

Witold SUCHECKI

Politechnika Warszawska, Ośrodek Naukowo-Dydaktyczny, Płock

METODA ANALIZY RUCHU CZĄSTKI STAŁEJ W PULSUJĄCYM STRUMIENIU CIECZY Z WYKORZYSTANIEM TECHNIKI STROBOSKOPOWEJ I SYSTEMU KOMPUTEROWEJ ANALIZY OBRAZU

Streszczenie. W wyniku realizacji pracy uruchomiono stanowisko do badań wstępnych, na którym przeprowadzono testy wyposażenia oraz opracowano metodę monitorowania obrazu na stanowisku badawczym. Przeprowadzono badania ruchu cząstki stałej w pulsującym strumieniu cieczy. Opracowano metodykę badań stroboskopowych oraz przeprowadzono badania, które potwierdziły założenia teoretyczne.

Dzięki opracowanej metodzie pomiarowej wykorzystującej efekt stroboskopowy i system komputerowej analizy obrazu można będzie przeprowadzić szczegółowe badania oscylacyjnego ruchu cząstki stałej w strumieniu cieczy. Otrzymane wyniki pozwolą na optymalizację parametrów pulsacji ze względu na zużycie energii i prawdopodobnie intensyfikację procesu wymiany masy poprzez zwiększenie prędkości względnej cząstki stałej w stosunku do cieczy.

A METHOD TO ANALYSE THE MOTION OF SOLID PARTICLE IN OSCILLATORY STREAM OF A LIQUID USING STROBOSCOPIC TECHNIQUE AND COMPUTER AIDED IMAGE PROCESSING SYSTEM

Summary. An experimental rig was built and introductory experiments were carried out with the aim to develop a technique to monitor the images of flow phenomena occurring in a test tube. Preliminary investigations of the motion of a solid particle in oscillatory stream of a liquid were carried out. A stroboscopic imaging method was developed and its efficiency was experimentally verified.

The experimental methodology based on stroboscopic imaging and computer aided image processing makes it possible to study the oscillatory motion of a solid particle in flowing liquid in more detail. It is expected that the parameters of oscillatory flow can be optimised with respect to energy consumption and possible enhancement of mass transfer. A decisive factor is the increase of particle velocity relative to the liquid.

Wprowadzenie

Przepływy dwufazowe ciecz - faza stała występują w wielu procesach przemysłowych, takich jak np.: hydrotransport, krystalizacja, ekstrakcja, fluidyzacja i inne. W przypadkach tych istotną rolę odgrywa prędkość względna jednej fazy względem drugiej, gdyż jej zwiększenie intensyfikuje wymianę ciepła i masy, zmienia warunki transportu itp. Możliwość zwiększenia tej prędkości ponad swobodną prędkość opadania okazuje się w praktyce dość ograniczona, szczególnie gdy mamy do czynienia z ośrodkiem lepkiem. Jednym ze sposobów zwiększenia prędkości jednej fazy względem drugiej jest wywoływanie pulsacji cieczy.

Opracowana w ramach pracy doktorskiej eksperymentalna metoda pomiaru prędkości chwilowych cieczy i zanurzonej w niej cząstki stałej z wykorzystaniem kamery wideo i systemu komputerowej analizy obrazu [3] pozwala na pomiar prędkości chwilowych oraz wizualizację zjawisk przepływowych bez ingerencji fizycznej w samo zjawisko, a więc przebieg zjawiska nie jest zakłócany. Metoda ta może być zastosowana do rejestracji i analizy procesów, które przebiegają zbyt wolno lub zbyt szybko, aby mogły być mierzone konwencjonalnymi metodami pomiarowymi. Dzięki tej technice można rejestrować równocześnie przebieg wielu mierzonych parametrów bez konieczności stosowania specjalistycznej aparatury.

Do badań zjawisk szybkich stosowana jest technika zdjęć przyspieszonych, która pozwala na ich analizę w czasie zwolnionej projekcji, do poklatkowej włącznie. Technika zdjęć przyspieszonych wiąże się ze stosowaniem kamery szybkiej. Do badań zjawisk mających charakter poruszających się punktów, które mogą być umieszczone na kontrastowym tle, można zastosować prostszą technikę - filmowo-stroboskopową [4]. Ocenę procesów powolnych można przeprowadzić za pomocą zdjęć poklatkowych, które potem są analizowane w czasie normalnej ekspozycji.

