

Witold SUCHECKI, Sławomir ALABRUDZIŃSKI

e-mail: suchecki@pw.plock.pl

Instytut Inżynierii Mechanicznej, Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii, Politechnika Warszawska, Filia w Płocku

Eksperymentalne pomiary geometrii kawitującego jądra wiru oraz pola prędkości w jego otoczeniu

Wstęp

Ważnym problemem w zaawansowanym obliczeniowym projektowaniu współczesnych wirnikowych maszyn hydraulicznych jest wyeliminowanie już na etapie projektowania zagrożeń spowodowanych zjawiskami kawitacyjnymi. Jedną z najbardziej intensywnych i groźnych form kawitacji jest kawitacja wirowa, towarzysząca pracy maszyn hydraulicznych z elementami roboczymi zbudowanymi z płytów nośnych.

Celem niniejszej pracy jest opracowanie metody badawczej, która pozwoliłaby wyznaczyć geometrię kawitującego jądra wiru oraz pola prędkości w jego otoczeniu, z dokładnością pozwalającą na późniejsze weryfikacje kodów numerycznych.

Badania eksperymentalne polegały na rejestracji fotograficznej geometrii wiru generowanego przez model płyta w tunelu kawitacyjnym oraz na pomiarach metodą DPIV pola prędkości przepływu w sąsiedztwie kawitującego jądra wirowego.

Badania doświadczalne

Badania przeprowadzono w tunelu kawitacyjnym *Katedry Maszyn Wirnikowych i Mechaniki Płynów Politechniki Gdańskiej* (Rys. 1).

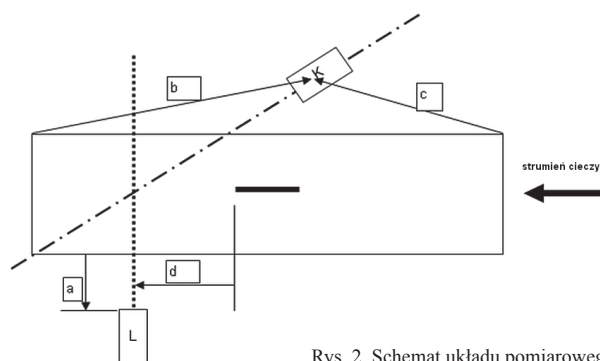
Rys. 1. Tunel kawitacyjny *Katedry Maszyn Wirnikowych i Mechaniki Płynów*

Stanowisko pomiarowe

Na rys. 2 przedstawiono schemat układu pomiarowego, składającego się z lasera *New Wave 120XT-15Hz, dual-Nd:YAG* oraz kamery *pco.1200hs*. Równoległa płaszczyzna światła z lasera (L) prześwietlała kanał pomiarowy w odległości $d = 50$ mm; 200 mm; 300 mm, od modelu płyta. Odległość optyki lasera od ściany kanału wynosiła $a = 440$ mm. Kamera (K) umiejscowiona była w odległościach $b = 570$ mm i $c = 668$ mm od kanału pomiarowego. Odległości b i c pozostawały niezmiennie dla wszystkich płaszczyzn przekroju, aby kąt patrzenia kamery na płaszczyznę świetlną był stały dla wszystkich pomiarów i wynosił ok. 45° . Dla pełnego określenia kąta obserwacji płaszczyzny światła przez kamerę należałoby znać współczynnik załamania światła w ścianie kanału i cieczy.

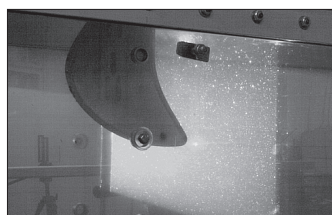
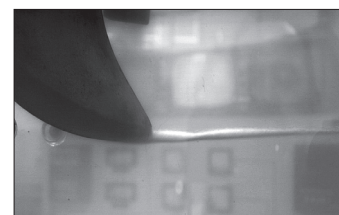
Zamiast pomiaru współczynnika załamania światła zastosowano tzw. maski kalibracji. Po zakończeniu rejestracji obrazów przepływu, równoległe do płaszczyzny światła, wstawiano siatkę kalibracyjną i rejestrowano obrazy, które później wykorzystywano do wyrównywania wykresów pól prędkości.

