

Alabrudziński Sławomir¹⁾, Kowalewski Tomasz A.²⁾, Suchecki Witold¹⁾

- 1) Politechnika Warszawska
Instytut Inżynierii Mechanicznej w Płocku
- 2) Polska Akademia Nauk
Instytut Podstawowych Problemów Techniki

METODA ANALIZY POLA PRĘDKOŚCI Z UWZGLĘDNIENIEM ISTNIENIA DUŻYCH OBIEKTÓW W PRZEPLYWIE

Słowa kluczowe: przepływ dwufazowy, cyfrowa anemometria obrazowa, korelacja obrazów, wizualizacja przepływów

Streszczenie: Celem pracy było opracowanie sposobu pomiaru pól prędkości w przepływach indukowanych opadaniem lub wznoszeniem się cząstek stałych lub pęcherzy gazowych w cieczy. Zaprojektowano stanowisko pomiarowe, opracowano algorytmy analizy danych pomiarowych (oparte po części na metodzie PIV) i realizujące je programy komputerowe. Wykonano szereg badań eksperymentalnych w celu przetestowania i znalezienie ograniczeń opracowanej metody.

Wprowadzenie

Celem metody jest pomiar prędkości w przepływach dwufazowych, zarówno pola prędkości w fazie ciągłej, jak też prędkości cząstek fazy rozproszonej.

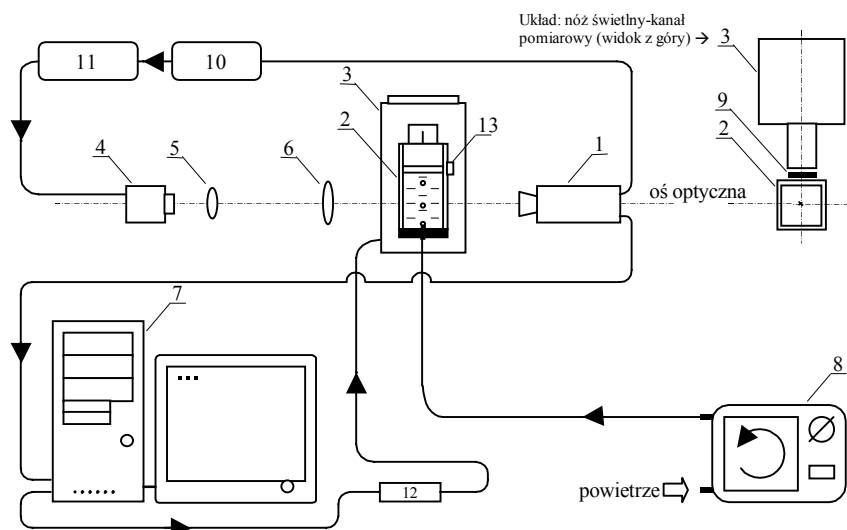
Przedział rozmiarów cząstek fazy rozproszonej występujących w przepływach dwufazowych jest bardzo duży, począwszy od cząstek o rozdrobnieniu subkoloidalnym do dużych cząstek rzędu kilku centymetrów występujących podczas transportu hydraulicznego. Pojęcie duże obiekty w przepływie jest względne. Rozumiane jest jako określenie dla cząstek fazy rozproszonej, które powinny być co najmniej kilka razy większe od cząstek posiewu (metoda PIV [3]).

Dodatkowymi wytycznymi opracowywanej metody były: możliwie mały stopień skomplikowania budowy stanowiska badawczego, odciążenie badacza w wykonywaniu żmudnych i czasochłonnych czynności oraz łatwość modyfikacji i rozwoju. Badacz może się skupić na zbieraniu materiału doświadczalnego i jego oględzinach w celu ustalenia parametrów analizy numerycznej.

Badania eksperymentalne, których celem było testowanie metody i znalezienie jej ograniczeń, prowadzone były dla dwóch przypadków przepływów dwufazowych: opadania cząstek stałych i wznoszenia się pęcherzy powietrznych w nieruchomej cieczy.

1 Stanowisko pomiarowe i przebieg doświadczenia

Budowę stanowiska pomiarowego schematycznie obrazuje Rys. 1. Jego głównym elementem był przezroczysty kanał pomiarowy wykonany z pleksiglasu o podstawie kwadratu o boku długości 38mm.



Rys. 1: Schemat stanowiska pomiarowego: 1–kamera, 2–kanał pomiarowy z dyszą (zalaną cieczą), 3–lampa noża świetlnego, 4–tylne impulsowe źródło światła (czerwony LED), 5–soczewka wypukła (cylindryczna), 6–soczewka wypukła (kulista), 7–komputer z kartą i oprogramowaniem do przechwytywania obrazów wideo, 8–pompa perystaltyczna, 9–filtr (niebieski), 10–synchronizator impulsów, 11–wzmacniacz impulsów, 12–sterownik, 13–dozownik z cząstkami stałymi.

