

# Sprawdzenie stosowalności cyfrowej anemometrii obrazowej do badania opływu ruchomych obiektów w przewodzie zamkniętym

MAREK GAWOR, JACEK SOBCZYK, WALDEMAR WODZIAK

*Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27; 30-059 Kraków*

RENATA GNATOWSKA

*Politechnika Częstochowska, Instytut Maszyn Ciepłych, al. Armii Krajowej 21, 42-201 Częstochowa*

## Streszczenie

Wykonano badania przepływu powietrza wokół poruszającego się obiektu w tunelu aerodynamicznym. Układ pomiarowy składał się z dwóch prętów o przekroju kwadratowym. Pierwszy z prętów został umieszczony na stałe w pobliżu wlotu do komory pomiarowej, natomiast drugi z prętów oddalał się od lub zbliżał do pierwszego z określoną prędkością. Pomiary przy użyciu cyfrowej anemometrii obrazowej przeprowadzono dla prędkości napływu wynoszącej 1.55 m/s oraz prędkości poruszania się pręta 0.01 m/s. Zarejestrowano zmiany struktury przepływu pomiędzy prętami w zależności od odległości między nimi oraz od zwrotu prędkości pręta. Podjęto próbę obiektywnego wyznaczenia odległości pomiędzy prętami przy której następuje zmiana struktury przepływu.

**Słowa kluczowe:** dwa pręty kwadratowe, poruszający się pręt, cyfrowa anemometria obrazowa, tunel aerodynamiczny

## 1. Wstęp

Badania opływu dwóch podobnych lub identycznych ciał w kształcie walców lub prostopadłościanów i ustawionych w tandemie omówiono w wielu pracach [Gnatowska, 2008; Zdravkovich, 1987]. Pomimo prostej konfiguracji geometrycznej opływ dwóch ciał jest złożony, ponieważ w śladzie aerodynamicznym pierwszego zostaje umieszczone drugie ciało. Obserwowany obraz przepływu zależy od wielu parametrów, m.in. od: prędkości napływu  $V_\infty$ , gęstości płynu  $\rho$ , intensywności turbulencji  $I_t$ , średnic hydraulicznych ciał  $D_1$  i  $D_2$ , odległości między ich środkami  $L$  itd.

Wśród charakterystycznych cech takiego przepływu wyróżnia się tzw. mody, czyli struktury przepływowe, które odtwarzane są za każdym razem, kiedy wskazane parametry przyjmują te same wartości. Jeśli dla uproszczenia rozważymy dwa identyczne, nieskończone długie ciała ( $D_1 = D_2 = D$ ), to dla ustalonej prędkości napływu zmiana modu następuje dla określonych – tzw. krytycznych – wartości stosunku  $L/D$ . Gdy jedno z ciał jest ruchome, to stosunek  $L/D$ , dla którego zachodzi zmiana modu będzie miał inną wartość w przypadku zbliżania się (ruch DO), a inną w przypadku oddalania się (ruch OD) dwóch ciał. Mamy więc do czynienia z histerezą, która została opisana w [Sobczyk, i in., 2018]. Przykładem fizycznym realizacji takiego przepływu są ciężarówki jadące w konwoju.

Przy opływie dwóch identycznych walców ustawionych w linii wyróżniamy dwa podstawowe mody [Sumer, 2010]. Dla niskich wartości  $L/D$  układ dwóch ciał zachowuje się jak jedno ciało. Pomędzy walcami nie występują strefy oderwania warstwy przyściennej. Dla większych wartości  $L/D$ , struktura przepływu pomiędzy walcami zostaje zaburzona, występuje przepływ wirowy. W literaturze można znaleźć opracowania, gdzie wyszczególniono dodatkowe tzw. mody przejściowe [Xu i Zhou, 2004; Zhou i Yiu, 2006]. W przy-

padku rozważanych w niniejszej pracy prostopadłościanów, mody przejściowe są trudne do rozróżnienia ze względu na wpływ krawędzi prostopadłościanów silnie zaburzających pole prędkości. Dlatego w dalszej części pracy brane pod uwagę będą tylko dwa stabilne mody.