Widok na płaszczyznę poprzeczną w odległości 50 mm od modelu płyta oraz przykładowy obraz zarejestrowany w tej płaszczyźnie przed-



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego

stawiono na rys. 3. Widok wiru kawitacyjnego generowanego przez model płyta przedstawiono na rys. 4.

Rys. 3. Widok na płaszczyznę poprzeczną w odległości 50 mm od modelu płyta

Rys. 4. Widok wiru kawitacyjnego generowanego przez model płyta

Metodyka i zakres pomiarów

Badania polegały na rejestracji obrazów przepływu cieczy w bezpośrednim sąsiedztwie wiru generowanego przez model płyta w tunelu kawitacyjnym oraz wyznaczeniu na ich podstawie pól prędkości przepływu w jego sąsiedztwie metodą DPIV (*Digital Particle Image Velocimetry*) z użyciem techniki noża świetlnego. Rejestracje obrazów przepływu przeprowadzono w trzech płaszczyznach prostopadłych do przepływu oraz w płaszczyźnie wzdłużnej, dla trzech kątów ustawienia modelu płyta i trzech prędkości przepływającej cieczy. Ciśnienie statyczne w kanale pomiarowym podczas pomiarów było stałe i wynosiło 15 kPa.

Zakres przeprowadzonych pomiarów zestawiono w tab. 1.

Tab. 1. Zakres przeprowadzonych pomiarów

Płaszczyzna przekroju [mm]	Prędkość przepływu [m/s]	Współczynnik kawitacji [-]	Kąt natarcia płyta [°]
50	4,32; 5,09; 5,87	1,393; 1,003; 0,755	4; 8; 12
200	4,32; 5,09; 5,87	1,393; 1,003; 0,755	4; 8; 12
300	4,32; 5,09; 5,87	1,393; 1,003; 0,755	4; 8; 12

Opis pomiarów

Dla każdej prędkości przepływającej cieczy, kąta ustawienia modelu płyta i odpowiedniej płaszczyzny zarejestrowano min. 50 obrazów przepływu. Zakres przeprowadzonych pomiarów zestawiono w tab. 1. Na każdy impuls lasera rejestrowano dwa obrazy. Częstotliwość lasera wynosiła 15 Hz dla każdego pręta, z przesunięciem fazowym $1/2$, co dało na wyjściu częstotliwość wiązki świetlnej 30 Hz. Kamera *pco.1200hs* była synchronizowana z laserem przy pomocy PIV synchronizera niemieckiej firmy ILA, w taki sposób, aby na każdy impuls lasera następowała rejestracja dwóch obrazów z odstępem pomiędzy

obrazami wynoszącym 250 μs . Odstęp pomiędzy obrazami ustalono doświadczalnie wykonując rejestracje dla odstępów czasowych od 50 μs do 500 μs , z krokiem 50 μs .

Przetwarzanie danych pomiarowych

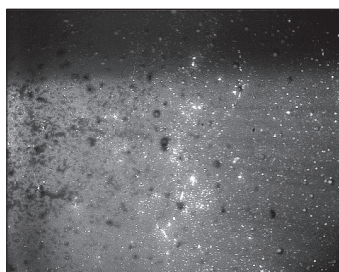
Zarejestrowano ok. 2000 obrazów, które następnie poddano analizie według schematu przedstawionego na rys. 5.