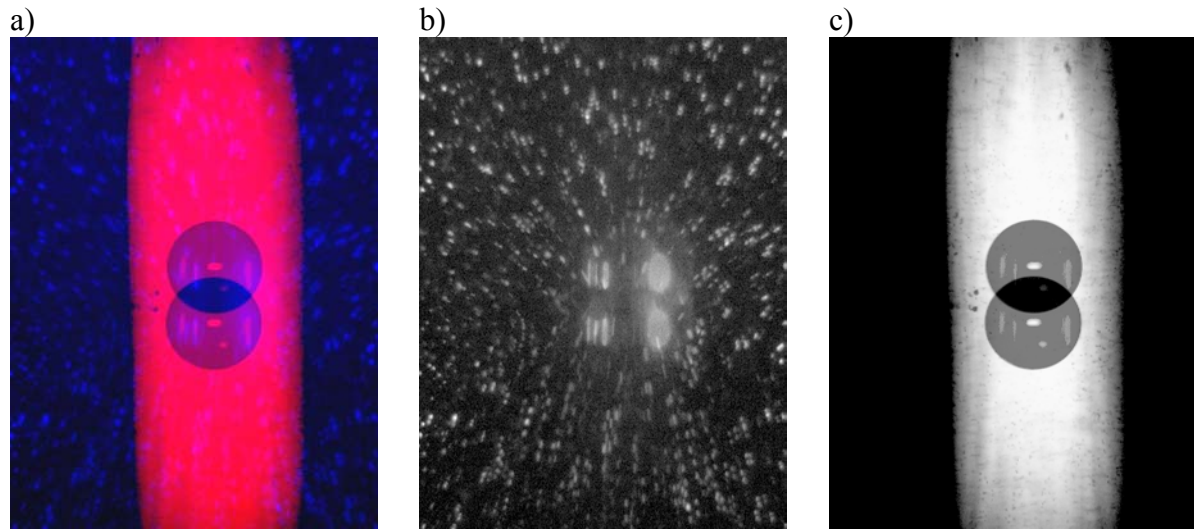
Za umieszczenie w kanale pomiarowym pęcherzy powietrznych zastosowano układ dysza – pompa perystaltyczna, którego zadaniem było tworzenie pęcherzy w dolnej części kanału (średnica dyszy wynosiła 1mm). Dozownik z cząstkami stałymi, umieszczony został w górnej części kanału pomiarowego.

Dla otrzymania informacji o polu prędkości cząstek fazy rozproszonej i prędkościach cząstek fazy ciągłej, w danej chwili czasowej, równocześnie rejestrowane były dwa obrazy: profilu cząstek oraz posiewu w „płaszczyźnie” noża świetlnego [3]. W tym celu stanowisko wyposażono w dwa rodzaje oświetlenia: układ noża świetlnego (sterownik, nóż świetlny i niebieski filtr optyczny) oraz układ oświetlenia tylnego (synchronizator impulsów, wzmacniacz impulsów, tylne impulsowe źródło światła (czerwony LED), soczewki wypukłe). W celu rejestracji obrazów przepływu w kanale pomiarowym, z równoczesnym zastosowaniem oświetlenia tylnego i noża świetlnego, wykorzystano właściwość rejestracji barw kamerą 3CCD (Sony 3CCD-XC003P), która została wykorzystana jako zespół trzech kamer monochromatycznych dla trzech składowych barwy: czerwonej, zielonej i niebieskiej. Wykorzystując dwie z wymienionych barw (dla każdego toru optycznego inną), rejestrowano jednocześnie dwa niezależne obrazy, mając gwarancję zachowania jednakowych warunków powiększenia i obszaru rejestracji dla obydwu torów optycznych. Takie rozwiązanie jest uniwersalne dla różnych rodzajów badanych cząstek fazy rozproszonej (cząstki stałe, pęcherze gazowe) i daje wiarygodne informacje o położeniu tych cząstek.

Wprowadzenie układu noża świetlnego związane było z wykorzystaniem metody cyfrowej anemometrii obrazowej (DPIV) do wyznaczania pól prędkości w fazie rozproszonej, a dobór wszystkich parametrów rejestracji podlegał tym samym zasadom, co w metodzie DPIV [2]. Zadaniem układu oświetlenia tylnego było wyodrębnienie obrazu cząstek fazy rozproszonej. Źródłem światła był zespół kilku diod LED, których impulsy świetlne zsynchronizowane zostały z pracą kamery.

W przypadku układu oświetlenia tylnego samo źródło światła miało barwę czerwoną, natomiast do układu noża świetlnego należało wprowadzić element dodatkowy – filtr optyczny znajdujący się między kanałem pomiarowym, a nożem świetlnym.

Kamera podłączona była do komputera poprzez trzykanałową kartę, do akwizycji obrazów barwnych, typu AM-STD (Imaging Technology Inc.), które pobierane były w równych odstępach czasowych (co 40ms).



