

Badania opływu czujników anemometrycznych

MACIEJ BUJALSKI, MAREK GAWOR, JERZY GORGON, MARTA TICHORUK,
MARIUSZ R. SŁAWOMIRSKI, JACEK SOBCZYK

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

Streszczenie

Wykonano pomiary przepływu powietrza opływającego anemometr skrzydełkowy typ μ As o średnicy 100 mm. Przepływ był wymuszane za pomocą tunelu aerodynamicznego o zamkniętym obiegu. Analizie poddane były obszary napływu na anemometr oraz zaburzeń przepływu za anemometrem. Zastosowana technika pomiarowa – cyfrowa anemometria obrazowa pozwoliła na wyznaczenie płaskich profili prędkości oraz map składowych prędkości v_x i v_y . Otrzymane wyniki wskazują, że największe zaburzenie polegające na znacznym spowolnieniu przepływu, zarówno przed jak i za sondą powoduje czasza anemometru. Ponadto zaobserwowano główny przepływ w obszarze wirnika. Wyniki pomiarów mogą być przydatne podczas umieszczania innych czujników w przepływie np. termianemometr włóknowy.

Słowa kluczowe: cyfrowa anemometria obrazowa, anemometr skrzydełkowy, tunel aerodynamiczny, opływ czujników anemometrycznych

1. Metoda badawcza

W celu analizy przepływu gazu, metodami cyfrowej anemometrii obrazowej konieczne jest wykonanie co najmniej dwóch zdjęć w znanym odstępie czasu. Wykorzystano do tego celu kamerę cyfrową firmy ARCO oraz laser MAGNUM z optyką noża świetlnego. Kamera sterowana była przez program MARCO (Gawor, 2005). Analizę zdjęć i obliczania składowych prędkości wykonywano za pomocą programu o nazwie PIV (Gawor, 2008a). Oba pakiety zostały opracowane i napisane przez zespół Pracowni Metrologii Przepływów IMG PAN (Gawor, 2008b).

Głównym zadaniem pierwszego pakietu było ustawianie parametrów kamery, synchronizacja i akwizycja zdjęć. Adjustacja lasera polegała na ustawieniu jego mocy (typowo: na minimum podczas konfiguracji nowego eksperymentu i na maksimum podczas właściwych pomiarów) oraz na wyborze położenia ogniska noża świetlnego. Sterowanie pracą kamery można podzielić na dwa etapy. Pierwszy manualny, związany jest z wyborem obiektywu, ilości pierścieni dystansowych, przysłony oraz regulacją ostrości obrazu w płaszczyźnie noża świetlnego. W programie możliwe jest sterowanie pracą kamery za pomocą interfejsu programu, który pozwala wybrać m.in. – ilość zdjęć, czas ekspozycji, czas odstępu pomiędzy zdjęciami, czas błysku oświetlenia, wzmocnienie sygnału matrycy, opóźnienie pierwszego zdjęcia i wiele innych. Konieczne było indywidualne ustawienie tych parametrów dla każdego eksperymentu. Dodatkowo, po każdorazowej zmianie konfiguracji przestrzennej kamera-laser lub/i regulacji obiektywu konieczne było wykonanie zdjęcia obiektu o znanych wymiarach w celu określenia skali odwzorowania przestrzennego (ilość pikseli na zdjęciu przypadająca na jednostkę długości obiektu).

Drugi pakiet umożliwiał wykonanie analizy ruchu powietrza przy pomocy cyfrowej anemometrii obrazowej. Pierwszą operacją było rozdzielenie podwójnego zdjęcia, otrzymanego z kamery, na dwa pojedyncze. W obydwu pakietach operacja ta wykonywana jest automatycznie. Zaimplementowano w nich również funkcje „animacji zdjęć”. Polega ona na cyklicznym wyświetlaniu na ekranie monitora pierwszego i drugiego zdjęcia. Funkcja ta jest bardzo przydatna w celu szybkiego określenia poprawności wykonanych zdjęć, bez

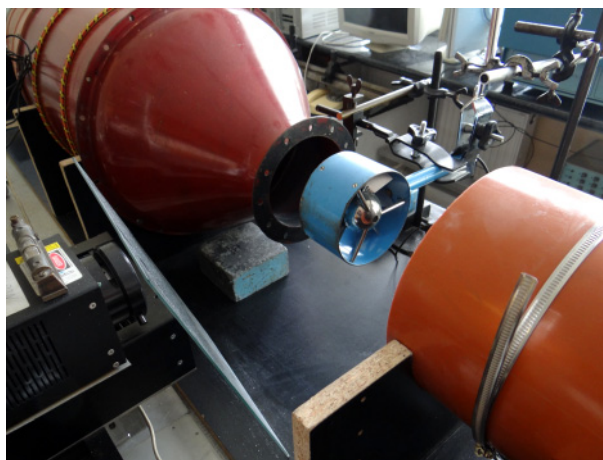
czasochłonnej analizy szczegółowej. Można w ten sposób ocenić, czy prawidłowo został ustawiony: czas pomiędzy zdjęciami, czas błysku diody, wzmacnienie kamery, gęstość posiewu itp. Programy zostały napisane tak, aby można było wykonać całą serię zdjęć, a następnie w sposób automatyczny analizować te zdjęcia. Podczas analizy zdjęć wykorzystano techniki przetwarzania obrazu (Tadeusiewicz i Korochoła, 1997).