W badaniach wielu procesów i zjawisk konieczne jest określenie kinetyki procesu oraz charakterystyki ruchu obiektu (np. określenie prędkości i przyspieszeń). We wspomnianych przypadkach może znaleźć zastosowanie technika zdjęć szybkich, czasem jednak korzystniejszy jest zapis badanych parametrów na jednej klatce filmu. Uzyskanie obrazu poprzez nakładanie kolejnych klatek jest bardzo pracochłonne i mało dokładne. Zadanie to dobrze spełnia technika stroboskopowa [1, 2].

Stosowane powszechnie kamery wideo mają częstotliwość 25 klatek na sekundę. Jeśli czas ruchu obiektu lub okres jego ruchu jest krótki, to tor ruchu tego obiektu może być zarejestrowany na niewielu klatkach filmu. Ponadto uzyskany obraz obiektu przy długim

czasie naświetlania będzie nieostry [4]. Ponieważ nie jest możliwa synchronizacja kamery z poruszającym się obiektem, wiele klatek filmu może w ogóle nie zarejestrować ruchu obiektu, a otrzymane fragmentaryczne obrazy są trudne do analizy.

1. Metodyka badań stroboskopowych

Technika stroboskopowa pozwala podzielić czas naświetlania jednej klatki filmu, wyznaczany przez migawkę kamery, na szereg podczasów pozwalających uzyskać wiele naświetleń jednej klatki filmu. W celu uzyskania na jednej klatce filmu obrazu badanego zjawiska dynamicznego należy tak dobrać okres trwania jednego ujęcia (czas otwarcia migawki kamery), aby był on równy lub dłuższy od czasu trwania tego zjawiska. Przyjmując, że badany obiekt o średnicy d porusza się ruchem jednostajnym lub jednostajnie przyspieszonym z prędkością chwilową V_o , maksymalny czas naświetlania jednego punktu toru t_p można obliczyć według wzoru

$$t_p = \frac{d}{V_o} \quad (1)$$

Jak wynika ze wzoru (1), czas naświetlania poszczególnych punktów toru (poszczególnych ujęć) jest zależny od prędkości poruszania się filmowanego obiektu i jest on wielokrotnie mniejszy od czasu naświetlania całej klatki filmu (czasu otwarcia migawki kamery), co nawet przy dużym kontraście tła i badanego elementu nie może dać dobrego obrazu. Aby zmniejszyć różnicę pomiędzy czasem naświetlania tła i badanego obiektu tak, by można było otrzymać zadowalającej jakości obraz badanego obiektu, należy zastosować maksymalny kontrast pomiędzy poruszającym się obiektem i tłem. W wielu przypadkach rozwiązanie to nie jest jednak możliwe, a różnica kontrastu tła i badanego obiektu nie daje zadowalających wyników.

Problem ten można rozwiązać wykorzystując efekt stroboskopowy. Aby uzyskać efekt stroboskopowy, należy zastosować okresowe oświetlenie obiektu, okresowe przysłanianie obiektywu kamery lub okresowe przysłanianie ciągłego źródła światła. Można to uzyskać stosując lampę stroboskopową lub wirującą przed obiektywem kamery lub ciągłym źródłem światła tarczę z wycięciami (tarczę stroboskopową).

Dzięki efektowi stroboskopowemu znacznie skraca się czas naświetlania całej klatki filmu, przy czym czas naświetlania jednego punktu poruszającego się obiektu pozostaje

niezmienny. Umożliwia to uzyskanie na jednej klatce filmu zbioru punktów przedstawiających tor ruchu badanego obiektu. Z zatrzymanego obrazu można określić średnie prędkości obiektu pomiędzy poszczególnymi punktami toru według wzoru

$$V_n = \frac{\Delta l_n}{t_n} \quad (2)$$

gdzie: V_n - średnia prędkość obiektu pomiędzy rozpatrywanymi punktami [m/s], Δl_n - długość drogi pomiędzy kolejnymi analizowanymi punktami toru [m], t_n - czas potrzebny na przebycie analizowanego odcinka toru (pomiędzy dwoma kolejnymi naświetleniami) [s].