W ogólnym przypadku do analizy omawianego przepływu konieczny jest sprzęt pomiarowy o wysokiej rozdzielczości czasowej. Tradycyjnie wykorzystuje się termooanemometrię lub LDA (z ang. *Laser Doppler Anemometry*). Nowoczesne podejście wymaga np. zestawu do szybkiej cyfrowej anemometrii obrazowej (*PIV-TR*, z ang. *Particle Image Velocimetry – Time Resolved*), umożliwiającego pomiary z częstotliwością rzędu 1 kHz i wyższą. Celem niniejszego opracowania jest odpowiedź na pytanie, czy możliwe jest zastosowanie do tego celu standardowego zestawu PIV o rozdzielczości czasowej 15 Hz. Wyniki uzyskiwane za pomocą tego zestawu charakteryzują się bardzo wysoką rozdzielczością przestrzenną. Dlatego pomimo, iż jego częstotliwość pomiarowa jest o ok. 2 rzędy wielkości niższa, niż w metodach tradycyjnych, to ogromna ilość informacji przestrzennej zawarta w chwilowych polach prędkości może pozwolić na wnioskowanie o momencie zmiany modu na podstawie wyników z kilku sąsiednich momentów czasowych.

## 2. Opis eksperymentu

Pomiary wykonano w zamkniętym tunelu aerodynamicznym o wymiarach całkowitych  $9.79 \times 4.08 \times 2.34$  m. Możliwy zakres prędkości we wnętrzu komory pomiarowej o wymiarach  $1.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$  wynosił 0.1–60 m/s; natomiast intensywność turbulencji (wyrażona jako stosunek odchylenia standardowego prędkości do jej wartości średniej) była mniejsza od 0.5%. Komora pomiarowa przystosowana była do prowadzenia badań przy użyciu cyfrowej anemometrii obrazowej. Komorę pomiarową oraz badane pręty umieszczone na posuwie liniowym przedstawiono na rysunku 1. Pomiary wykonano przy stałej temperaturze  $T = 21^\circ\text{C}$  oraz wilgotności względnej ( $\varphi = 64,9\%$ ). Dokładny opis tunelu podano w publikacji [Bujalski i in., 2013].

Elementem ruchomym posuwu była karetką sterowana za pośrednictwem napędu serwokrokowego Ezi-SERVO PlusR [Dokumentacja techniczna sterownika Ezi-SERVO PlusR]. Długość posuwu wynosi 3.26 m. Zintegrowany enkoder w sterowniku Ezi-SERVO PlusR charakteryzuje się wysoką rozdzielczością czasową i umożliwia monitorowanie położenia wału silnika napędzającego karetkę. Informacja o jej pozycji aktualizowana jest co 25 mikrosekund [Haliniak, 2009]. Zastosowany sterownik napędu serwokrokowego wykorzystuje metodę regulacji w trybie zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego. Korzyścią takiego rozwiązania jest zabezpieczenie przed utratą synchronizacji i eliminacja możliwości zagubienia kroku, nawet podczas nagłej zmiany obciążenia, co jest typowe dla konwencjonalnych silników krokowych. Ponadto, wał silnika utrzymywany jest w całkowitym bezruchu, po osiągnięciu zadanej pozycji karetki. Dzięki zastosowanej metodzie optymalizacji fazy prądu przepływającego przez silnik w odniesieniu do prędkości obrotowej sterownik utrzymuje wysoki moment (maksymalnie 1 Nm) przy dużej prędkości. Sterownik posiada możliwość regulacji prędkości bez utraty synchronizacji w zakresie do 100% wartości obciążenia wynikającego z charakterystyki momentu silnika [Haliniak i Kantor, 2012].

Program komputerowy umożliwia dokonywanie parametryzacji pracy napędu poprzez zadanie kierunku przejazdu i jego prędkości wraz z odległością o jaką ma się przesunąć karetką. Aplikacja [Bujalski, 2014] wyświetla i obsługuje zaistniałe alarmy podczas pracy urządzenia. Ponadto, program kontroluje, aby karetką nie przekroczyła punktów krańcowych. Posuw liniowy widoczny jest na rysunku 1 u dołu komory pomiarowej. Na posuwie umieszczone były pręty. Pręty miały przekrój kwadratowy o boku 0.04 m i wysokość 0.425 m.

## 3. Metodyka pomiarów

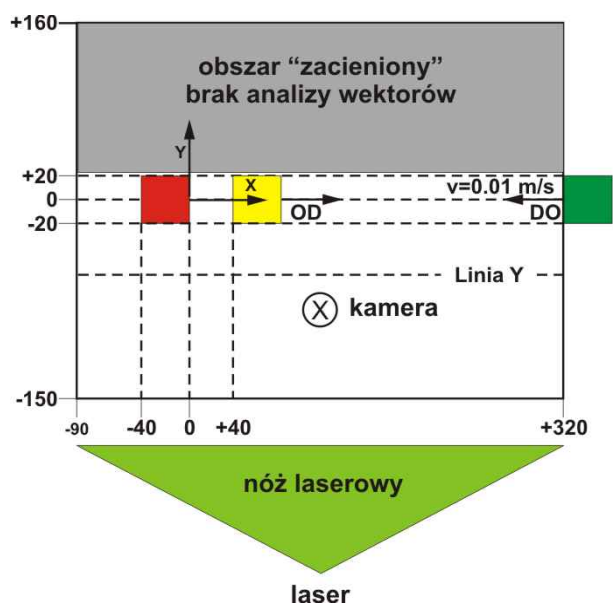
Wykonano badania przepływu wokół dwóch kwadratowych prętów, z których jeden – od strony napływu – był nieruchomy, a drugi oddalał się od pierwszego lub przybliżał do niego z prędkością 0.01 m/s. Pierwotne i końcowe położenie prętów przedstawiono na rysunku 2. Wartości odległości podano w milimetrach. Prędkość napływu wynosiła 1.55 m/s.