2. Stanowisko pomiarowe

Stanowisko pomiarowe zostało zaprojektowane i zbudowane tak, aby spełnić w zadowalającym stopniu wymogi wynikające ze sposobu wykonywania zdjęć służących do obliczania wektorów przepływu (PIV) oraz sposobu prowadzenia obliczeń numerycznych. Chodzi tu zarówno o warunki początkowe: jak ukształtowanie profilu prędkości na wylocie oraz warunki brzegowe. Stanowisko tunelu aerodynamicznego zostało wykonane w całości w Pracowni Metrologii Przepływów IMG PAN. Konieczność jego budowy wynikała z wymagań metody pomiarowej, jaką jest cyfrowa anemometria obrazowa. Ze względu na konieczność stosowania posiewu o znacznym stężeniu cząsteczek stałych wykorzystanie do badań jednego z dostępnych w IMG PAN tuneli otwartych byłoby nieekonomiczne (możliwość zniszczenia tunelu) oraz wiązałoby się z wytworzeniem znacznego poziomu zapylenia w pomieszczeniu. Dokładny opis tunelu aerodynamicznego przedstawiono w osobnym artykule (Gawor i in., 2011). Jako posiew wybrano lekki węglan magnezu ($60\% \text{Mg}(\text{HCO}_3)_2 + 40\% \text{MgO}$), o gęstości usypowej $\sim 0.2 \text{ kg/dm}^3$. Konstrukcja generatora posiewu została przedstawiona w osobnym artykule (Gawor i in., 2011a). Obok tunelu umieszczono stolik XY, na którym zamontowany był specjalny statyw, do którego przytwierdzono laser i kamerę. Cała konstrukcja pozwalała na dowolne, względne ustawienie obu urządzeń tak, aby wybrać odpowiedni fragment sondy anemometru w celu jego oświetlenia i sfotografowania. Widok stanowiska pomiarowego przedstawiono na fotografiach 1 i 2. Na Fot. 1 przedstawiono usytuowanie tunelu w pomieszczeniu, kamery i lasera, a na Fot. 2 usytuowanie modelu – sondy anemometru skrzydełkowego.



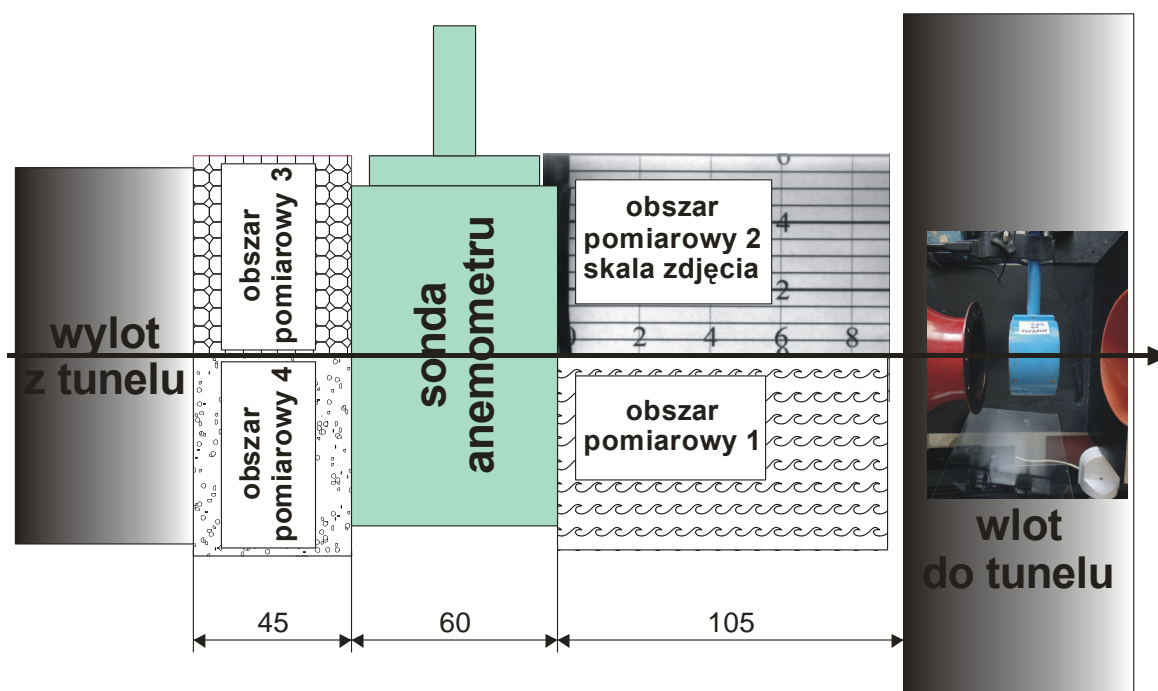
Fot. 1. Widok Stanowiska pomiarowego



Fot. 2. Przestrzeń pomiarowa

3. Opis eksperymentu

Eksperyment polegał na analizie pola prędkości powietrza opływającego anemometr skrzydełkowy, którego średnica obudowy wynosiła $\phi = 100$ mm. Anemometr zlokalizowany był 45 mm od wylotu tunelu aerodynamicznego ($\phi = 110$ mm) i 105 mm od wlotu do tunelu ($\phi = 200$ mm). Płaszczyzna pomiarowa przechodząca przez oś anemometru została podzielona na cztery pola (Rys. 1). Pola 1 i 2 usytuowane były za anemometrem, przy czym drugie za wspornikiem czaszy. Pola 3 i 4 były usytuowane przed anemometrem, przy czym pole 3 przed wspornikiem czaszy. Prędkość obrotowa wentylatora tunelu aerodynamicznego wynosiła 500 obr./min. Taka częstotliwość obrotu wentylatora odpowiadała prędkości przepływu powietrza wskazywaną przez anemometr w przybliżeniu ok. 1.12 m/s. Poniżej graficznie przedstawiono zarys ogólny eksperymentu oraz usytuowanie pól pomiarowych (Rys. 1). Na rysunku tym umieszczono graficznie przedstawione obszary pomiarowe 1-4. W drugim obszarze pomiarowym przedstawiono zdjęcie umożliwiające obliczenie skali (ilość pikseli przypadających na jeden centymetr).