Czas pomiędzy dwoma kolejnymi naświetleniami poruszającego się obiektu t_n zależy od częstotliwości błysków f lampy stroboskopowej i wyraża się wzorem

$$t_n = \frac{1}{f} \quad (3)$$

Oprócz czasu pomiędzy kolejnymi naświetleniami istotne są również: czas naświetlania jednego punktu toru (czas trwania impulsu świetlnego) oraz czas, w którym obiekt nie jest naświetlany. W przypadku lampy stroboskopowej sterujemy zazwyczaj jej częstotliwością, a więc czasem pomiędzy kolejnymi naświetleniami poruszającego się obiektu.

Czas naświetlania jednego punktu toru powinien być tak dobrany, by punkt ten nie był rozmażany na obrazie, czyli aby w tym czasie badany punkt nie wykonał widocznej drogi. Czas ten powinien być jak najmniejszy i dla elementów ruchomych powinien wynosić ok. 1/1000 s [1]. Sumaryczny czas naświetlania klatki filmu wynosi

$$t_k = n \cdot t_p \quad (4)$$

gdzie: t_k - sumaryczny czas naświetlania jednej klatki filmu, n - wymagana liczba wszystkich punktów toru, t_p - czas naświetlania jednego punktu toru.

Jak wynika ze wzoru (4), stosunek czasu naświetlania całej klatki filmu do czasu naświetlania jednego punktu toru jest równy liczbie wymaganych punktów toru i jest wielokrotnie mniejszy niż w przypadku, gdy jest rejestrowany cały tor ruchu badanego obiektu w sposób ciągły. Jeśli dodatkowo zastosujemy tło pochłaniające światło, to wówczas w metodzie stroboskopowej otrzymamy wyraźny obraz.

2. Badania wstępne

Celem badań wstępnych było opanowanie metody pomiaru prędkości chwilowych obiektu oraz sprawdzenie przydatności urządzeń wchodzących w skład stanowiska pomiarowego. W trakcie tych badań uzyskano doświadczenie w zakresie obsługi stanowiska badawczego, jak również aparatury kontrolno-pomiarowej.

W celu zilustrowania zjawiska stroboskopowego obserwowano wirującą tarczę z naniesionym punktem o średnicy 3 mm umieszczonym na promieniu 70 mm przymocowaną na stałe do wału silnika prądu stałego. Silnik posiadał płynną regulację prędkości obrotowej. Następnie uruchomiono stroboskop nastawiając częstotliwość błysków na żadaną wartość, za pomocą częstotliciemierza wyposażonego w sondę. Urządzenie stroboskopowe posiadało płynną regulację częstotliwości w zakresie 22÷80 Hz. Do rejestracji zjawiska użyto kamery podłączonej do magnetowidu, ustawionej naprzeciw filmowanej tarczy.

Zapis przebiegającego zjawiska na taśmie wideo odbywał się z „typową” częstotliwością 25 klatek na sekundę. Oświetlając zjawisko stroboskopem z częstotliwością 50 Hz uzyskano „pozorne” zwiększenie prędkości pracy kamery do 50 kl/s, czyli otrzymano 3000 kl/min. Wynika stąd, że aby na jednej klatce uzyskać dwa obrazy punktu, obiekt musi przemieszczać się z prędkością 1500 obr/min. Jest to prędkość, przy której obiekt jest niewidoczny gołym okiem, obserwowany bez użycia stroboskopu występuje w postaci smugi. Zastosowanie stroboskopu powoduje, że możemy obserwować taki obraz, jak gdyby obracały się dwa punkty, a nie jeden.

Przy zastosowaniu oświetlania zjawiska stroboskopem o częstotliwości 75 Hz uzyskano „pozorne” zwiększenie częstotliwości pracy kamery do 75 kl/s, czyli otrzymano 4500 kl/min. Przy zastosowaniu stroboskopu obserwowano wyraźnie trzy ślady obracającego się punktu.