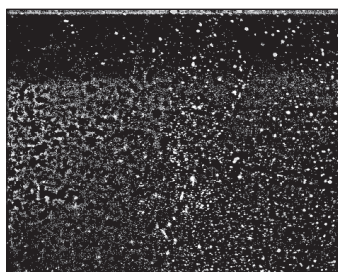
Rys. 5. Schemat przetwarzania danych pomiarowych

Ponieważ w tunelu kawitacyjnym pojawiały się podczas przepływu pęcherze gazowe, w celu wyeliminowania ich wpływu na pola prędkości, przed obliczeniami PIV obrazy poddawano lokalnej binaryzacji. Jest to binaryzacja wykonywana nie od razu na całym obrazie, lecz na sekcji o podanym rozmiarze i z zadaniem progiem. Obraz dzielony jest na sekcje, w których wykonywane są binaryzacje lokalne. Rozmiar sekcji dla obrazów rejestrowanych w odległości 50 mm od płata wynosił 64 piksele, zaś próg binaryzacji 90%. Dla pozostałych przypadków rozmiar sekcji wynosił 20 pikseli, a próg 85%. Tak zbinaryzowane obrazy poddawane były obliczeniom z wykorzystaniem cyfrowej anemometrii obrazowej. Wykorzystując metodę cyfrowej anemometrii obrazowej [Willert i Gharib, 1991; Westerweel, 1993; Raffel i in., 1998; Suhecki, 2000a,b; 2001; Suhecki i Alabrudziński, 2003] wyznaczono pola prędkości w otoczeniu kawitującego jądra wiru.

Przykładowy obraz przepływu, z obecnymi pęcherzami powietrza oraz wynik binaryzacji lokalnej przedstawiono na rys. 6 i 7.



Rys. 6. Obraz przepływu w przekroju 200 mm, prędkość przepływu 5,87 m/s i kąta pochylenia płata 12°



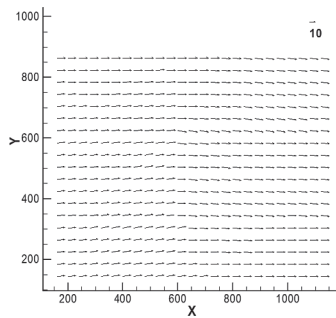
Rys. 7. Obraz z rys. 6 poddany binaryzacji lokalnej (okno: 20, procent: 85)

Usuwanie zniekształceń

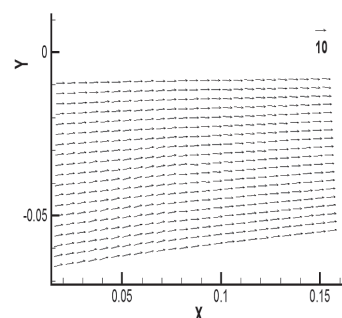
Z powodu dużego kąta załamania światła na ścianach tunelu kawitacyjnego, wyniki korelacji obrazów przepływu były zniekształcone optycznie. Na podstawie prostokątnej siatki kalibracji umieszczonej w polu rejestracji kamery w płaszczyźnie pomiaru, wykonane zostało przekształcenie geometryczne źródłowych pól prędkości (Rys. 8). W wyniku tego przekształcenia otrzymano pola prędkości przepływu we współrzędnych rzeczywistych położenia na płaszczyźnie pomiarowej przedstawione na rys. 9, gdzie jednostką podstawową osi jest [m], a jednostką wektorów [m/s].

Wyznaczanie chwilowego pola prędkości

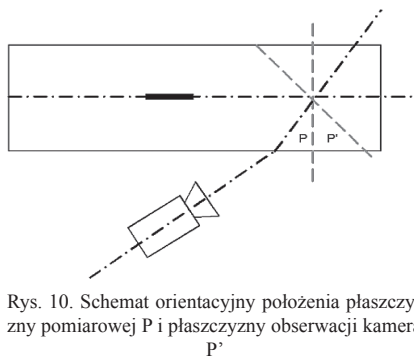
Dzięki zastosowaniu przekształceniu geometrycznemu otrzymano pole prędkości $\mathbf{u}(x,y)$ dla wektorów o rzeczywistych położeniach x,y na płaszczyznach pomiarowych, jednak z uwagi na brak możliwości prostopadłego umieszczenia kamery względem płaszczyzny pomiarowej P noża świetlnego, otrzymano faktyczne rzuty wektorów prędkości na płaszczyznę P' , a nie P (Rys. 10).