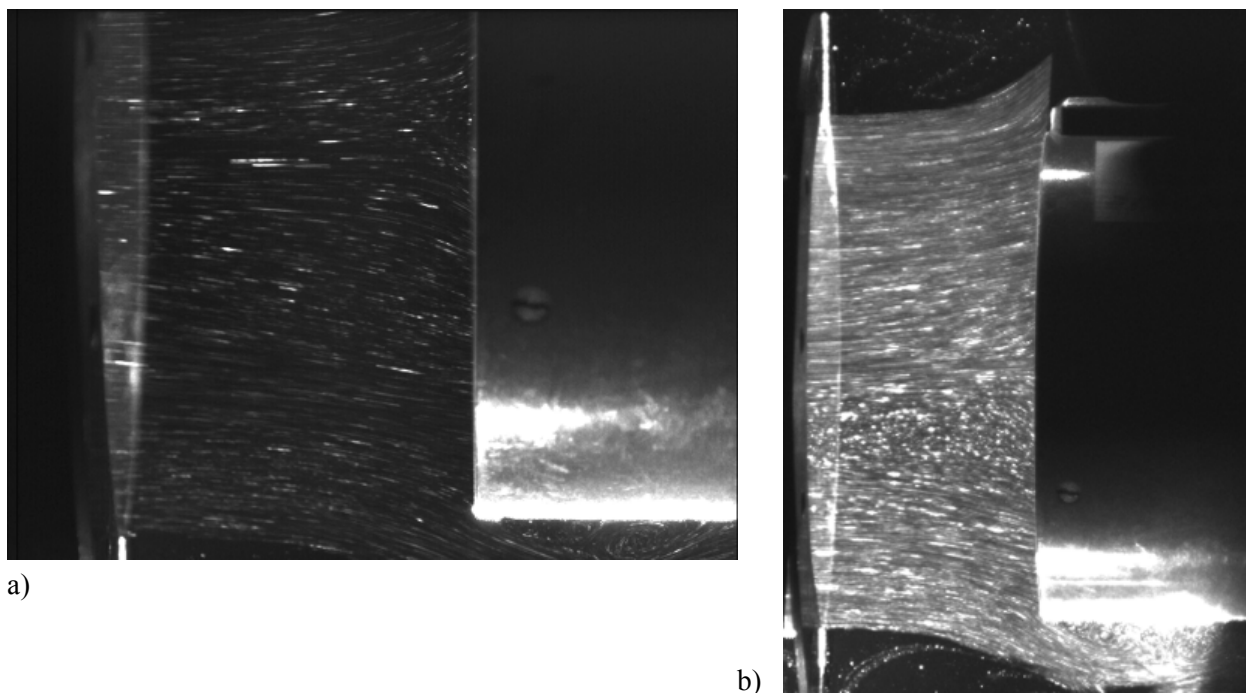
Rys. 1. Położenie anemometru oraz pól pomiarowych

Płaszczyzna pomiarowa została podzielona na cztery obszary. Zatem analizę wyników przeprowadzono zachowując przyjętą notację płaszczyzn pomiarowych. Obszary 3 i 4 stanowią strefę napływu powietrza, natomiast obszary 1 i 2 są strefą zaburzenia przepływu wywołanego obecnością anemometru skrzydełkowego.

4. Wstępne wyniki – zdjęcia śladowe cząstek

Przyjrzyjmy się dokładnie poszczególnym obszarom pomiarowym. Na rysunku 2 przedstawiono zdjęcia śladowe napływu na anemometr w obszarach 4 oraz 3+4 (napływ powietrza na sondę). Czas ekspozycji zdjęć wynosił 9.76 ms. Przy takim czasie naświetlania otrzymujemy tory cząsteczek, które można utożsamić z liniami prądu przepływu. Ciekawym spostrzeżeniem jest występowanie wiru na zewnątrz obudowy (dolna część zdjęcia). Być może, że wir ten powstaje dlatego, że średnica wylotu z tunelu jest porównywalna ze średnicą obudowy anemometru. Widoczny jest również obszar zmniejszenia prędkości wywołany obecnością czaszy w środkowej części przepływu. Na rysunku 2a w jego górnej części widoczna zmiana kierunku wektora prędkości powietrza (wzrost składowej v_y) spowodowana obecnością belki mocującej rękojeść anemometru.

Podobne efekty występowania wiru na zewnątrz obudowy anemometru zaobserwowano podczas obliczeń numerycznych. Obliczenia prowadzono przyjmując napływ powietrza (Sławomirski, 2013; Hie-



Rys. 2. Napływ powietrza na czoło sondy (zdjęcia śladowy) – w obszarze 4 (a) i w obszarze 3+4 (b)

menz, 1911) na krawędź obudowy anemometru oraz uwzględniając obecność czaszy. Wpływ czaszy na przepływ uwidacznia się w górnej części zdjęcia. Wyniki obliczeń przedstawiono na Rys. 3.

Na rysunku 4 uwidoczniiony jest przepływ powietrza (zdjęcia śladowe cząstek) w obszarze 1 i obszarze 1+2 po zaburzeniu przepływu przez sondę anemometru.

Na rysunku 4 obserwujemy strumień cząstek znacznikowych, które w miarę zbliżania się do przeszkody lub też w miarę oddalania się od niej, zaczynają tworzyć strugi o różnym rozkładzie prędkości powietrza. Można wyróżnić obszar wirnika (dolna część zdjęć, obszar czaszy – część środkowa i obszar wspornika – górna część zdjęcia 4b).

5. Analiza profili prędkości – przed i za sondą

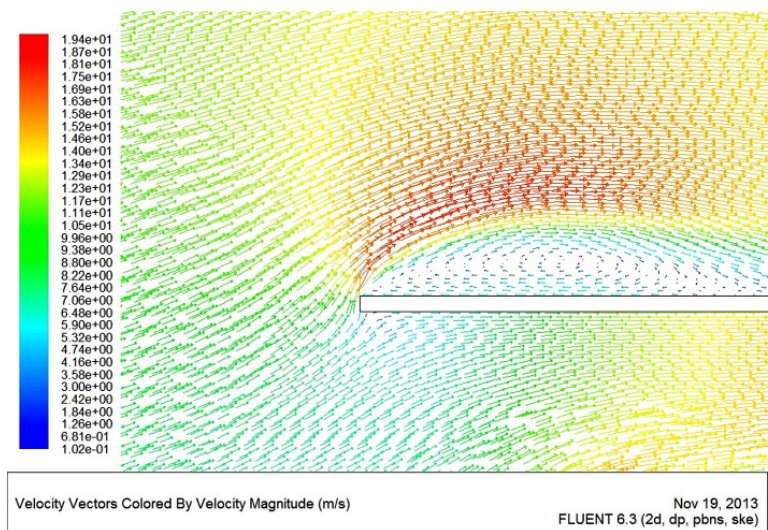
Dokładny rozkład wektorów prędkości dla poszczególnych obszarów przepływu został wyznaczony metodą cyfrowej anemometrii obrazowej (PIV). Na rysunku 5 zostały przedstawione wektory prędkości przepływu w fazie napływania na obiekt (rys. 5a) i w fazie zaburzenia przepływu za obiektem (rys. 5b).