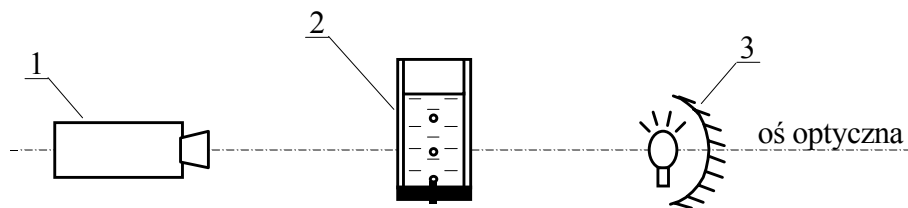
Rys. 2: Widok w obszarze rejestracji kamery: a) obraz oryginalny b) kanał niebieski c) kanał czerwony

2 Analiza ruchu cząstki poruszającej się w cieczy

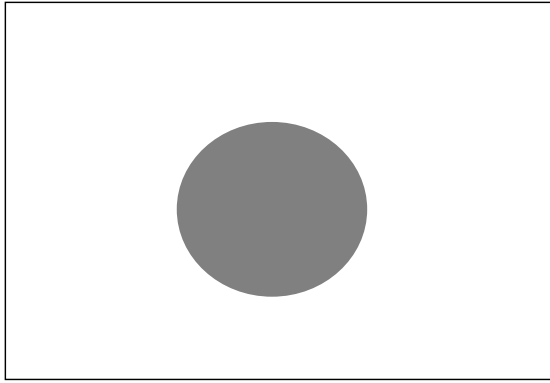
Analiza pól prędkości odbywała się oddzielnie dla każdej z faz: rozproszonej i ciągłej. Podstawą analizy rozkładu prędkości był: obraz profilu cząstki – dla fazy rozproszonej oraz obraz posiewu – dla fazy ciągłej.

2.1 Podstawy analizy ruchu cząstki

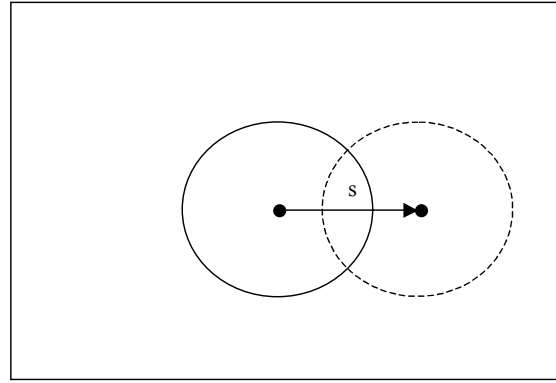
Profil cząstki jest obrazem zarejestrowanym przez kamerę w układzie przedstawionym na rysunku Rys. 3. Zawiera on informację o położeniu i kształcie cząstki w danej chwili czasowej. Obszar ciemny (Rys. 4) odpowiada cząstce fazy rozproszonej, a jasny – fazie ciągłej.



Rys. 3: Schemat toru optycznego rejestracji obrazów profilu cząstek: 1) kamera, 2) kanał pomiarowy, 3) źródło światła



Rys. 4: Profil cząstki



Rys. 5: Wyznaczenie przemieszczenia cząstki.

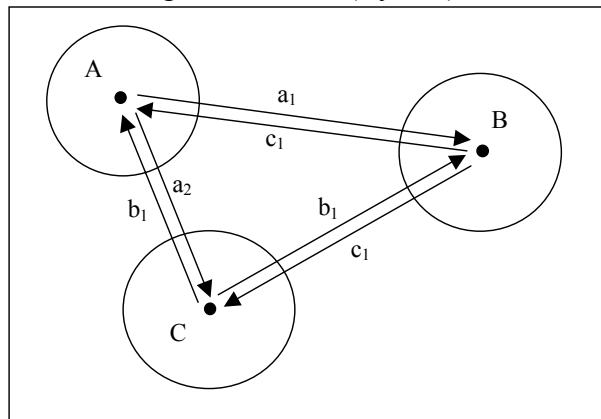
Znajdujące się na obrazie cząstki posiewu, ze względu na znacznie mniejsze rozmiary są łatwe do odseparowania metodami filtracji obrazu [5, 6].

Na podstawie profilu cząstki możliwe było odszukanie położenia jej środka ciężkości oraz rozmiarów cząstki fazy rozproszonej. Kształt cząstek rzeczywistych przyjmowany był jako kształt odpowiadających im figur przestrzennych: kuli i elipsoidy obrotowej.

Przy znanym odstępnie czasowym między uchwyceniem obrazów $\Delta t[s]$, ich podziale $p[\text{pix}/\text{mm}]$ i przemieszczeniu cząstki $\bar{s}[\text{pix}]$, wyznaczano prędkość wznoszenia się lub opadania cząstki:

$$\bar{v} = \frac{\bar{s}}{\Delta t} \cdot \frac{1}{p} \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$$

W przypadku, gdy na obrazie znajduje się profil więcej niż jednej cząstki zachodzi potrzeba ich identyfikacji. Jest ona konieczna w celu poprawnego wyznaczenia ich przemieszczeń, a co za tym idzie – prędkości. Identyfikacja cząstek przeprowadzana była na podstawie analizy ich położenia względem siebie (Rys. 6).