Pomiary dwuwymiarowych pól prędkości wykonywano w jednej płaszczyźnie poziomej przechodzącej przez środki prętów, prostopadłej do ich osi wzdluznych. W celu redukcji odbłasków, miejsca, w których nóż świetlny przecinał elementy zestawu pomiarowego zostały pomalowane na czarno (Rys. 1).

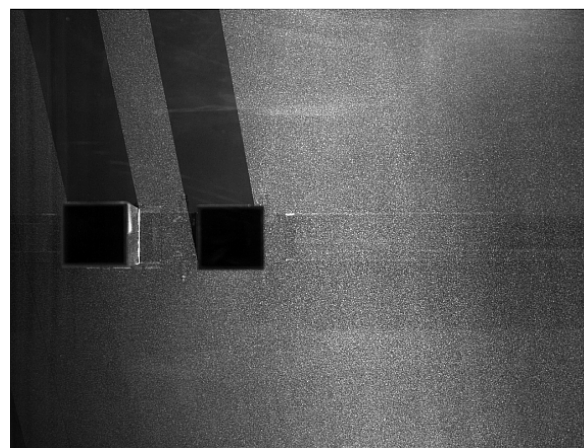
Początek układu współrzędnych przyjęto na środku zewnętrznej krawędzi pierwszego pręta (Rys. 2). Początkowa odległość pomiędzy prętami w ruchu OD wynosiła 0.04 m, a końcowa 0.32 m. W drugim



Rys. 1. Pręty zamontowane na posuwie liniowym w komorze pomiarowej



Rys. 2. Schemat położenia prętów podczas wykonywania zdjęć



Rys. 3. Zdjęcie badanych prętów

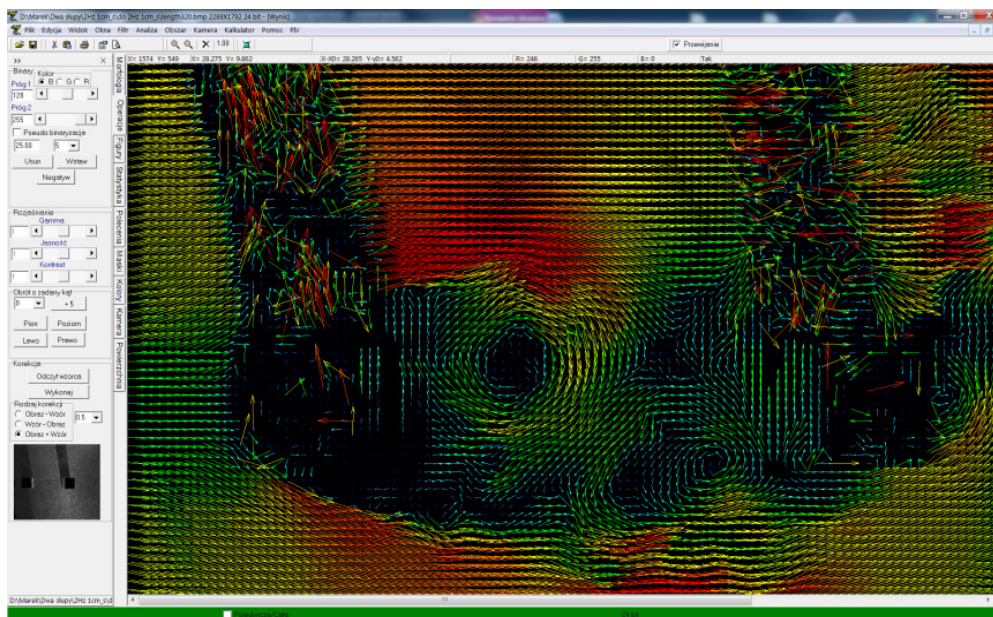
przypadku (ruch DO) drugi pręt początkowo znajdował się w odległości 0.32 m od pierwszego i zbliżał się do niego zatrzymując się w odległości 0.04 m.