Z zaprezentowanych rysunków wynika, że wektory prędkości są ułożone względem siebie równolegle. Im bliżej obiektu (przeszkody) tym wyraźniej widać, że wektor prędkości odchyła się od przepływu równoległego do osi sondy. Związane jest to z opływem sondy, która stanowi przeszkodę dla przepływającego powietrza.

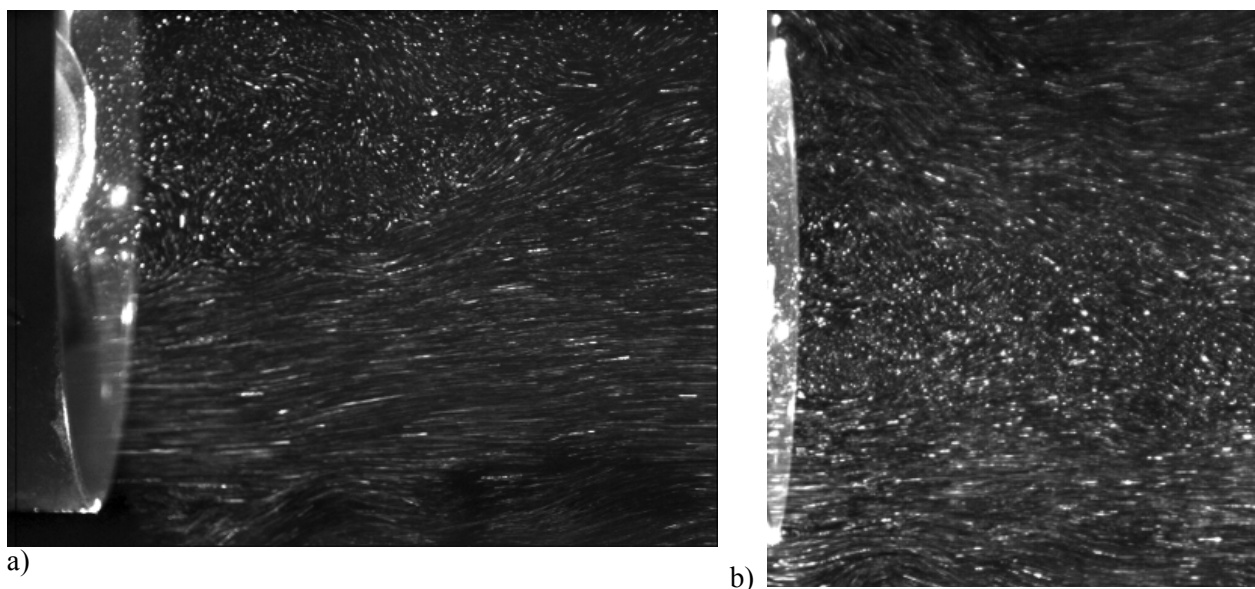
Natomiast w obszarze zaburzenia przepływu obserwujemy zarówno strumienie równoległego przepływu powietrza jak i wiry występujące w obszarze za czaszą sondy. W obszarze zaburzenia przepływu przez wspornik podtrzymujący czaszę sondy, obserwujemy ślady wirów, które prawdopodobnie pojawiają się w płaszczyźnie prostopadłej do przepływu. Nie można ich zatem analizować w płaszczyźnie badań XY metodą cyfrowej anemometrii obrazowej.

W celu dokładniejszej analizy wyznaczono rozkład składowych prędkości V_x i V_y wzdłuż osi Y, dla ustalonego położenia $X = 1,12$ cm przed obiektem oraz $X = 2,03$ cm za obiektem. Wyniki przedstawione zostały na Rys. 6a i Rys. 6b.

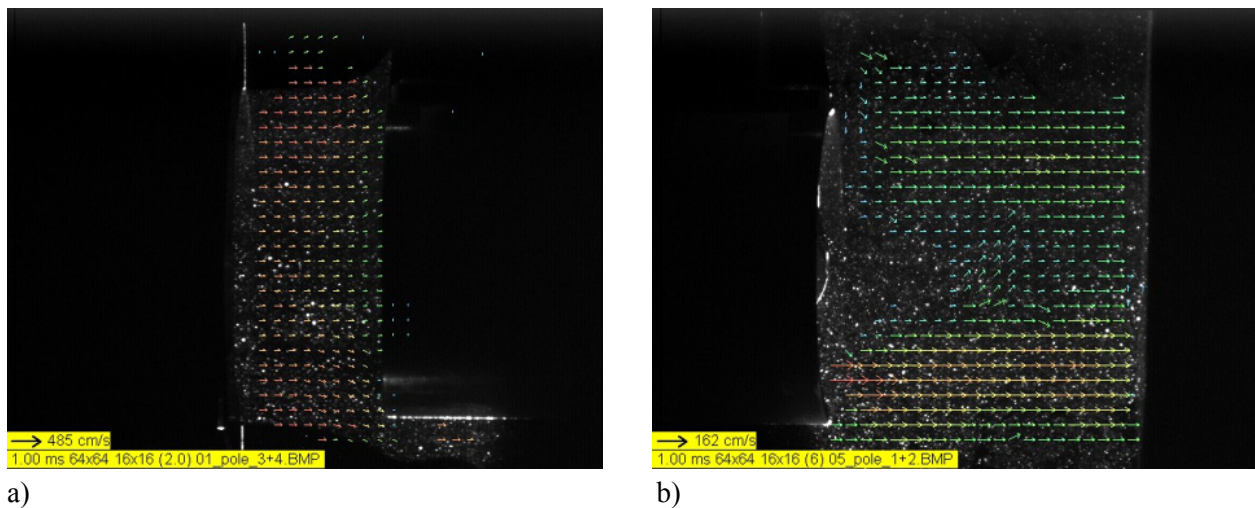
Jak widać prędkość powietrza napływającego na sondę w obszarze opływu obudowy jest większa, niż prędkość powietrza w centralnej części sondy (Rys. 6a składowa V_x). Wyraźne zwiększenie wartości składowej V_y występuje w miejscu napływu na wspornik rękojeści sondy. W obszarze za sondą widać wyraźny spadek prędkości V_x za czaszą oraz wzrost prędkości składowej V_y w tym obszarze. Ten wzrost prędkości V_y świadczy o powstawaniu wiru za czaszą.