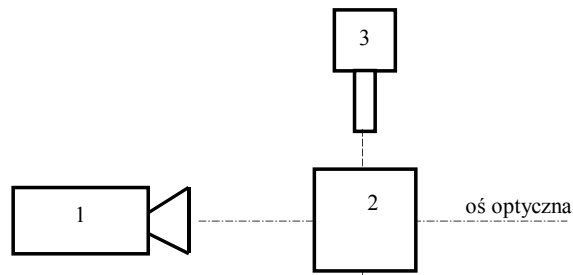
Rys. 6: Określenie względnego położenia cząstki.

Cząstki mające takie samo względne położenie na obydwu obrazach identyfikowane były jako ta sama. Jej prędkość wyznaczana była analogicznie jak w przypadku cząstki pojedynczej.

2.2 Analiza pola prędkości cieczy metodą PIV

Do pomiaru pól prędkości w fazie ciągłej zastosowana została jedna z metod wykorzystywanych w pomiarach przepływów jednofazowych, którą jest cyfrowa

anemometria obrazowa (DPIV). Obrazy do korelacji pobierane były w układzie przedstawionym na rysunku Rys. 7.



Rys. 7. Schemat toru optycznego rejestracji obrazów w metodzie PIV: 1) kamera, 2) kanał pomiarowy, 3) nóż świetlny

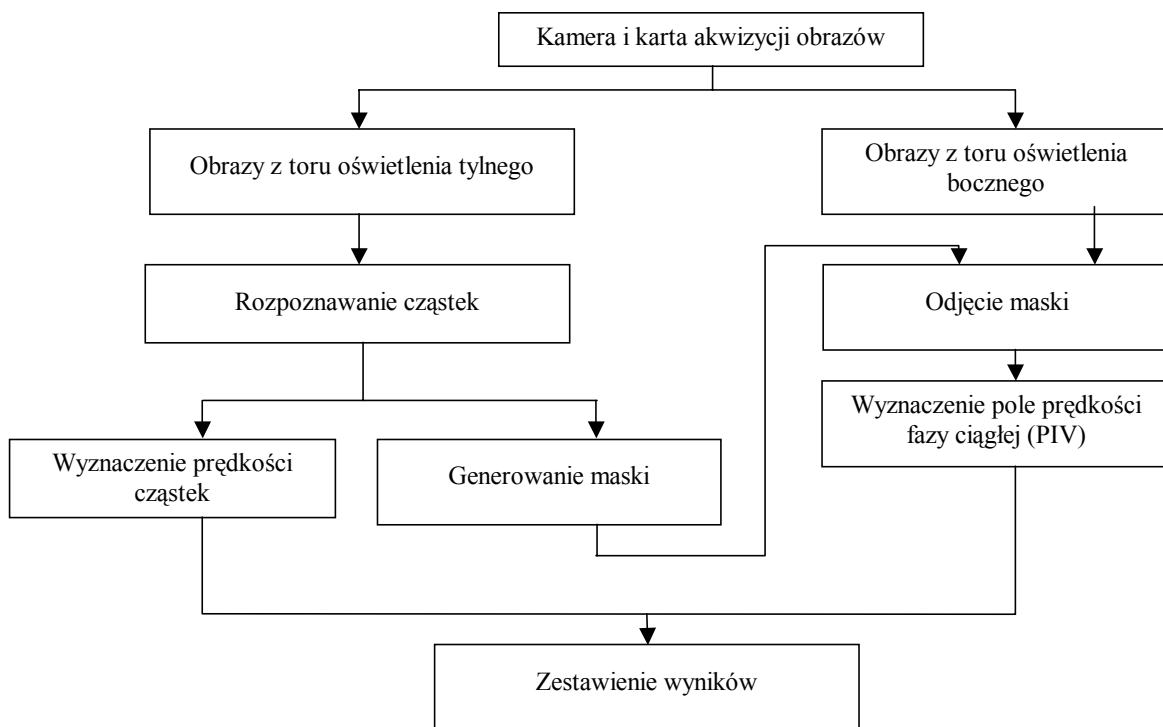
Metoda PIV została opracowana w celu wyznaczania pól prędkości w przepływach jednofazowych. W tej pracy została ona wykorzystana do wyznaczania pola prędkości w fazie ciągłej. Jednak z uwagi na uśredniające działanie korelacji i traktowanie cząstek fazy rozproszonej jako skupisk cząstek posiewu, konieczne było wstępne przygotowanie obrazów do analizy. Czyniono to przez usunięcie cząstek fazy rozproszonej z analizowanych obrazów, a w praktyce przez wyznaczenie maski cząstek i odjęcie jej od obrazów poddawanych analizie.

3 Analiza wyników

Proces analizy numerycznej wyników badań podzielony został na trzy etapy, z których każdy składał się z kilku kroków. Za realizację poszczególnych kroków odpowiadały opracowane w tym celu programy komputerowe.