Zdjęcie badanych prętów przedstawiono na rysunku 3. Jak widać z kierunku rzucanych cieni prętów, nóż świetlny skierowany był pod niewielkim kątem względem osi  $Y$ . Dlatego obszary, w których trudna lub niemożliwa była interpretacja wyników pomiaru prędkości były nieznacznie większe od przekrojów prętów. Dodatkowo, do powiększenia tych obszarów przyczyniło się zjawisko perspektywy. Wynikała ona z lokalizacji kamery i zastosowanej optyki – obszary zajmowane przez końce prętów widoczne na pierwszym planie są większe od przekrojów prętów na wysokości noża świetlnego oraz (mimo złudzenia optycznego) nie są kwadratami.

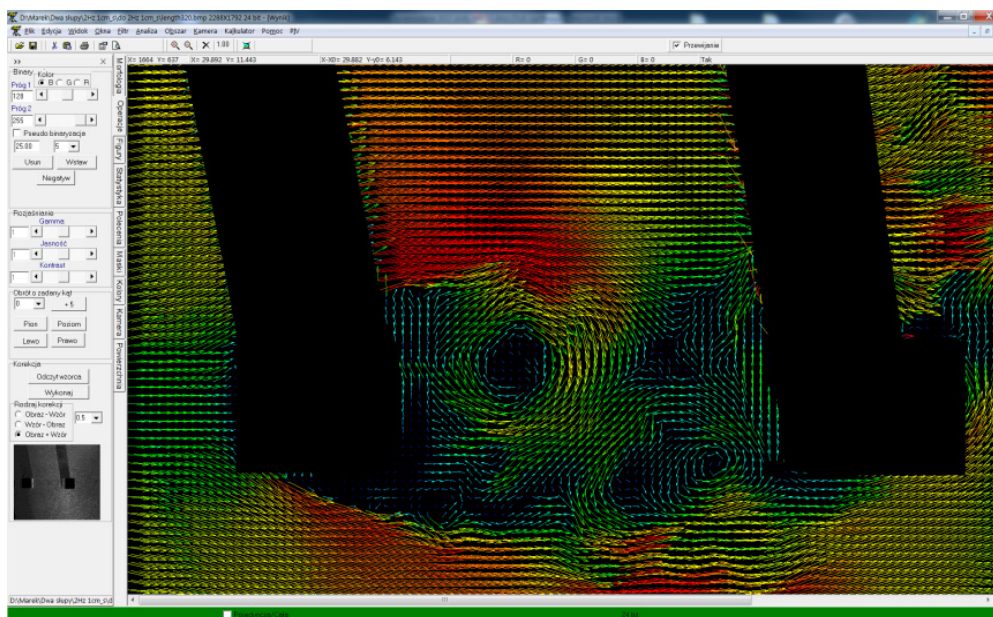
Na rysunku 4 przedstawiono chwilowe wektorowe pole prędkości wyznaczone dla całego obszaru. Rysunek 5 przedstawia to samo pole, ale usunięto z niego wektory z obszarów cieni oraz obszarów zasłoniętych przez górne części prętów. Rysunki wykonano za pomocą programu napisanego w IMG PAN.

Po kalibracji układu pomiarowego oraz pomiarach testowych rozpoczęto eksperymenty. Pomiar PIV rozpoczynano 2-3 sekundy przed uruchomieniem posuwu, kontynuowano przez cały okres jego ruchu, zatrzymywano ok. 3-4 sekundy po zatrzymaniu pręta.





Rys. 4. Przykład chwilowego wektorowego pola prędkości. Widoczne strefy błędnie wyznaczonych wektorów

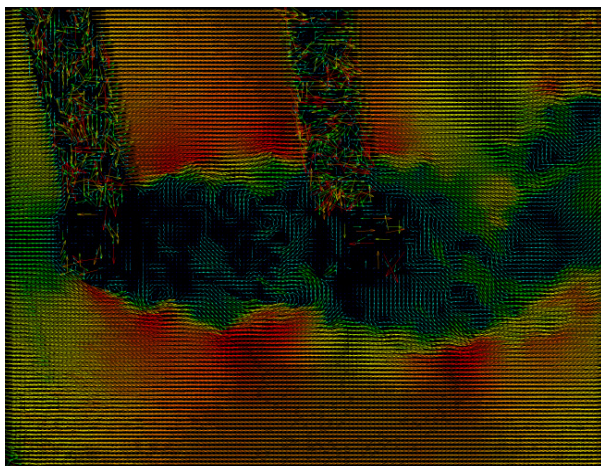


Rys. 5. Przykład chwilowego wektorowego pola prędkości z zamaskowanymi obszarami, w których nie można poprawnie wyznaczyć wektorów prędkości