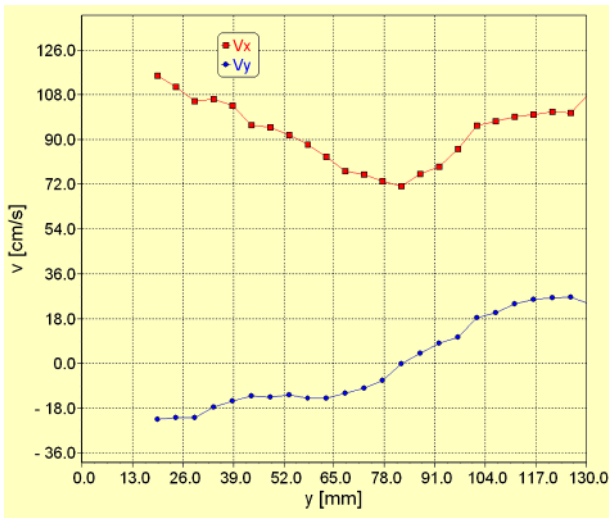
Rys. 3. Napływ powietrza na fragment obudowy anemometru - obliczenia numeryczne



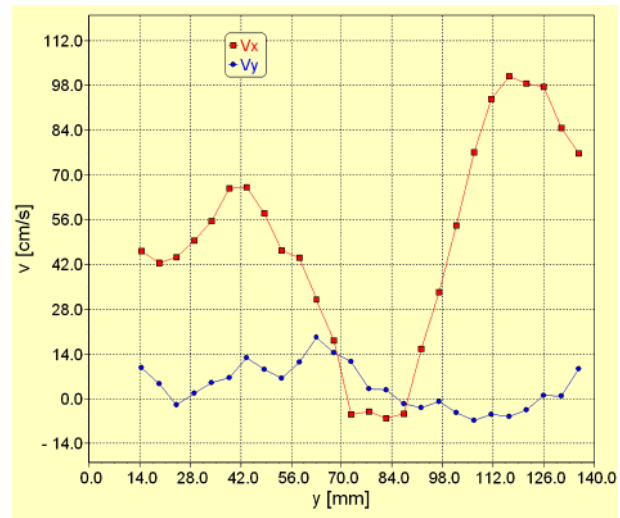
Rys. 4. Zdjęcia śladowe przepływu za sondą w obszarze 1 (a) oraz 1+2 (b)



Rys. 5. Wektory prędkości przepływu powietrza przed i za sondą



a)



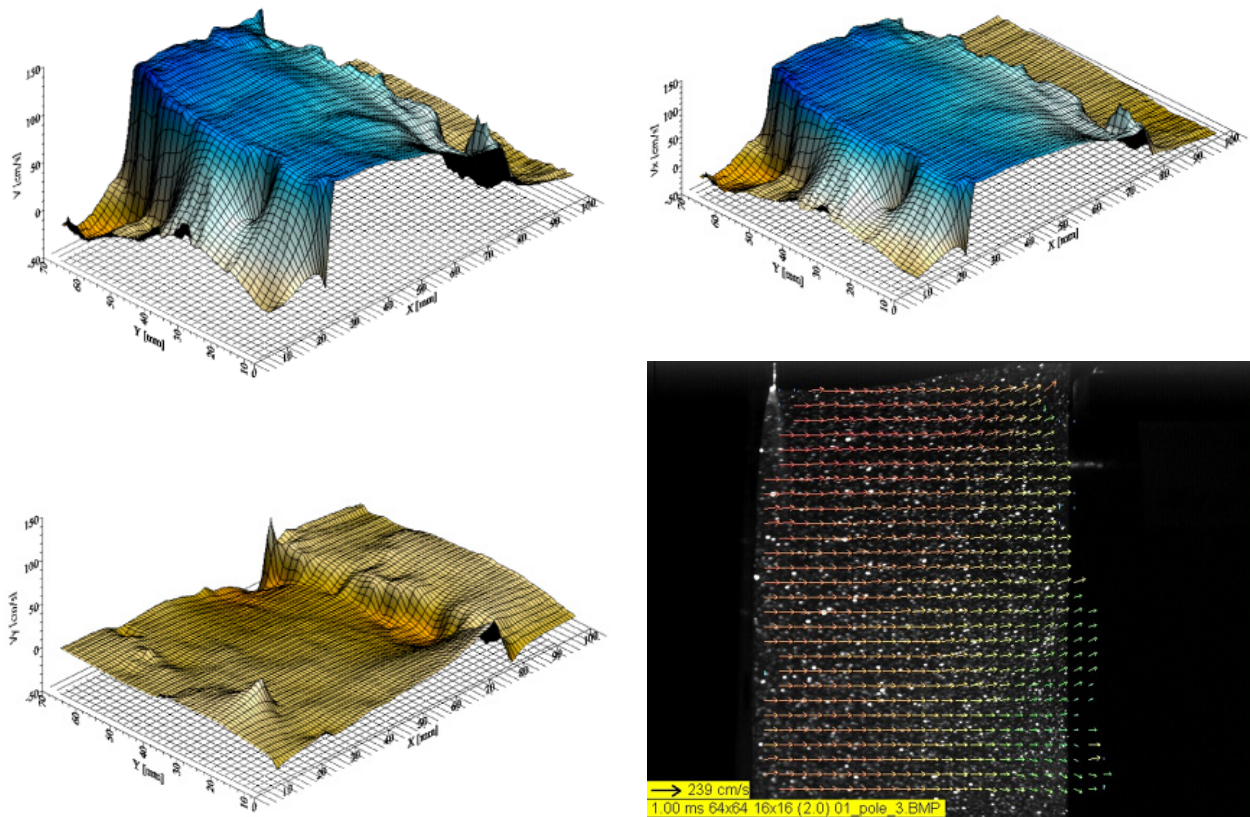
b)

