Woda w stanowisku badawczym krąży w układzie zamkniętym, a jej strumień jest regulowany za pomocą zaworu dławiącego 5. Ciśnienie w układzie regulowane jest za pomocą zaworu 4 zamontowanego na obiegu bypass-a pompy. W celu jednoczesnego pomiaru prędkości cieczy na wlocie do kanału, zastosowano prostownicę 6. Prostownicę stanowi odpowiednio wyprofilowany kanał powodujący zwiększenie prędkości przepływu przy ściankach bocznych kanału, przy jednoczesnym wyeliminowaniu turbulencji w płynie. Nad kanałem pomiarowym umieszczono kamerę 7 do rejestracji

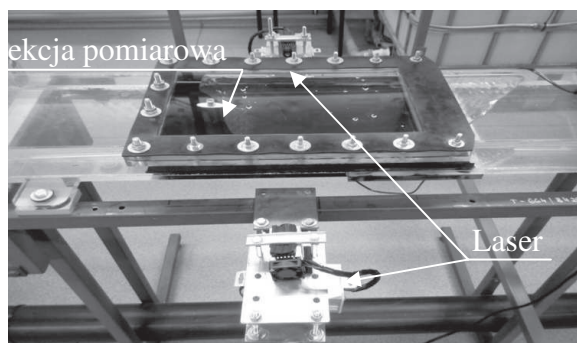
ruchu znaczników. Na stanowisku zastosowano kamerę SONY ILCE-7SM2. Kamera umożliwia rejestrację obrazu z szybkością do 120 klatek/s z rozdzielczością HD. Ponadto umożliwia robienie pojedynczych zdjęć z czasem ekspozycji od 1/8000 s do 30 s .



Rys. 1. Stanowisko do wizualizacji przepływu, opis w tekście

W badaniach zastosowano znaczniki z tworzywa sztucznego. Materiałem był poliamid o gęstość 940 kg/m<sup>3</sup> i granulacji od 20 μm do 1 mm. Znaczniki posiadają powierzchnię dobrze odbijającą światło.

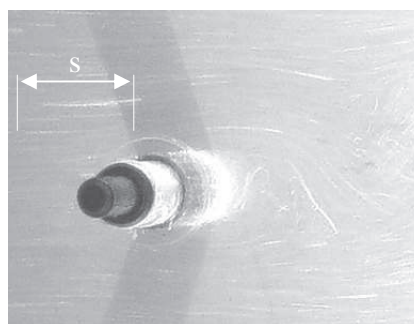
Sekcję pomiarową stanowi odcinek o długości 450 mm (rys. 2). Sekcja jest oświetlana w płaszczyźnie poziomej z dwóch kierunków. Źródło światła stanowią dwa lasery liniowe o mocy 2W, każdy o długości fali 520 nm. Lasery zamontowano na powierzchniach bocznych kanału w taki sposób, aby oświetlały warstwę przepływu o grubości 1mm w środku wysokości kanału.



Rys. 2. Sekcja pomiarowa

## 2.2. Metoda pomiaru prędkości cieczy

Prędkość przepływu płynu wyznaczono na podstawie zdjęcia przepływu robionego przy odpowiednio długim czasie ekspozycji (rys.3). Poruszające się w płaszczyźnie oświetlanej przez światło laserowe znaczniki powodują odbijanie światła w kierunku kamery. Długi czas ekspozycji powoduje, że wraz z przemieszczeniem znacznika naświetlane są kolejne piksele obrazu. W efekcie na zdjęciu obserwuje się charakterystyczny ślad ruchu znacznika.



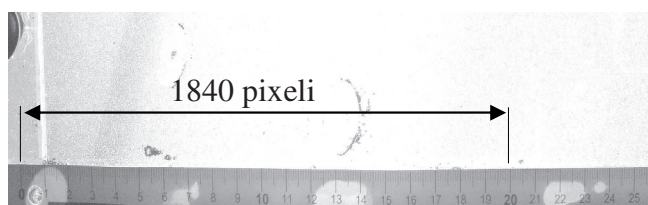
Rys. 3. Widok ruchu znaczników

Droga przebyta przez znacznik stanowi podstawę do obliczenia prędkości i kierunku ruchu cieczy. Prędkość jest obliczana na podstawie wzoru:

$$v = \frac{k \cdot p}{t} \quad (2)$$

gdzie:  $v$  – prędkość ruchu płynu,  $k$  – współczynnik skali,  $p$  – liczba pikseli,  $t$  – czas ekspozycji.