Zarejestrowany na taśmie wideo obraz wczytywano do pamięci komputera i zapisywano na dysku w postaci map bitowych. W trakcie zapisywania obrazów okazało się, że podczas odtwarzania zarejestrowanego filmu widać wyraźnie ślady badanego obiektu, jednak po zatrzymaniu obrazu za pomocą „stop-klatki” i zapisu, część śladów obiektu zanika. Zjawisko to spowodowane jest tym, że głowica zwykłego magnetowidu podczas zatrzymania klatki odczytuje tylko co drugą linię obrazu. Produkowane są specjalne magnetowidy, które podczas zatrzymania klatki odczytują obydwie linie obrazu, lecz ich cena jest dużo większa od magnetowidów powszechnie używanych.

Problem ten wyeliminowano przez rozszerzenie komputera o kartę AV Master firmy Fast, umożliwiającą digitalizację zarejestrowanego filmu i jego zapis na dysku komputera w

postaci filmu cyfrowego (w plikach *.avi). Po digitalizacji zarejestrowany film dzielono na poszczególne klatki obrazu i zapisywano w postaci map bitowych. Uzyskane obrazy pozbawione były wad obserwowanych podczas podziału na poszczególne klatki filmu analogowego.

Tak przygotowane obrazy poddano analizie za pomocą programu MultiScan firmy Computer Scanning Systems, współpracującego z kartą frame grabber. Poszczególne obrazy poddano wstępnie obróbce cyfrowej, aby poprawić ich jakość, a następnie przeprowadzono pomiary za pomocą systemu MultiScan, który automatycznie zliczał obiekty i wyznaczał ich współrzędne.

Wyniki badań wstępnych oraz wnioski wyciągnięte w trakcie ich realizacji pozwoliły na przeprowadzenia badań ruchu cząstki stałej w strumieniu cieczy.

3. Badanie ruchu cząstki stałej w strumieniu cieczy

3.1. Stanowisko badawcze

Aparatura doświadczalno-pomiarowa (rys.1) składa się z rury pomiarowej 1 przystosowanej do wywoływania w niej pulsacji przepływającej cieczy. Przepływ pulsujący cieczy osiągany jest poprzez superpozycję przepływu jednostajnego i wymuszonych pulsacji.

Ciecz lepka tłoczona pompą wirową 5 z naczynia przelewowego 6 przez przewód zasilający 10 wpływa do rury pomiarowej 1, a następnie przewodem odpływowym 11 splywa do przelewu 6. Pompa wirowa 5 napędzana jest silnikiem prądu stałego 12 z płynną regulacją prędkości obrotowej 13. Dzięki pompie wirowej w rurze pomiarowej osiągany jest jednostajny przepływ cieczy. Prędkość przepływu równa jest prędkości swobodnego grawitacyjnego opadania cząstki stałej 20.

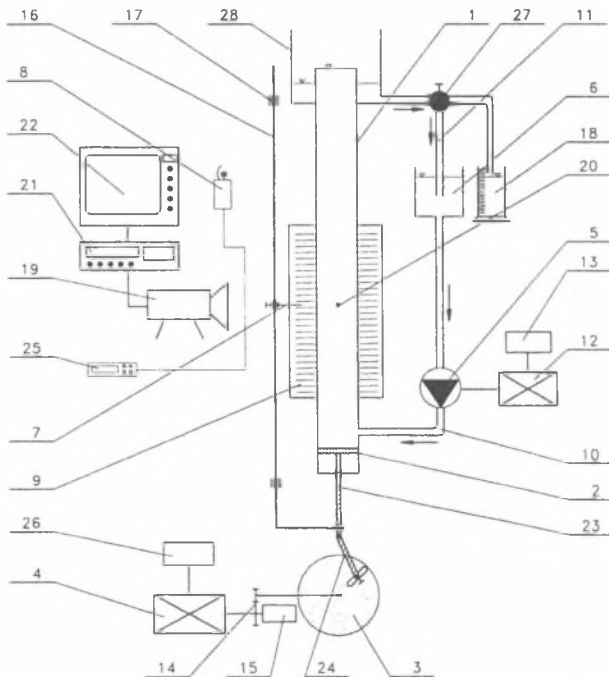
Ruch pulsacyjny cieczy uzyskiwany jest dzięki ruchowi posuwisto-zwrotnemu tłoka 2. Do tłoka 2 połączone jest sztywno tłoczyisko 23, które na dole połączone jest przegubowo z korbą 24. Ruch posuwisto-zwrotny tłoka uzyskuje się dzięki tarczy mimośrodowej 3. Tarcza mimośrodowa napędzana jest silnikiem elektrycznym 4 z regulacją prędkości obrotowej 26 przez przekładnię zębatą 14. W tarczy mimośrodowej 3 wykonano otwór pozwalający regulować amplitudę pulsacji. Płynna regulacja prędkości obrotowej silnika 4 pozwala z kolei regulować częstotliwość pulsacji. Do silnika 4 napędzającego tarczę mimośrodową dołączono tachometr 15 do pomiaru prędkości obrotowej. Z korbą 24