Rys. 6. Profile składowych prędkości V_x i V_y – obszar napływu na sondę (a) i obszar za sondą (b)

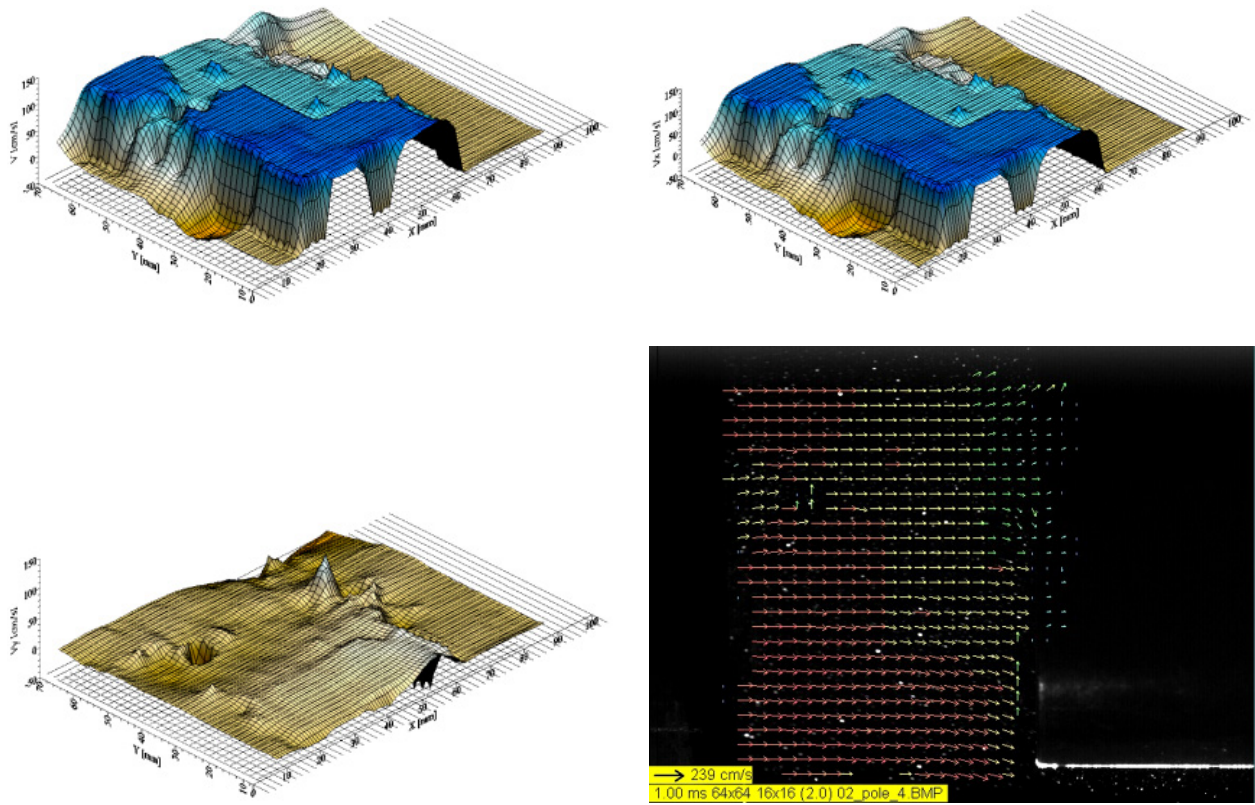
6. Analiza składowych prędkości przepływu V_x i V_y – mapy 3D

W celu analizy wyników eksperymentu zostały wykonane kompletne trójwymiarowe mapy składowych prędkości. W płaszczyźnie X Y narysowano składowe wektory prędkości V_x , V_y oraz $|V|$.