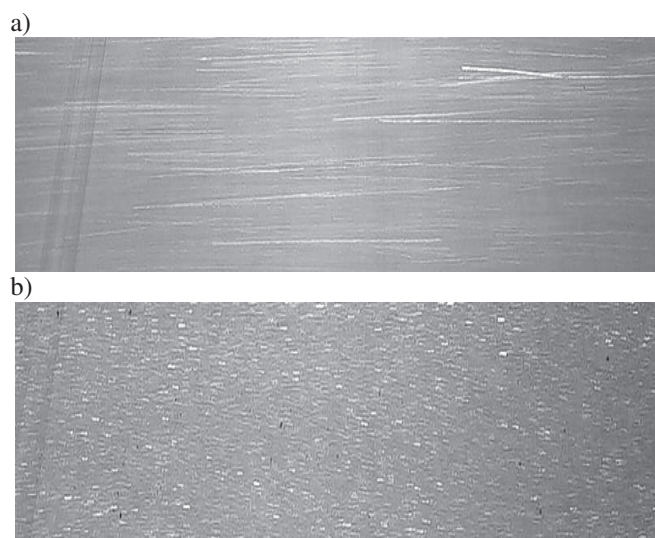
Współczynnik skali został wyznaczony na podstawie zdjęcia wzorca odległości umieszczonego bezpośrednio w sekcji pomiarowej (rys.4). Współczynnik skali stanowi iloraz długości odczytanej ze wzorca przez liczbę pikseli odpowiadającą tej długości.



Rys. 4. Wzorzec długości

### 3. WYNIKI BADAŃ

Długość śladu ruchu cząstki zależy od prędkości przepływu i czasu ekspozycji (rys.5). W przypadku długich czasów ekspozycji i dużej prędkości ruchu znaczników uzyskuje się duże długości śladu ruchu. Wydłużanie śladów korzystnie wpływa na dokładność pomiaru, może jednak prowadzić do zwiększenia niepewności pomiaru. Ruch cieczy w kanale jest przepływem trójwymiarowym. Znaczniki poza przemieszczaniem się w płaszczyźnie poziomej, poruszają się również w pionie. W przypadku długiej drogi, którą przemierza znacznik w czasie jednej ekspozycji występuje duże ryzyko, że opuści on przekrój oświetlany przez laser przed zakończeniem czasu ekspozycji. Spowoduje to, że ślad ruchu cząstki na zdjęciu zostanie skrócony.



Rys. 5. Obrazy śladów znaczników dla a) długiego czasu ekspozycji 1/10 s i dużej prędkości ruchu znaczników 799 cm/s b) dla krótkiego czasu ekspozycji 1/50 s i wolnego poruszania się znaczników 47 cm/s

Ponieważ w przedstawionej metodzie nie jest możliwe wykrycie wszystkich śladów znaczników, które są zarejestrowane w ciągu całego czasu ekspozycji, konieczne jest przeprowadzenie analizy wpływu czasu ekspozycji na niepewność pomiaru. Zbyt długi czas ekspozycji spowoduje wzrost niepewności pomiaru. Z kolei dla krótkich czasów ekspozycji, ślady dla wolnych przepływów cieczy są bardzo małe. Będzie to miało wpływ na błąd pomiaru, gdyż duży wpływ na to ma rozdzielczość obrazu. W skrajnych przypadkach może to powodować, że różnica kilku pikseli w długości śladu prowadzi do znacznych błędów pomiaru.