na stałe wodzik pomiarowy 16, który porusza się w jarzmach 17 równoległe do ruchu tłoka 2. Na wodziku pomiarowym 16 zamocowany jest przesuwnie wskaźnik 7 położenia tłoka.

Pomiar natężenia przepływu jednostajnego wykonuje się metodą objętościową w naczyniu pomiarowym 18. Na czas pomiaru rozdzielacz 27 kieruje się ciecz do naczynia pomiarowego.

Ruch cząstki stałej 20 rejestrowany jest kamerą cyfrową 19. Kamera ustawiona jest w taki sposób, aby w jej polu widzenia znajdowały się: cząstka stała 20 oraz wskaźnik położenia tłoka 7.

Jako jedyne źródło światła wykorzystywany jest stroboskop 8. Częstotliwość błysków lampy stroboskopowej mierzona jest za pomocą częstotliwościomierza 25. Kamera cyfrowa 19 połączona jest z monitorem 22 oraz magnetowidem 21. Monitor pozwala na dokładną obserwację procesu podczas pomiaru, natomiast sama rejestracja odbywa się na taśmie magnetowidowej.



Rys. 1. Schemat stanowiska doświadczalnego
Fig. 1. Scheme of the experimental rig

3.2. Przebieg badań

Badania przeprowadzono dla cząstki agalitu o gęstości 2539 kg/m^3 i średnicy $2,43 \text{ mm}$ oraz mieszaniny wody z gliceryną o gęstości 1246 kg/m^3 i lepkości $0,106 \text{ Ns/m}^2$. Pomiar polegał na wymuszaniu, za pomocą pompy wirowej, przepływu cieczy w rurze pomiarowej z prędkością równą prędkości swobodnego grawitacyjnego opadania cząstki stałej. Następnie wprowadzano do rury pomiarowej cząstkę stałą w pole widzenia kamery wideo i ostatecznie regulowano prędkość przepływu cieczy tak, aby cząstka pozostawała nieruchomo zawieszona w cieczy. Po sprawdzeniu stabilności cząstki stałej, obserwowanej w dużym powiększeniu na ekranie monitora telewizyjnego, uruchamiano napęd pulsatora. Po ustaleniu prędkości obrotowej tarczy mimośrodowej napędzającej pulsator odczytywano prędkość obrotową silnika na tachometrze. Po uprzednim ustawieniu częstotliwości błysków na żadaną wartość uruchamiano stroboskop oraz przeprowadzano rejestrację procesu na taśmie wideo.

Pomiary przeprowadzono dla wartości obrotów silnika równej 1015 obr/min i częstotliwości błysków stroboskopu 50 Hz i 75 Hz oraz dla wartości 1500 obr/min i częstotliwości 50 Hz i 75 Hz .