Etapy numerycznej analizy wyników badań:

- analiza prędkości cząstek fazy rozproszonej,
- analiza pola prędkości fazy ciągłej,
- zestawienie wyników analiz w postaci kompletnego pola prędkości.

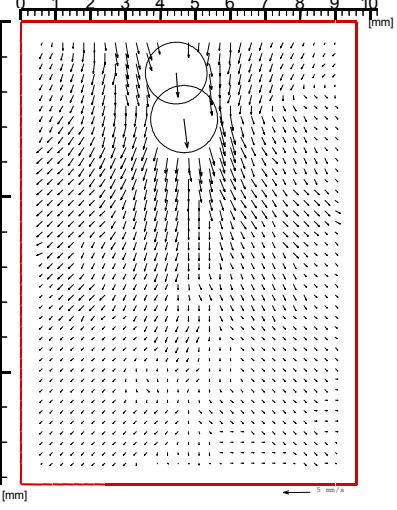
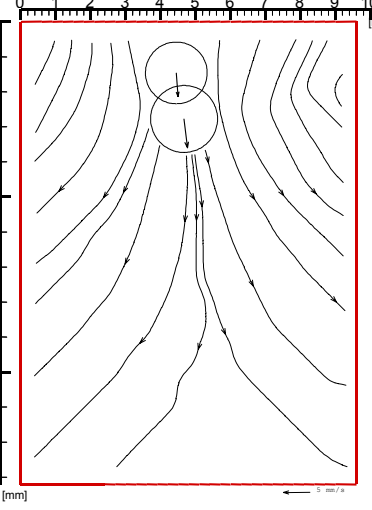
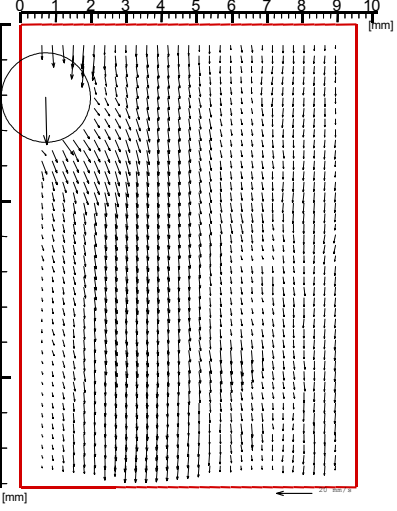
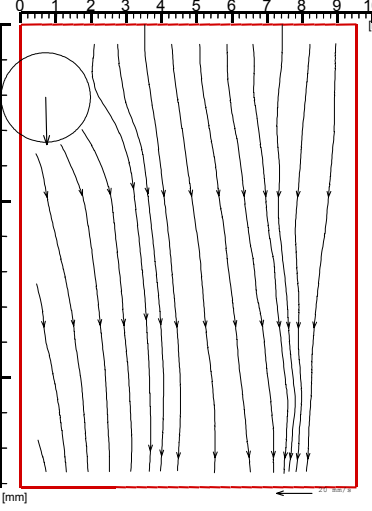
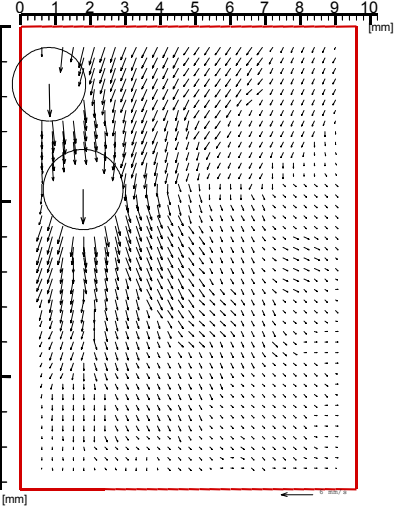
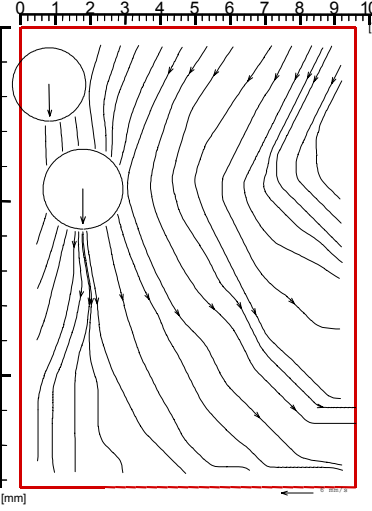