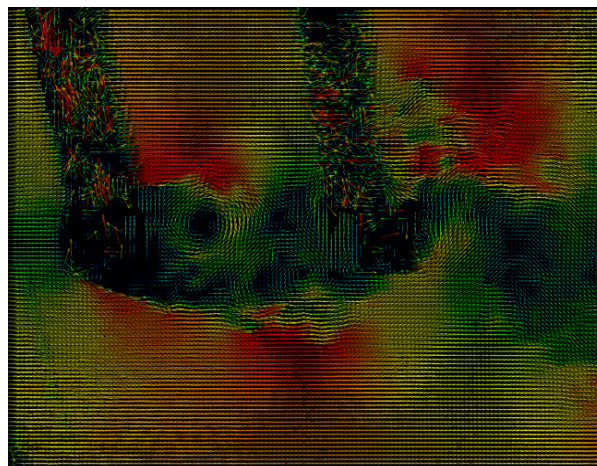
W każdej serii pomiarowej rejestrowano 500 par zdjęć cyfrowych o rozdzielczości  $2560 \times 2160$  pikseli z częstotliwością 15 Hz. Czas pomiędzy parą zdjęć wynosił 0.0004 s. Pole pomiarowe odwzorowywane na matrycy sCMOS kamery miało rozmiary fizyczne ok.  $410 \times 310$  mm. W wyniku analizy każdej pary zdjęć uzyskiwano ok. 16 000 wektorów określających chwilowe pola prędkości w rozważanym obszarze. Pola te były punktem wyjściowym do dalszej analizy.

#### 4. Wyniki pomiarów

Zaobserwowano występowanie dwóch głównych modów przepływu [Zdravkovich, 1987]. W modzie pierwszym, przy małej odległości pomiędzy prętami, intensywny przepływ wirowy występuje tylko za drugim prętem (Rys. 6). Pomiedzy prętami występuje strefa stagnacji. Układ taki zachowuje się jak jedno opływane ciało. W modzie drugim wiry odrywają się naprzemiennie z bocznych krawędzi obydwu prętów (Rys. 7).



Rys. 6. Przykład chwilowego pola prędkości z zarejestrowanym modem I – ruch OD



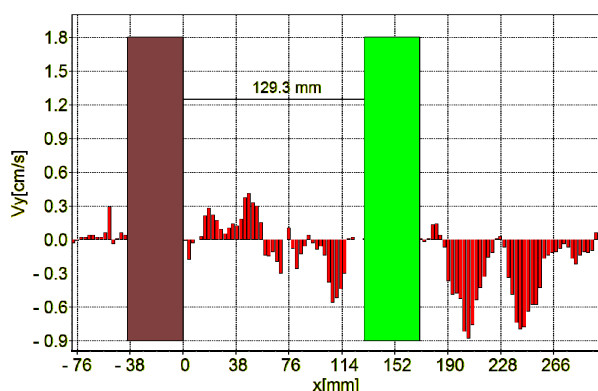
Rys. 7. Przykład chwilowego pola prędkości z zarejestrowanym modem II – ruch DO

W celu określenia odległości, przy której następuje zmiana struktury przepływu pomiędzy prętami uzyskane wyniki poddano wielorakiej analizie. Pierwsza, subiektywna analiza, polegała na sekwencyjnym przeglądaniu chwilowych pól prędkości (jak na rysunkach 6 i 7) i arbitralnym określaniu momentu przejścia modu pierwszego na drugi (lub na odwrót). Należy zaznaczyć, że zmiana modów nie następowała pomiędzy dwoma sąsiednimi polami prędkości. Proces zmiany był dłuższy – obserwowano stopniową zmianę modu na kilkunastu kolejnych polach prędkości. Świadczy to z jednej strony o występowaniu modów przejściowych, a z drugiej o wystarczającej rozdzielczości czasowej zastosowanego zestawu PIV do analizy rozważanego przypadku.

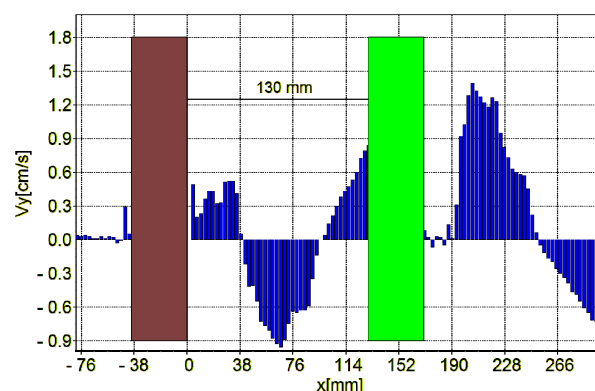
Opracowano również kilka obiektywnych metod detekcji zmiany modów. Jedną z nich, polegającą na analizie składowych  $V_x$  i  $V_y$  wektorów prędkości leżących na linii przechodzącej przez środki prętów zobrazowano przykładami poniżej. Zaobserwowano, że w momencie zmiany modów w istotny sposób zmieniają się wartości składowej poprzecznej  $V_y$  prędkości, oraz w mniejszym stopniu składowej wzdłużnej  $V_x$ .