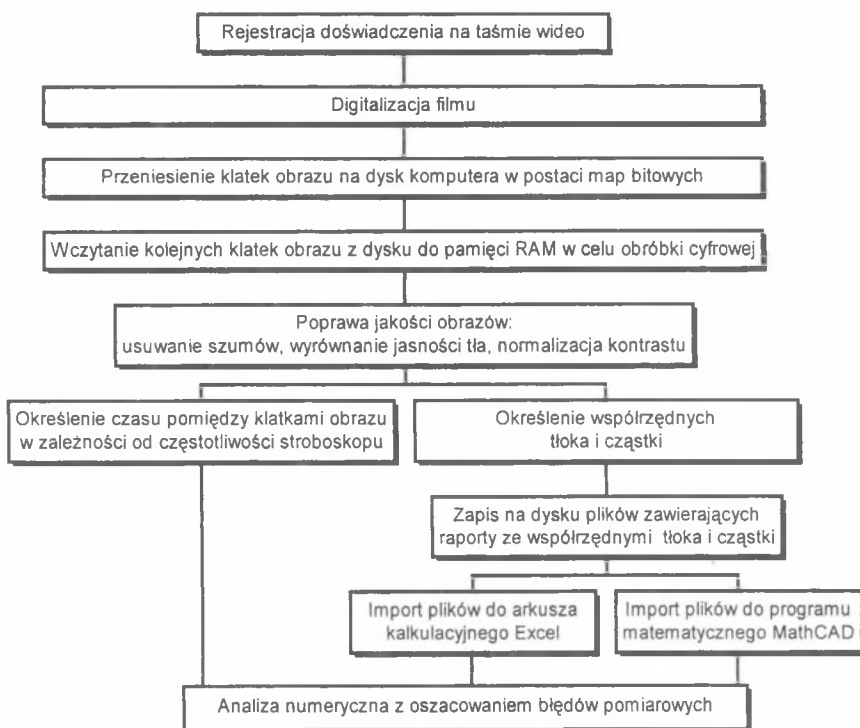
Pomiary zarejestrowane na taśmie wideo poddawano dalszej analizie za pomocą systemu komputerowej analizy obrazu, analogicznie do badań wstępnych. Schemat przetwarzania danych pomiarowych przedstawiono na rys.2.

3.3. Wyniki badań

Przeprowadzone badania potwierdziły skuteczność metody stroboskopowej do badania ruchu cząstki stałej w pulsującym strumieniu cieczy. Przy częstotliwości błysków stroboskopu równej 50 Hz uzyskano wyraźne dwa ślady wskaźnika poruszającego się wraz z tłokiem oraz dwa ślady cząstki stałej poruszającej się w cieczy.

Przy częstotliwości błysków stroboskopu równej 75 Hz uzyskano po trzy ślady wskaźnika oraz cząstki stałej.

Wyniki badań w postaci wykresów prędkości chwilowych cieczy, cząstki oraz prędkości względnych dla częstotliwości dla przeprowadzonych zakresów pomiarów porównano z obliczeniami teoretycznymi [3] oraz z wynikami uzyskanymi bez użycia stroboskopu. Stwierdzono, że zastosowanie stroboskopu, zgodnie ze wzorem (3), znacznie skraca czas pomiędzy kolejnymi naświetleniami obiektu, a więc również odstęp czasowy pomiędzy zarejestrowanymi na obrazie śladami poruszającego się obiektu. W znaczący sposób zwiększa się więc dokładność pomiaru czasu.



Rys. 2. Schemat przetwarzania danych pomiarowych

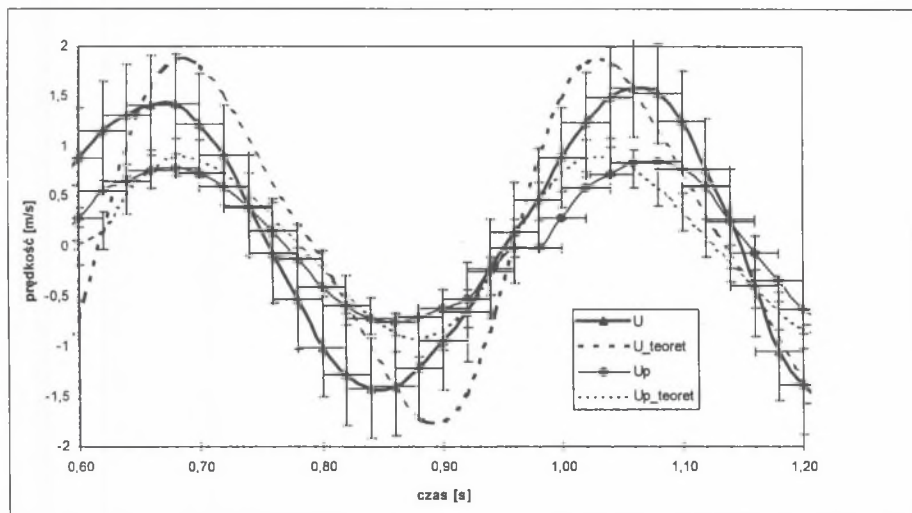
Fig. 2. Flow diagram of computer-aided processing of experimental data

Na rys.3. przedstawiono przykładowy wykres prędkości chwilowych cieczy U i cząstki U_p dla amplitudy tłoka pulsatora 23,5 mm i częstotliwości pulsacji słupa cieczy $2,909 \text{ s}^{-1}$. Na wykresie przedstawiono również liniami przerywanymi prędkości teoretyczne cieczy U_{teoret} i cząstki $U_{p\text{teoret}}$.