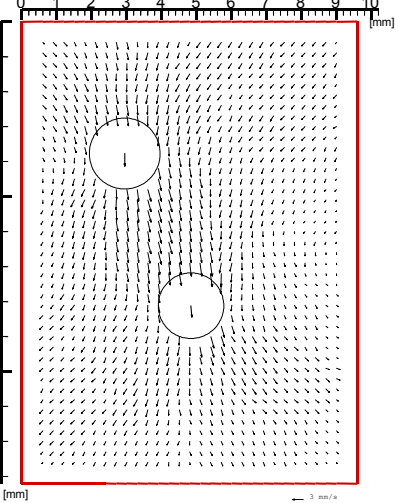
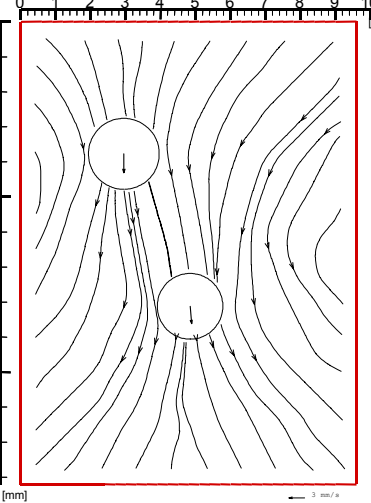
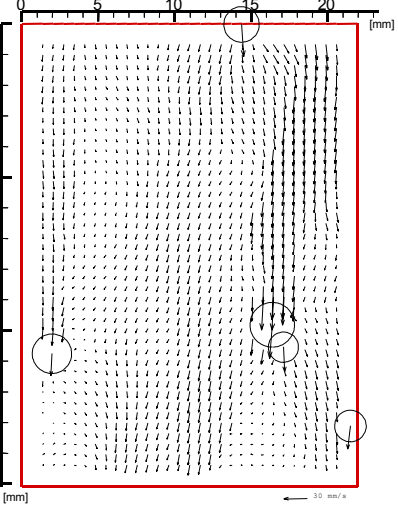
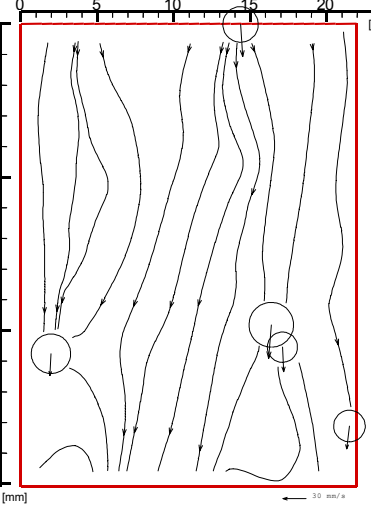
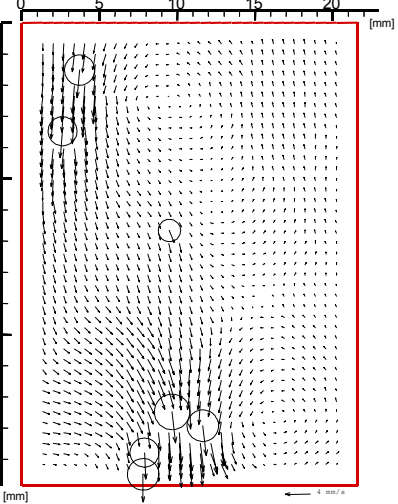
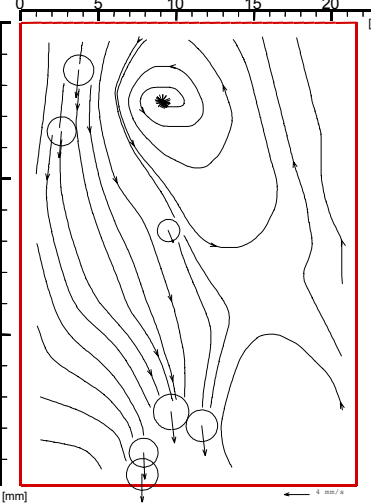
Rys. 8. Schemat blokowy analizy danych pomiarowych.

Poniżej przedstawione zostały wyniki przykładowych analiz wyników badań laboratoryjnych. Aby lepiej zobrazować struktury tworzące się w przepływie, oprócz wykresów pól prędkości zamieszczone zostały wykresy linii prądu, wykonane na ich podstawie, przy pomocy programu „tecplot”.

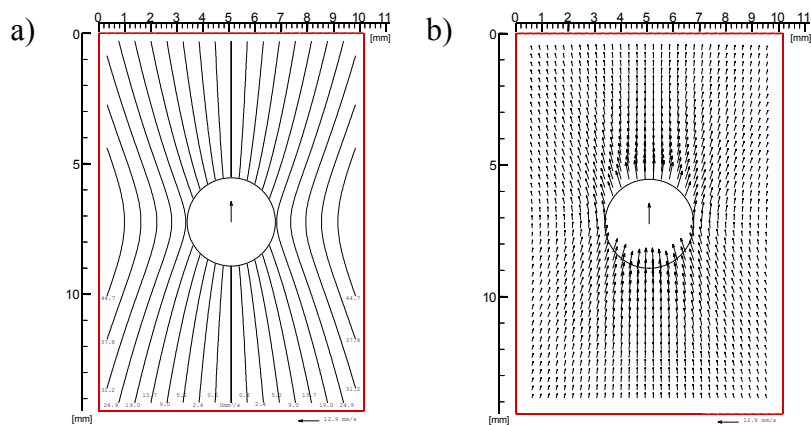
Lp	Pole prędkości i prędkości cząstek	Linie prądu wyzn. na podst. PIV	Opis
1			<p>Opis: Pojedynczy pęcherz gazowy. Faza ciągła: gliceryna Faza rozproszona: pęcherz powietrza o średnicy 3,4mm Prędkość i liczba Reynoldsa cząstki: $V = 10,2 \text{ mm/s}$ $Re = 4,7 \cdot 10^{-2}$</p>