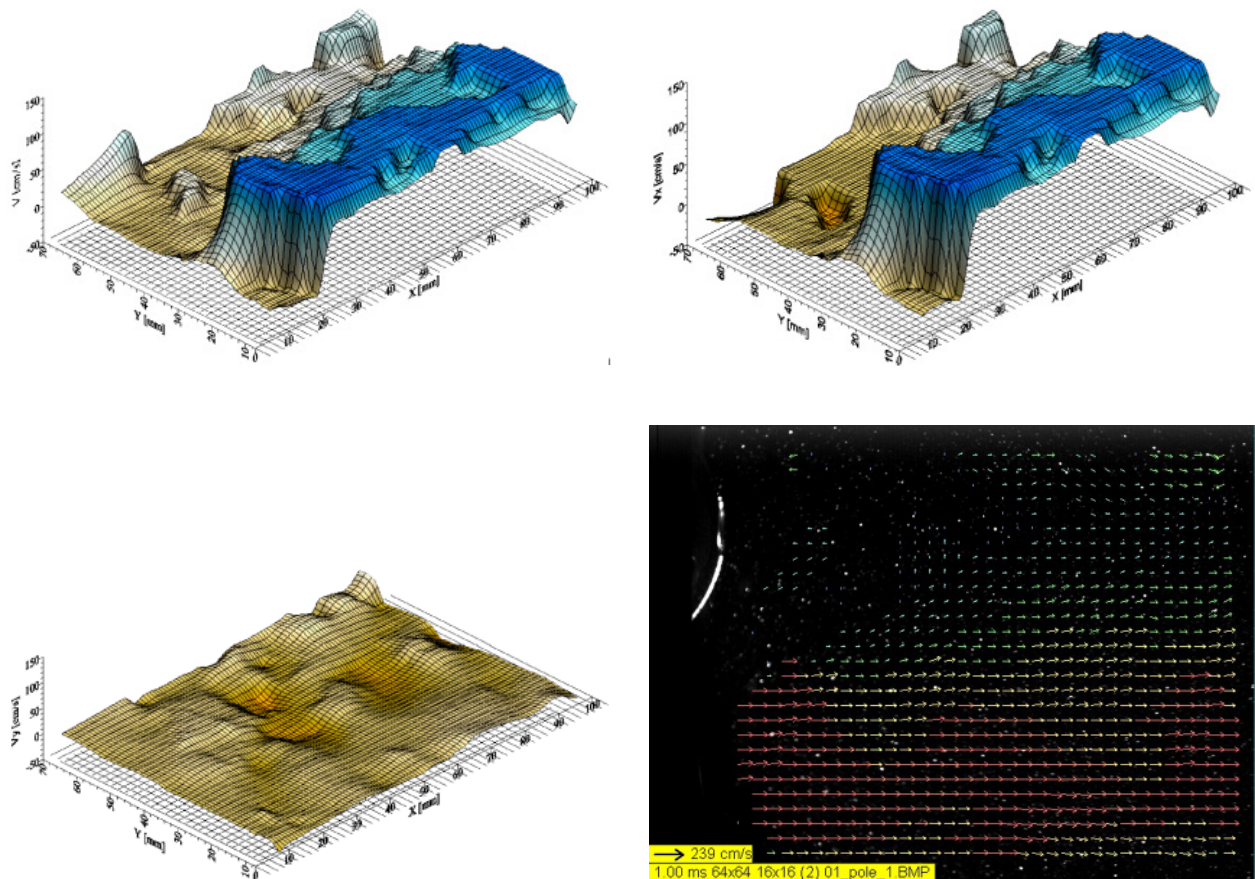
Z uwagi na fakt, że zarówno obszar napływu jak i obszar zaburzenia przepływu został podzielony na dwie części, możemy analizować każdy obszar z osobna. Dla każdego obszaru (1, 2, 3, 4) serie zdjęć zostały wykonane z większym powiększeniem. Wyniki przedstawione są na Rys. 7-10.



Rys. 7. Mapy składowych prędkości przepływu – faza napływu, obszar 3



Rys. 8. Mapy składowych prędkości przepływu – faza napływu, obszar 4



Rys. 9. Mapy składowych prędkości przepływu – faza zaburzenia, obszar 1

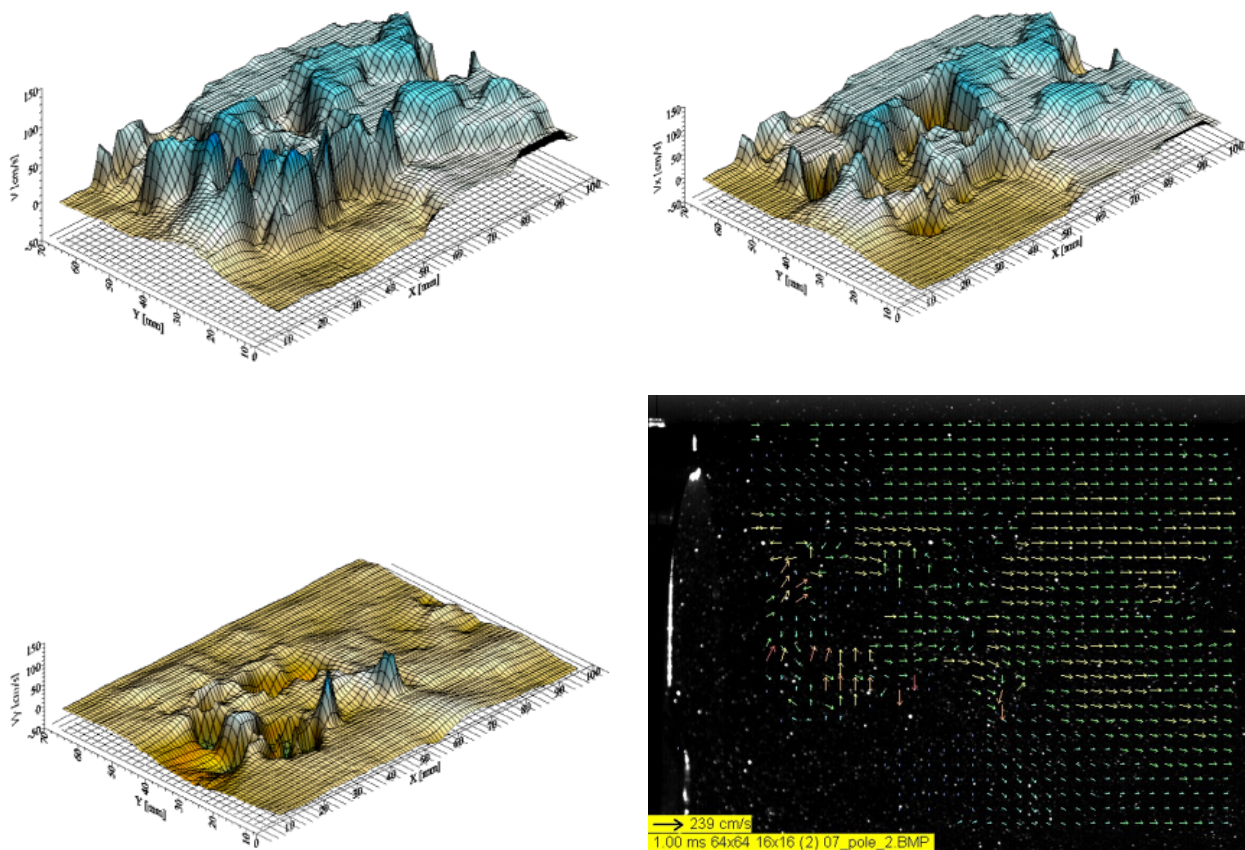
W obszarze badań oznaczonym jako pole 3 (Rys. 7) obserwujemy napływ powietrza na górną część sondy. Napływ jest równoległy to znaczy brak składowej V_y . Jednakże im bliżej sondy tym wyraźniej obserwujemy opływanie obiektu po zewnętrznej stronie. Pojawiają się niezerowe składowe wektora prędkości V_y , co oznacza, że strumień powietrza zaczyna skręcać w kierunku osi Y.