Wartości wyznaczone w wyniku badań obarczone są błędami bezwzględными, wyrażonymi w postaci słupków błędów.

4. Podsumowanie

Jak wynika z przeprowadzonej analizy, w metodzie stroboskopowej na jednej klatce filmu można uzyskać zadowalający obraz toru badanego obiektu, przy czym obraz ten nie jest obciążony błędem, jaki wynika z nakładania na siebie kolejnych klatek filmu uzyskanych metodą filmowania kamerą szybką.



Rys. 3. Prędkości chwilowe cieczy U i cząstki U_p dla amplitudy tłoka pulsatora 23,5 mm i częstotliwości pulsacji $2,907 \text{ s}^{-1}$

Fig. 3. Comparison of theoretical and experimental values of particle velocity and flow velocity. Experimental values are shown together with estimated error margins. Piston amplitude 23,5 mm, frequency $2,907 \text{ s}^{-1}$

Aby urządzenie stroboskopowe mogło spełniać założoną wyżej funkcję, należy w miarę możliwości zwrócić uwagę na zsynchronizowanie kamery (czas otwarcia i zamknięcia migawki) z filmowanym obiektem. W celu zarejestrowania na jednej klatce filmu n punktów toru obiektu, czas otwarcia migawki kamery t_m musi być większy lub równy sumarycznemu czasowi naświetlania jednej klatki filmu. Zgodnie z równaniem (4) czas otwarcia migawki kamery wynosi

$$t_m \geq t_k = n \cdot t_p \quad (5)$$

Jeżeli częstotliwość stroboskopu wyniesie przykładowo 50 Hz i 75 Hz, to przy częstotliwości pracy kamery 25 klatek na sekundę pozwoli to na zarejestrowanie odpowiednio 2 lub 3 śladów obiektu na jednej klatce filmu. Czas pomiędzy dwoma kolejnymi naświetleniami (ujęciami) wyniesie wówczas odpowiednio 0,02s lub 0,013s. Dla porównania, czas pomiędzy dwoma kolejnymi naświetleniami bez użycia stroboskopu wynosi 0,04s. Tak więc zastosowanie efektu stroboskopowego pozwala zwiększyć dokładność pomiaru czasu 2-krotnie (przy częstotliwości 50 Hz), a przy częstotliwości 75 Hz ok. 3-krotnie.

LITERATURA

1. Cyprian T.: Fotografia, technika i technologia. WNT, Warszawa 1968.
2. Latoś H.: 1000 słów o fotografii. WMON, Warszawa 1979.
3. Suchecki W.: Metoda analizy ruchu cząstki stałej w pulsującym strumieniu lepkiej cieczy. Rozprawa doktorska, Płock 1997.
4. Walczyk J.: Technika filmowo-stroboskopowa w badaniach naukowych. PSFN, Ośrodek Post. Tech. w Katowicach, nr 2, 1989, s. 34-44.

Niniejsza praca powstała częściowo w wyniku realizacji programu priorytetowego Automatyki, Technik Informatycznych i Automatykacji - Politechnika Warszawska 1998/99.

Recenzent: Dr hab.inż. Krystyna Jeżowiecka-Kabsch
Prof. Politechniki Wrocławskiej

Abstract

An experimental rig was built and tested, and a computer aided video imaging technique to monitor the particle motion was developed.

A method to analyse the particle motion using a stroboscopic technique was worked out and implemented for the case of a particle placed in oscillatory stream of a liquid. This method made it possible to analyse transient flow phenomena and in particular to measure momentaneous velocity of the particle.

Compared to measurements carried out without stroboscope, the accuracy was substantially improved.