2			<p>Opis: Pojedynczy pęcherz gazowy. Faza ciągła: gliceryna Faza rozproszona: pęcherz powietrza o średnicy 3mm Prędkość i liczba Reynoldsa cząstki: $V = 9,8 \text{ mm/s}$ $Re = 4 \cdot 10^{-2}$</p>
3			<p>Opis: Dwa pęcherze gazowe poruszające się w śladzie. Faza ciągła: gliceryna Faza rozproszona: pęcherze powietrza o średnicach 3,1mm Prędkości i liczba Reynoldsa cząstek: $V = 10,1 \text{ mm/s}$ $Re = 4,3 \cdot 10^{-2}$</p>
4			<p>Opis: Trzy pęcherze gazowe poruszające się w śladzie przy małej odległości. Faza ciągła: gliceryna Faza rozproszona: pęcherze powietrza o średnicach 3,6÷3,7mm Prędkości i liczby Reynoldsa cząstek: $V = 19,5 \div 21,2 \text{ mm/s}$ $Re = 9,8 \cdot 10^{-2} \div 1 \cdot 10^{-1}$</p>

5			<p>Opis: Oddziaływanie dwóch cząstek sztywnych. Faza ciągła: gliceryna Faza rozproszona: cząstki agalitowe o średnicach 1,8mm i 1,9mm Prędkości i liczby Reynoldsa cząstek: $V = 5,5\text{mm/s}$ i $4,5\text{mm/s}$ $Re = 1,4 \cdot 10^{-2}$ i $1,2 \cdot 10^{-2}$</p>
6			<p>Opis: Pojedyncza cząstka sztywna. Faza ciągła: woda Faza rozproszona: cząstka polietylenowa o średnicy 2,5mm Prędkość i liczba Reynoldsa cząstki: $V = 26,7\text{mm/s}$ $Re = 76$</p>
7			<p>Opis: Grupa cząstek sztywnych. Faza ciągła: gliceryna Faza rozproszona: cząstki agalitowe o średnicach 2,1mm i 2,3mm Prędkości i liczby Reynoldsa cząstek: $V = 6,1\text{mm/s}$ i $6,6\text{mm/s}$ $Re = 1,8 \cdot 10^{-2}$ i $2,1 \cdot 10^{-2}$</p>

8			<p>Opis: Pojedyncze cząstki sztywne. Faza ciągła: gliceryna Faza rozproszona: cząstki agalitowe o średnicach 1,9mm i 2mm Prędkości i liczby Reynoldsa cząstek: $V = 3,3\text{mm/s}$ i $3,6\text{mm/s}$ $Re = 8,6 \cdot 10^{-3}$ i $1 \cdot 10^{-2}$</p>
9			<p>Opis: Grupa cząstek sztywnych. Faza ciągła: woda Faza rozproszona: cząstki polietylenowe o średnicach 2,6÷2,9mm Prędkości i liczby Reynoldsa cząstek: $V = 28,6 \div 43,7 \text{ mm/s}$ $Re = 82 \div 140$</p>
10			<p>Opis: Grupa cząstek sztywnych. Faza ciągła: gliceryna Faza rozproszona: cząstki agalitowe o średnicach 1,4÷2,3mm Prędkości i liczby Reynoldsa cząstek: $V = 2,1 \div 5 \text{ mm/s}$ $Re = 4,2 \cdot 10^{-3} \div 1,6 \cdot 10^{-2}$</p>

Pierwsze dwa z przedstawionych wykresów przedstawiają pole prędkości dla pojedynczego pęcherza napływającego do nieruchomej cieczy. W porównaniu z teoretycznym rozwiązaniem Stokesa [1] (Rys. 9), zaobserwować można tworzące się struktury wirowe spowodowane prawdopodobnie bliskością ścianek kanału pomiarowego.



Rys. 9. Teoretyczne rozwiązanie Stokesa wznoszenia się pojedynczego pęcherza gazowego w cieczy: a) linie prądu, b) pole prędkości

4 Podsumowanie i wnioski końcowe

Istotnym parametrem badań stanowiskowych jest odstęp czasowy między analizowanymi obrazami. Jego wartość musi być odwrotnie proporcjonalna do wielkości przemieszczeń obserwowanych w przepływie. Dla obrazów szybkich przepływów należy stosować jak najkrótsze odstępy czasowe. Przy doborze prędkości rejestracji istotna jest nie rzeczywista prędkość przepływu, lecz prędkość na zarejestrowanym obrazie (efekt powiększenia).