Na rysunkach 8-11 przedstawiono rozkłady składowej  $V_x$  oraz  $V_y$  w ruchu DO dla położenia pręta, które uznano za przylegające do granicy zmiany modów. W odległości  $L = 0.130$  m składowe prędkości zmieniają się w granicach: składowa  $V_y$  od  $-0.9$  do  $0.9$  m/s (Rys. 9), składowa  $V_x$   $-0.9$  do  $0$  m/s (Rys. 10). Wysokie wartości prędkości wskazują na istnienie przepływu wirowego pomiędzy prętami. Gdy ruchomy pręt znajduje się w odległości o  $1$  mm mniejszej, tj.  $L = 0.129$  m wartości minimalne i maksymalne prędkości wynoszą odpowiednio  $-0.3$  i  $0.3$  m/s dla składowej  $V_y$  oraz  $-0.36$  i  $0.1$  dla składowej  $V_x$ .

Opisaną metodą określono również w jakiej odległości następuje zmiana struktury przepływu w przypadku oddalania się prętów (Rys. 12-15). Przejście z trybu wirowego w tryb stagnacji wystąpiło w położeniu pomiędzy  $0.197$  m a  $0.200$  m.

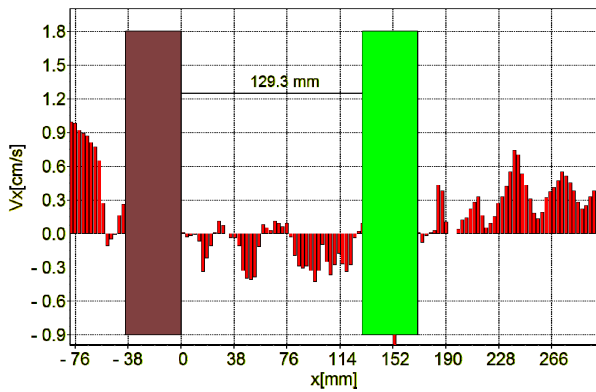
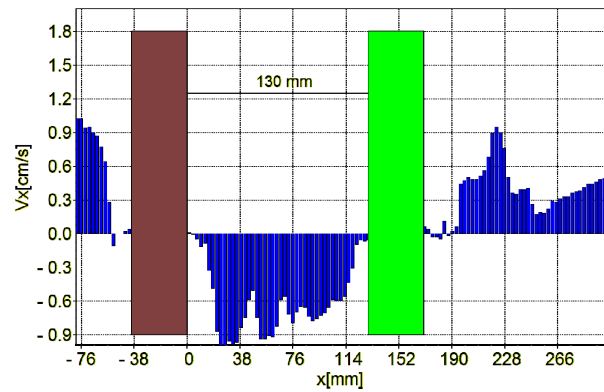
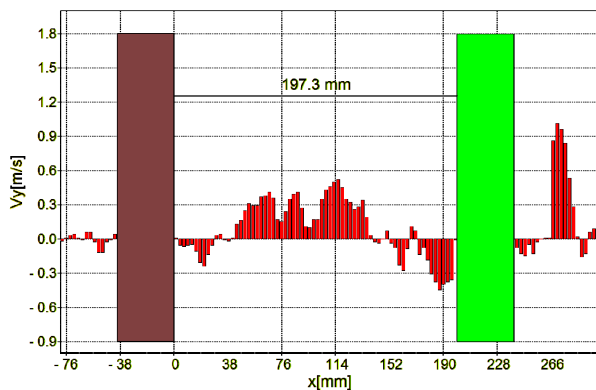
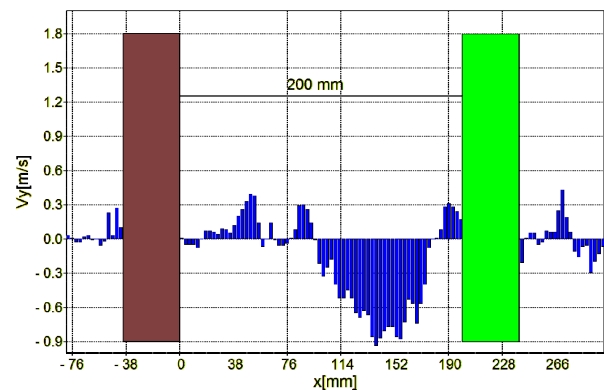
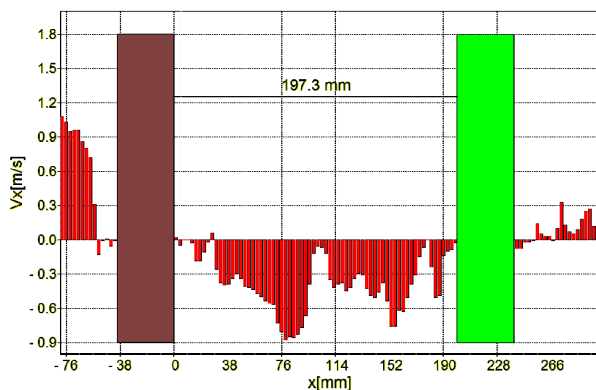
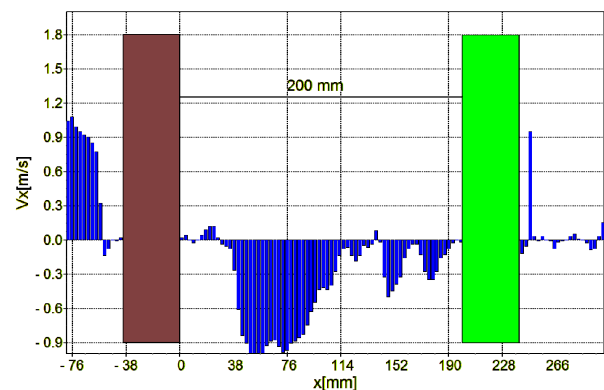