Rys. 8. Źródłowe pole prędkości (jednostki: osie – piksele, wektory – piksele)



Rys. 9. Pole prędkości przepływu we współrzędnych rzeczywistych położenia na płaszczyźnie pomiarowej



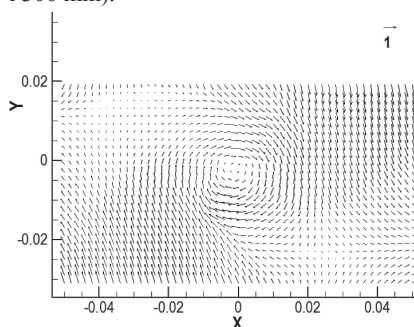
Rys. 10. Schemat orientacyjny położenia płaszczyzny pomiarowej P i płaszczyzny obserwacji kamerą P'

Płaszczyzna P' była płaszczyzną prostopadłą do kierunku obserwacji kamerą. Zatem punkty zaczeplenia wektorów prędkości znajdowały się na płaszczyznach pomiarowych P, natomiast sam wektor odzwierciedlał prędkość przepływu w kierunku prostopadłym do kierunku obserwacji kamerą P' .

Wyznaczenie quasi-stacjonarnego pola prędkości

Dla każdego z pól prędkości w każdej serii pomiarowej, wyznaczony został średni wektor prędkości $\bar{\mathbf{u}}_i = [\bar{u}_{i,x}, \bar{u}_{i,y}]$ dla każdego i -tego pola prędkości w serii. Współrzędnymi średniego wektora prędkości były średnie składowe pozioma i pionowa obliczone po całym chwilowym polu prędkości. Przy czym serię pomiarową rozumie się tutaj przez zbiór $N = 20 \div 25$ pól prędkości $\mathbf{u}_i(x, y)$, gdzie $i = 1 \dots N$, wyznaczonych dla danego kąta ustawienia płata i danej prędkości przepływu, bez zmiany żadnego z parametrów rejestracji i przepływu. Tak otrzymane składowe poziome prędkości zostały odjęte od pól prędkości w danej serii.

Ponieważ tematem pracy były eksperymentalne pomiary geometrii kawitującego jądra wiru oraz pola prędkości w jego otoczeniu, jako początek układu współrzędnych przyjęto położenie środka rdzenia kwitującego wyznaczone na podstawie obrazów przepływu i uśrednione po wszystkich obrazach dla danej odległości od płata (50 mm, 200 mm i 300 mm).



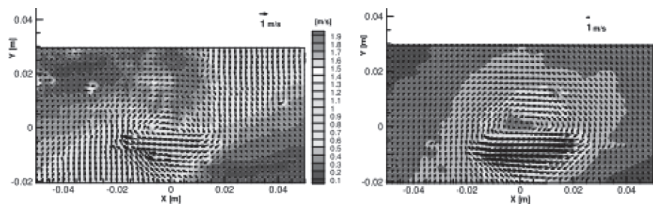
Rys. 11. Przykładowe pole prędkości

Dla każdej serii wyznaczone zostały dwa średnie pola prędkości w taki sposób, że dla każdego z położen wektorów x, y wyznaczono średnią po wszystkich wektorach w serii pomiarowej. Otrzymane w ten sposób przykładowe pole prędkości przedstawiono na rys. 11.

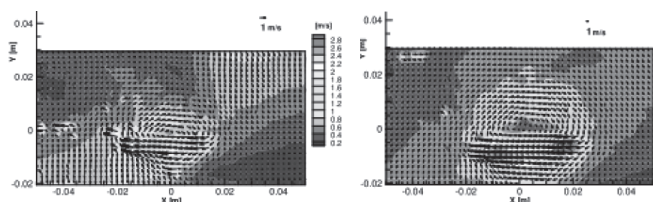
Otrzymane w ten sposób pola prędkości przyjęto jako wynikowe do porównań z wynikami symulacji numerycznych [Szantyr, 2011].