Natężenie światła w układzie oświetlenia tylnego powinno być na tyle duże, aby na obrazie profilu cząstek nie były widoczne cząstki posiewu i kontrastowość obrazu była duża. Jednak zbyt intensywne oświetlenie może powodować zafałszowanie rozmiarów samej cząstki.

Pewnym ograniczeniem zaprezentowanej metody, jest ograniczona widoczność, podczas badania zawiesin o dużej koncentracji cząstek fazy rozproszonej. Rozwiązaniem tego problemu może być stosowanie dwóch rodzajów cząstek o tych samych właściwościach: przezroczystych cząstek z współczynnikiem załamania światła równym współczynnikowi załamania światła cieczy i mniejszej liczby zabarwionych cząstek. Innym rozwiązaniem może być zastosowanie cząstek fluorescencyjnych.

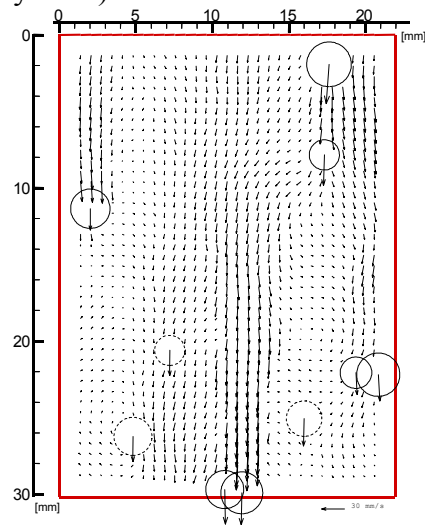
Nie zauważono przeciwwskazań w przystosowaniu opracowanej metody analizy pól prędkości z uwzględnieniem dużych obiektów w przepływie do badania przypadków przepływów wielofazowych.

Negatywny wpływ na dokładność pomiarów ma światło rozproszone, dlatego należy pamiętać o zaciemnieniu pomieszczenia w którym przeprowadzane są badania, bądź o stosowaniu osłon światłochronnych.

Rzucanie cienia przez cząstki przepływające w płaszczyźnie noża świetlnego stanowi kolejne ograniczenie stanowiska badawczego, zwłaszcza dla cząstek o średnicy większej od grubości noża świetlnego. Aby rozwiązać ten problem, w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny noża świetlnego umieścić można lustro odbijające jego światło, pod pewnym kątem do kierunku padania jego promieni.

Jakość rejestrowanych obrazów poprawić można przez skrócenie czasu ich naświetlania. Można tego dokonać np. stosując kamery zaopatrzone w migawkę, lub oświetlenie impulsowe.

Wypływanie cząstek fazy rozproszonej poza „płaszczyznę” noża świetlnego stanowi dość poważny problem, gdyż ich obecność na obrazie profilu cząstek nie ma potwierdzenia w wynikowym polu prędkości (Rys. 10).



Rys. 10. Wykres pola prędkości z naniesionymi cząstkami znajdującymi się poza płaszczyznę noża świetlnego.

Próby rozwiązania problemu można przeprowadzić na przykład następującymi sposobami:

- a) wyeliminowanie takich cząstek podczas analizy numerycznej wykorzystując do tego np. obraz z drugiej kamery, umieszczonej prostopadle do osi optycznej
- b) użycie dwóch noży świetlnych o barwach: niebieskiej i zielonej oraz wykorzystanie (wraz z niebieskim) nieużywanego zielonego kanału kamery do rejestracji obrazów z toru oświetlenia bocznego, aby w ten sposób uzyskać obrazy przepływu w dwóch równoległych płaszczyznach
- c) zmniejszenie głębi ostrości obiektywu kamery, by widoczne były jedynie cząstki znajdujące się w polu noża świetlnego, a obraz pozostałych cząstek był bardzo nieostry lub całkowicie niewidoczny.

Literatura

- [1] Clift R., Grace J. R., Weber M. E.: Bubbles, Drops, and Particles. Academic Press, New York San Francisco London 1978.
- [2] Desaubry C., Gervais P.: A simple particle image velocimetry instrument for low-velocity flows, *Experiments in Fluids*, t. 28 (2000), s. 195–196.
- [3] Kowalewski T. A., Pakleza J., Chalfen J.-B., Duluc M.-C., Cybulski A.: Visualization of vapor bubble growth, *9th. International Symposium on Flow Visualization*, Edinburgh, s. 176-1–176-9, Heriot-Watt University, 2000
- [4] Raffel M., Willert Ch. E., Kompenhans J.: Particle Image Velocimetry. A Practical Guide, Springer, 1998.
- [5] Watkins C. D., Sadun A., Marenka S.: Nowoczesne metody przetwarzania obrazu. WNT, Warszawa 1995
- [6] Wojnar L., Majorek M.: Komputerowa analiza obrazu. Computer Scanning Systems, Kraków 1994