Ze względu na duży wpływ czasu ekspozycji na niepewność pomiaru postanowiono określić zalecane długości czasów ekspozycji w zależności od prędkości ruchu znaczników. W tym celu przeprowadzono szereg pomiarów prędkości ruchu cieczy, wykonując zdjęcia przy różnych ustawieniach czasu ekspozycji. Prędkość ruchu znaczników zmieniano w zakresie od 10 do 650 mm/s. Czas ekspozycji zmieniano skokowo w zakresie od 1/5 s do 1/50 s. Dla poszczególnych serii zdjęć oszacowano niepewność standardową.

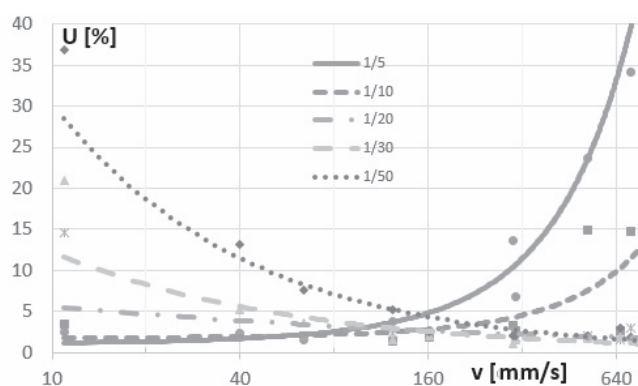
$$U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (v_i - v_s)^2}{N(N-1)}} \quad (3)$$

gdzie:  $v_i$  – prędkość ruchu dla i-tego śladu znacznika,  $v_s$  – prędkość średnia,  $N$  – liczba pomiarów.

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki oszacowania niepewności dla różnych czasów ekspozycji w zależności od prędkości poruszania się znaczników. W celu ułatwienia oceny wpływu prędkości ruchu znaczników na niepewność pomiaru, wartości niepewności przedstawiono w procentach. Wartości procentowe odniesiono do średniej prędkości ruchu znaczników.

$$U[\%] = \frac{U}{v_s} \cdot 100\% \quad (4)$$

Jak wynika z przedstawionych charakterystyk czasu ekspozycji poniżej 1/10 s umożliwiającą uzyskiwanie małych niepewności w zakresie przepływów poniżej 100 mm/s. Stosowanie czasów ekspozycji krótszych od 1/30 s zaleca się stosowanie dla prędkości cieczy powyżej 500 mm/s.



Rys. 6. Zależność niepewności pomiaru od prędkości poruszania się znaczników dla różnych czasów ekspozycji

Na podstawie przeprowadzonej analizy określono zalecane czasy ekspozycji dla różnych zakresów prędkości ruchu znaczników. Wyniki zestawiono w tablicy 1. Porównując wartości zamieszczone w tablicy dla większości zakresów pomiarowych, występują co najmniej dwa zalecane czasy ekspozycji. Rozwiązanie to pokazuje, że jest pewna swoboda w doborze czasów ekspozycji, niemniej wymaga to zachowania pewnych wartości progowych.

Tablica 1. Zalecane czasy ekspozycji w zależności od prędkości cieczy

Zalecany czas ekspozycji [s]	Średnia prędkość ruchu znaczników [mm/s]
1/5	< 100
1/10	< 150
1/20	100 ÷ 400
1/30	> 150
1/50	> 400

#### 4. WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki badań pomiaru prędkości ruchu cieczy zmodyfikowaną metodą PIV. Prędkość określono na podstawie zdjęć fotograficznych z wizualizacji ruchu cieczy, w której znajdują się znaczniki optyczne w postaci cząstek ciała stałego (Poliamid, koloru czarnegoo granulacji od  $\mu\text{m}$  do 1 mm). Zdjęcia wykonano za pomocą aparatu fotograficznego o długim czasie ekspozycji. Przedstawiona metoda umożliwia wyznaczenie prędkości ruchu cieczy z dokładnością do kilku procent wartości prędkości przepływającej cieczy. Niepewność takiego pomiaru znacząco zależy od wartości prędkości cieczy. W celu zachowania pożądanej dokładności pomiaru konieczne jest odpowiednie dobranie wartości czasu ekspozycji, zależnego od szybkości obserwowanego zjawiska. Przedstawiona w pracy analiza ułatwi dobieranie czasów ekspozycji w przyszłych badaniach opartych na wizualizacji ruchu cieczy.