W obszarze badań oznaczonym jako pole 4 (Rys. 8) obserwujemy napływ na dolną część sondy. W dolnej części obszaru następuje zmiana kierunku strumienia powietrza związana z opływaniem obiektu. Jest to obszar wirnika sondy, gdzie opór stawiany w przepływie jest mniejszy niż w obrębie czaszy. W środkowej części obszaru napływu widzimy lekkie wyhamowanie prędkości przed przeszkodą, co widoczne jest jako zmniejszenie wartości składowej prędkości V_x . W miejscach gdzie przepływ nie jest jednorodny pojawiają się zaburzenia, które obserwujemy jako zmianę zwrotu i wartości wektora prędkości. Aby lepiej zrozumieć powyższe zjawisko należałoby rozpatrzyć ruch rotacyjny badanego przepływu.

W obszarze badań oznaczonym jako pole 1 (Rys. 9) następuje główny przepływ za wirnikiem sondy (duża wartość składowej V_x). W obszarze tym składowa V_y prędkości jest bliska zero i zmienia się nieznacznie (wykres składowej V_y jest „płaski”).

W środkowej części obszaru, następuje zwolnienie przepływu, co jest związane z obecnością przeszkody w przepływie jaką jest czasza sondy.

W obszarze badań oznaczonym jako pole 2 (Rys. 10) obserwujemy wiry powstające w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni pomiarowej. Widoczna jest naprzemienna intensyfikacja wartości składowych V_x i V_y wektorów prędkości przepływającego powietrza. Zmiana zwrotu i wartości składowych wektorów prędkości świadczy o tym, że powstał wir. Na mapach składowych prędkości V_x i V_y obserwujemy zatem maksima i minima. Ze względu na fakt, że przepływ następuje zgodnie z kierunkiem osi X, największy przyczynek do całkowitej wartości wektora prędkości $|V|$ pochodzi w dalszym ciągu od składowej wektora prędkości V_x .



Rys. 10. Mapy składowych prędkości przepływu – faza zaburzenia, obszar 2

7. Wnioski

Analiza wyników przeprowadzonych eksperymentów prowadzi do wniosku, że sonda anemometru skrzydełkowego prowadzi do dużego zakłócenia przepływu prędkości. Przedstawiony charakter zaburzenia przepływu może mieć istotne znaczenia przy pomiarach wykonywanych innymi przyrządami. Nieodpowiednie umieszczenie takich mierników jak anemometry, a zwłaszcza termoanemometry, czujniki metanu czy czujniki innych gazów może mieć znaczny wpływ na poprawność uzyskiwanych wyników pomiarów.

Należy zaznaczyć, że opisywane pomiary wykonywane były w tunelu aerodynamicznym o nieodpowiedniej geometrii (zbliżone średnice sondy anemometru i tunelu). Możliwe jest, że taka geometria tunelu powoduje kształtowanie nieodpowiedniego profilu przepływu (nierównomierny napływ powietrza na głowicę sondy). Pomiary należy powtórzyć w tunelu aerodynamicznym o średnicy większej niż średnica głowicy anemometru skrzydełkowego.

Przedstawione spostrzeżenia mogą mieć znaczenie podczas pomiaru przepływu w kopalnianych przewodach wentylacyjnych o niedużych przekrojach: lutniociągi, przewody odpowietrzające itp.

Pracę wykonano w ramach zadań statutowych Instytutu Mechaniki Górotworu PAN pt. „Badania opływu czujników anemometrycznych” w 2013 roku, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Gawor M., 2005. *Zastosowanie kamery CCD do filmowania szybkich procesów z równoczesną rejestracją parametrów termodynamicznych zjawiska*, w: *V Warsztaty „Modelowanie przepływów wielofazowych w układach termochemicznych. Zaawansowane techniki pomiarowe*. Stawiska k. Kościerzyny, 02-04-2005, p. 1-12.
- Gawor M., 2008. *Opis metody i stanowiska pomiarowego do badania przepływów pulsacyjnych w elastycznych przewodach*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, t. 10, s. 169-186.
- Gawor M., Gogoń J., Sobczyk J., 2011. *Tunel aerodynamiczny przystosowany do badań metodą cyfrowej anemometrii obrazowej*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, t. 13, s. 257-266.
- Hiemenz K., 1911. *Die Grenzschicht an einen im den gleichförmigen Flüssigkeitström eigeyauchen geraden Kreiszyliinder*. Dissertationen, Göttingen, reprinted in Dingl. Polytech. Jahrbuch, 326, p. 321-410.
- Kowalewski T.A., Michałek T., Błoński S., 2002. *Model przepływu sektora komory spalania turbiny gazowe*. IPPT PAN, Zakład Mechaniki i Fizyki Płynów, Warszawa. Badania realizowane w ramach projektu FLOXCOM 5PRE UE.
- Raffel M., Willert C. E., Wereley S. T., Kompenhans J., (2007), *Particle Image Velocimetry a practical guide*, Springer.
- Sławomirski M.R., 2013. *The Separation of Laminar Boundary Layer*. Manuscript of a textbook to be printed by Springer Verlag, Berlin – Heidelberg – New York.
- Tadeusiewicz R., Korohoda P., 1997. *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*, Kraków.

The study of flow around the anemometer probe

Abstract

Airflow through the μ As Vane Anemometer with measuring head diameter of 100 mm was investigated. The flow was maintained in a wind tunnel with a closed circuit. Regions of inflow on the Anemometer and flow disturbances behind were analyzed. Particle Image Velocimetry was used to determine profiles and contour plots of v_x and v_y components of velocity. The results show that the flow disorder resulting in significant slow down the stream (in front of as well as behind the probe) are caused by a bowl of Anemometer. Furthermore, the main flow in the area of the rotor was observed. The results of the experiments can be useful when the other sensors like hot wire probes are used to measure flow velocity.

Keywords: Particle Image Velocimetry, vane anemometer, wind tunnel, flow around anemometer sensors