Przykładowe wyniki pomiarów

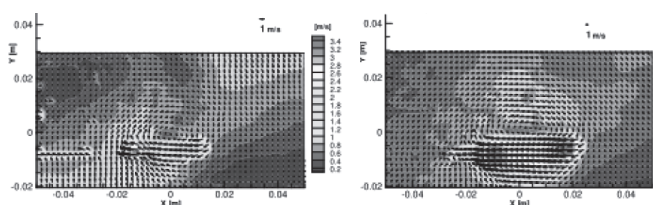
Poniżej przedstawiono wykresy pól prędkości dla trzech prędkości przepływu cieczy (4,32 m/s, 5,09 m/s i 5,87 m/s), dwóch kątów pochylenia płata (4° i 12°) i dwóch płaszczyzn poprzecznych, odległych od płata o 50 mm i 200 mm. Pola prędkości wyznaczono opisaną metodą quasi-stacjonarnego pola prędkości. Na wykresy nałożono dodatkowo mapy przepływów, reprezentujące obszary o stałych prędkościach, wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów.



a) kąt pochylenia płyta 4° b) kąt pochylenia płyta 12°
Rys. 12. Pole prędkości w przekroju 50 mm, prędkość przepływu 4,32 m/s



a) kąt pochylenia płyta 4° b) kąt pochylenia płyta 12°
Rys. 13. Pole prędkości w przekroju 50 mm, prędkość przepływu 5,09 m/s



a) kąt pochylenia płyta 4° b) kąt pochylenia płyta 12°
Rys. 14. Pole prędkości w przekroju 50 mm, prędkość przepływu 5,87 m/s

Na rys. 12–14 widać, że dla kąt pochylenia płyta 12° istnieją jakby dwa jądra wirowe, z dużymi prędkościami między nimi. Wynika to z niestabilności strugi wirowej oraz rozpraszania światła na samej strudze (gazowo-cieczowej).

Wzrost prędkości cieczy powoduje w odległości 200 mm od płyta (podobnie jak w odległości 50 mm) tworzenie się wyraźnej struktury kawitującego jądra wirowego (Rys. 15–17). Dla kąt pochylenia płyta 12° (Rys. 15b–17b) widać, że pojawia się jakby jądro wirowe rozmyte. Może to być spowodowane niestabilnością strugi wirowej.

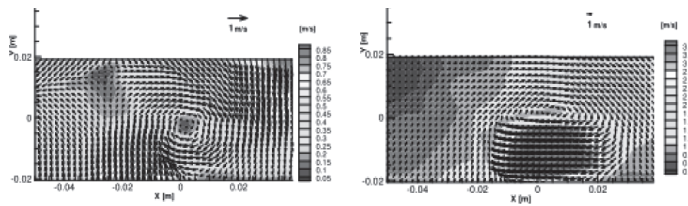
Wnioski

Otrzymane pola prędkości pozwalają określić geometrię kawitującego jądra, jak również pola prędkości w jego bliskim otoczeniu.

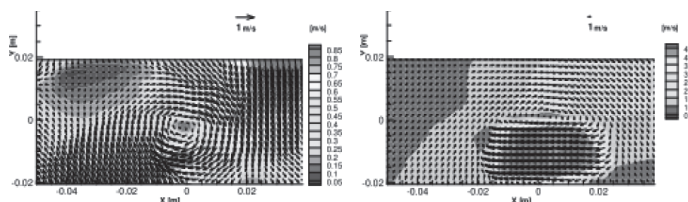
Pola prędkości wyznaczone wzdłuż kanału pomiarowego potwierdzają poprawność wyników pomiarów prędkości osiowej w osi tunelu (w miejscu występowania wiru) sondą pięciootworową. Dodatkowo pozwalają zaobserwować rozkład prędkości wzdłuż kanału, oraz w sąsiedztwie kawitującego wiru, co może być pomocne w analizie pól prędkości uzyskanych metodami numerycznymi.

Podczas realizacji pracy stwierdzono przydatność zastosowanych metod wizualizacyjnych do badania przepływów, w których występuje kawitacja. Z uwagi na „nieprzejrzystość” samego jądra wiru, niemożliwe jest wyznaczenie wewnątrz niego pól prędkości.