#### 5. LITERATURA

1. Shiba H.: A speed meter of new type, *Trans. Japanese Shipbuilding* 97, 1960 s. 127-134.

2. Pankanin G.: Przepływomierz wirowy – analiza zjawiska generacji wirów. Współczesne metody badań i wizualizacji ścieżki wirowej von Karmana. *Prace naukowe. Elektronika* z. 168, OWPW, Warszawa 2009.

3. Venugopal A., Agrawala A., Prabhu S.V.: Review on vortex flowmeter—Designer perspective, *Sensors and Actuators A: Physical*, Indie 2011.

4. Gandhi B.K., Singh S.N., Seshadri V., Singh J.: Effect of bluff body shape on vortex flow meter performance, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 11, s. 378-384, 2004

5. Singh S.N. Seshadri V., Swaroop A.: Effect of size and shape of the bluff body on Strouhal number in pipe flow, 20<sup>th</sup> National Conf on FMFP, 1993.

6. Bartoli G., Borsani A., Borri C, Martelli A., Procino L. Vezzosi A.: Leonardo, the wind and the flying sphere , Italy, EACWE 5, 2009

7. Roshko A.: On the developmnet of turbulent wakes from vortex streets, *NACA Report*, No 1191, 1954.

8. Honda S., Yamasaki H., Vortex shedding in a three-dimensional flow through a circular pipe, *Proc. IMEKO X Congress*, Prague

9. Zajac D., Ulbrich R.: Nieinwazyjne metody badań przepływów dwufazowych gaz-ciecz, *oficyna Wydawnicza politechniki Opolskiej*, Opole, 2005.

10. Anweiler, S., Ulbrich, R.: Flow pattern for different fluidization apparatuses. *Inżynieria Chemiczna i Procesowa*, 25 (3), (2004), s. 577-582

11. Anweiler, S., Masiukiewicz, M.: Application of stereology for two-phase flow structure validation in fluidized bed reactors. *Thermal Science*, 20 (4), (2016), s. 1199-1208.

12. Lynch K. P., Scarano F.: An efficient and accurate approach to MTE-ART for time-resolved tomographic PIV. *Experiments in Fluids*, 56:66, (2015), 1-16.

13. Schröder A. et. all: Advances of PIV and 4D-PTV "Shake-The-Box" for Turbulent Flow Analysis –the Flow over Periodic Hills. *Flow Turbulence Combust.* 95, (2015), s. 193–209.

14. Shi B., Wei J., Zhang Y.: A novel experimental facility for measuring internal flow of Solid-liquid two-phase flow in a centrifugal pump by PIV. *International Journal of Multiphase Flow.* 89, (2017), s. 266-276.

15. Fan L., Xu N.: Experimental investigation of fibre particles in a turbulent stirred tank with DPIV. *Powder Technology.* 316, (2017), s. 329-337.

### METHOD OF LIQUID FLOW MEASUREMENT USING A MODIFIED PIV METHOD

Phenomena related to the flow around different types of obstacles belong to one of the most difficult issues of fluid mechanics. Fluid flowing to the obstacle is disturbing what is associated with the formation of vortices. The frequency and intensity of vortices depend on flow and type of obstacle. The phenomenon is used in vortex flow meters. The paper present the test stand of flow visualization for vortex bluff bodies of vortex flowmeter. Very important parameter, which is necessary to designate in testing space is flow velocity. The paper proposes a method of measuring the velocity of liquid motion based on the image recorded during the visualization.

The flow velocity was determined by the photographic images from the fluid flow visualization in which the tags were located. Pictures were taken with a camera with a long exposure time. The proposed method enables the determination of the fluid velocity to a certain percentage of the measured value. The uncertainty of this measurement significantly depends on the value of the measured velocity. In order to maintain the desired measurement accuracy, it is necessary to adjust the exposure time accordingly.

**Keywords:** flow visualization, liquid flow measurement.