Rys. 8. Sładowa  $V_y$  prędkości w modzie I – ruch DO



Rys. 9. Sładowa  $V_y$  prędkości w modzie II – ruch DO

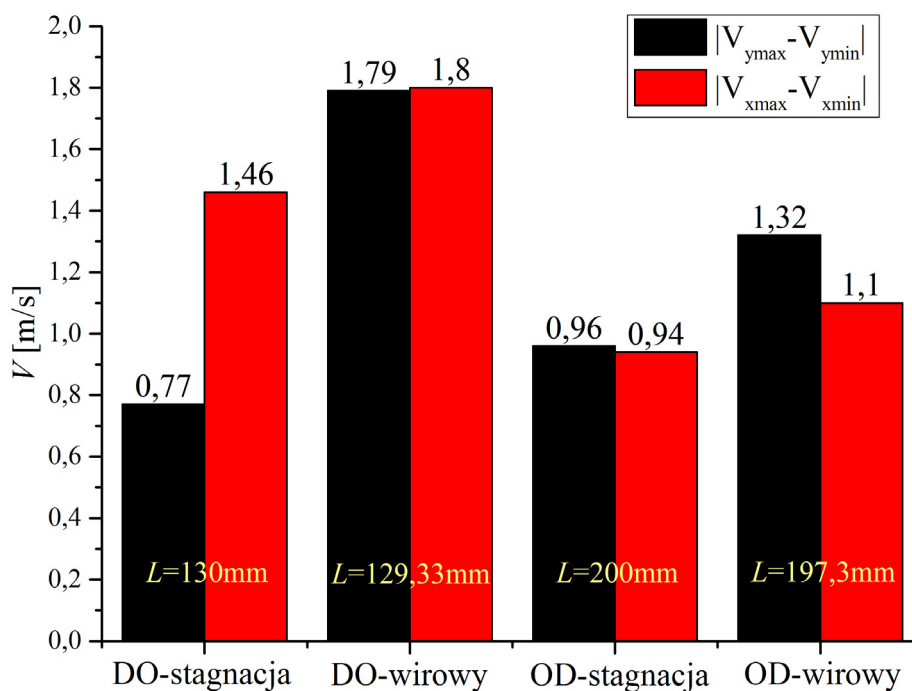


Rys. 10. Składowa  $V_x$  prędkości modzie I – ruch DORys. 11. Składowa  $V_x$  prędkości w modzie II – ruch DORys. 12. Składowa  $V_y$  prędkości w modzie I – ruch ODRys. 13. Składowa  $V_y$  prędkości w modzie II – ruch ODRys. 14. Składowa  $V_x$  prędkości w modzie I – ruch ODRys. 15. Składowa  $V_x$  prędkości w modzie II – ruch OD

Na rysunku 16 przedstawiono wartości bezwzględnych różnic pomiędzy minimalną i maksymalną wartością prędkości  $V_y$  oraz  $V_x$  w analizowanych przypadkach. W strefie przepływu wirowego wartości różnicy prędkości są wyższe, aniżeli w strefie stagnacji.