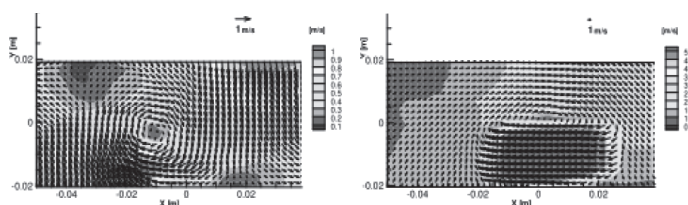
Zastosowana w tej pracy tzw. maska kalibracji, pozwoliła na usunięcie zniekształceń obrazu, jednak nie pozwoliła na jednoznaczne określenie położenia obszaru pomiarowego względem ścian kanału. Na podstawie prostokątnej siatki kalibracji umieszczonej w polu rejestracji kamery w płaszczyźnie pomiaru, wykonane zostało przekształcenie geometryczne źródłowych pól prędkości. W wyniku tego przekształcenia otrzymano pola prędkości przepływu we współrzędnych rzeczywistych



a) kąt pochylenia płyta 4° b) kąt pochylenia płyta 12°
Rys. 15. Pole prędkości w przekroju 200 mm, prędkość przepływu 4,32 m/s



a) kąt pochylenia płyta 4° b) kąt pochylenia płyta 12°
Rys. 16. Pole prędkości w przekroju 200 mm, prędkość przepływu 5,09 m/s



a) kąt pochylenia płyta 4° b) kąt pochylenia płyta 12°
Rys. 17. Pole prędkości w przekroju 50 mm, prędkość przepływu 5,87 m/s

położenia na płaszczyźnie pomiarowej. Na podstawie obrazów przepływu określano położenia środka wiru w danym przekroju pomiarowym i przypisywano mu współrzędne „0,0”. Tak więc „pozycjonowanie” pól prędkości wykonano względem środka kawitującego wiru.

Wraz ze zwiększeniem kąt natarcia płyta pojawiają się niestabilności w strudze wirowej. Dzieje się tak szczególnie w przypadku maksymalnych, badanych prędkości przepływu. Odrywające się z płyta kawitujące jądro wirowe powoduje silne oddziaływania z opływającą je cieczą, szczególnie w małej odległości od płyta.

LITERATURA

- Raffel M., Willert Ch. E., Kompenhans J., 1998. *Particle Image Velocimetry. A Practical Guide*, Springer-Verlag, Berlin.
- Suchecki W., 2000a. Wizualizacja przepływu cieczy z wykorzystaniem anemometrii obrazowej. *Zesz. Nauk. Pol. Łódzkiej, Ciepłne Maszyny Przepływowe*, **117**, 2, 225-230
- Suchecki W., 2000b. Wykorzystanie cyfrowej anemometrii do wizualizacji przepływu zawiesiny cząstek stałych w cieczy. *Zesz. Nauk. Pol. Opolskiej*, z. 60, *Mechanika* nr **254**, 319-326
- Suchecki W., 2001. Wykorzystanie metod optycznej analizy przepływu do weryfikacji modeli numerycznych CFD. *Inż. Ap. Chem.*, **40**, nr 6, 8-12
- Suchecki W., Alabrudziński S., 2003. Metoda korekty wykresów pól prędkości w cyfrowej anemometrii obrazowej. *Inż. Ap. Chem.*, **42**, nr 3, 14-20
- Szantyr J.A., Flaszyński P., Tesch K., Suchecki W., Alabrudziński S., 2011. An experimental and numerical study of tip vortex cavitation. *Polish Maritime Research*, **18**, nr 4, 14-22
- Westerweel J., 1993. *Digital particle image velocimetry - theory and application*. Delft University Press
- Willert C.E., Gharib M., 1991. Digital particle image velocimetry. *Exp. Fluids*, **10**, 181-193. DOI: 10.1007/BF00190388