## 5. Podsumowanie

Przedstawione wyniki oraz ich analiza wskazują, że zastosowana metoda pomiaru – PIV, może zostać wykorzystana do analizy dwuwymiarowego pola prędkości w otoczeniu poruszających się obiektów. Rozdzielczość przestrzenna tej metody pomiarowej pozwala na identyfikację struktur przepływowych, a rozdzielczość czasowa okazała się wystarczająca dla określenia krytycznych odległości między prętami.



Rys. 16. Wartości bezwzględnych różnic pomiędzy minimalną i maksymalną wartością prędkości  $V_y$  oraz  $V_x$

Eksperymentalnie potwierdzono znany z literatury efekt występowania histerezy odległości krytycznych występujący dla ruchomych obiektów.

Obok metody subiektywnej – empirycznej – zaproponowano metodę obiektywnej detekcji zmiany modów. Metoda ta jednak, ze względu na występowanie trudnych do określenia na tym etapie badań modów przejściowych, nie powinna być stosowana samodzielnie. W celu uzyskania jednoznacznych wyników w tym zakresie konieczne jest połączenie jej z inną metodą, która będzie brała pod uwagę informację o prędkości z innego obszaru. Propozycję takiej metody podano w pracy [Sobczyk i in., 2018]. Dalsze studia w tym zakresie mogą zaowocować wypracowaniem zdolności wyodrębniania również modów przejściowych.

Praca została wykonana w roku 2017 w ramach prac statutowych realizowanych w Instytucie Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

## Literatura

- Bujalski M., Gawor M., Sobczyk J., 2013: *Tunel aerodynamiczny o obiegu zamkniętym, ze stabilizacją temperatury i wilgotności powietrza, przystosowany do pomiarów metodami optycznymi*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Vol. 15, No. 1-2.
- Bujalski M., 2014: *Stanowisko laboratoryjne z modulem liniowym o napędzie serwokrokowym do badania metod pomiaru prędkości przepływu powietrza*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Vol. 16, No. 3-4.
- Dokumentacja techniczna sterownika Ezi-SERVO PlusR – materiały firmy Fastech: [http://www.fastech.pl/pliki\\_do\\_po-brania/UserManualEziSERVO%20PlusR\\_Text%20\(Eng\).pdf](http://www.fastech.pl/pliki_do_po-brania/UserManualEziSERVO%20PlusR_Text%20(Eng).pdf)
- Haliniak T., 2009: *Ezi-SERVO Plus R – dwa w jednym. Napęd serwokrokowy z wbudowanym pozycjonerem*. Napędy i sterowanie, nr 6.
- Haliniak T., Kantor J., 2012: *Napęd Ezi-SERVO Plus-R jako system autonomiczny*. Elektronika Praktyczna, nr 6, s. 130-132.
- Gnatowska R., 2008: *Aerodynamic characteristics of two-dimensional sharp-edged objects in tandem arrangement*. Archives of Mechanics, 60 6, pp. 475-490.
- Sobczyk J., Wodziak W., Gnatowska R., Stempka J., Niegodajew P., 2018: *Impact of the downstream cylinder displacement speed on the hysteresis limits in a flow around two rectangular objects in tandem – PIV study of the process*. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 179, 184-189.

- Sunmer D., 2010: *Two circular cylinders in cross-flow: A review*. Journal of Fluids and Structures, 26 (2010), 849-899.
- Xu G., Zhou, Y., 2004: *Strouhal numbers in the wake of two inline cylinders*. Experiments in Fluids, 37, 248-256.
- Zdravkovich M.M., 1987: *The effects of interference between circular cylinders in cross flow*. Journal of Fluids and Structures, 239-261.
- Zhou Y., Yiu M.W., 2006: *Flow structure, momentum and heat transport in a two-tandem-cylinder wake*. Journal of Fluid Mechanics, 548, 17-48.

### **Checking of the applicability of the Particle Image Velocimetry in investigations of the flow past moveable objects in a closed channel**

#### **Abstract**

Investigations of airflow past moveable object were carried out in a wind tunnel. Experimental setup consisted of two square cylinders in the inline configuration. The first of them was permanently attached close to the measuring chamber inlet. The second cylinder was moving forth and back with velocity  $V_c = 0,01$  m/s. Particle Image Velocimetry measurements were performed for the free stream velocity  $V_\infty = 1,55$  m/s. Observed flow patterns were changing depending on the distance between cylinders and direction of motion of the cylinder. An attempt was made to objectively determine the distance between cylinders at which the flow patterns used to change.

**Keywords:** two square cylinders, moving cylinder, particle image velocimetry, wind tunnel