

# Analiza pola prędkości wokół anemometru skrzydełkowego

MACIEJ BUJALSKI, MAREK GAWOR, JACEK SOBCZYK

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

## Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych zaburzenia pola prędkości wynikającego z umieszczenia w przepływie powietrza anemometru skrzydełkowego. Badania przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym o zamkniętym obiegu. W pomiarach wykorzystano optyczną technikę pomiarową zwaną cyfrową anemometrią obrazową (*Particle Image Velocimetry – PIV*). Zbadano obszar napływu na łopatkę anemometru skrzydełkowego, jak również przepływ za nim. Podano rozkład prędkości uśrednionych, chwilowych i współczynnik intensywności turbulencji.

W celu zbadania fluktuacji prędkości zastosowano termooanemometr z włóknem wolframowym o średnicy 5  $\mu\text{m}$ . Wykonano analizę widma częstotliwości za pomocą szybkiej transformaty Fouriera. Wyniki tej analizy prowadzą do wniosku, że zarówno przestrzenne jak i czasowe pola prędkości są w istotny sposób zakłócone przez obecność sondy anemometru skrzydełkowego. W przepływie stwierdzono występowanie zakłóceń o charakterze okresowym, których częstotliwości związane są z ruchem obrotowym łopatek anemometru.

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

## 1. Wstęp

Anemometry skrzydełkowe są powszechnie stosowane do pomiaru prędkości przepływu powietrza i wyznaczania objętościowego natężenia przepływu. Stosowane są w pomiarach przemysłowych, takich jak systemy wentylacyjne w kopalnianych sieciach wentylacyjnych, systemach wentylacyjnych pomieszczeń, systemach klimatyzacyjnych itd. Elementem pomiarowym jest wirnik skrzydełkowy, którego prędkość obrotowa jest proporcjonalna do prędkości przepływającego powietrza. Taka metoda pomiarowa należy do kategorii inwazyjnych technik pomiarowych. Umieszczenie sondy anemometru skrzydełkowego w badanym przepływie prowadzi do znacznego zakłócenia struktury przepływu. Efekt ten może niekorzystnie wpływać na inne sondy służące do pomiaru prędkości przepływu oraz czujniki mierzące inne wielkości fizyczne np. stężenie metanu.

Badania wpływu zaburzenia napływu na funkcjonowanie i charakterystykę różnych typów anemometry skrzydełkowych opisano m.in. w pracach [1-3]. Jednakże nie wykazano w nich jakie zakłócenia struktury przepływu generuje sam anemometr skrzydełkowy. Znajomość pola prędkości jest podstawą do zrozumienia i określenia zaburzenia przepływu wywołanego w obszarze pomiarowym. Zaburzenia przepływu przed i za głowicą anemometru skrzydełkowego badano doświadczalnie za pomocą serii pomiarów punktowych metodą termooanemometryczną [4]. W niniejszym artykule przedstawiono badania nieinwazyjną metodą optyczną, taką jak cyfrowa anemometria obrazowa. Celem prac opisanych w niniejszym artykule jest analiza zaburzenia pola prędkości wynikająca z umieszczenia anemometru skrzydełkowego  $\mu\text{AS4}$  w przepływie powietrza.

Anemometr ten (rys. 1) jest przyrządem do ręcznego pomiaru prędkości powietrza. Średnica sondy anemometru wynosi 100 mm, a szerokość 60 mm. Zakres pomiaru prędkości przepływu powietrza lub innych gazów mieści się w przedziale od 0,2 do 20 m/s. Anemometr został zaprojektowany i wykonany w Instytucie Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk. Sonda anemometru składa się z wirnika o ośmiu łopatkach odpornych na działanie kwasów. System nośny wirnika składa się z dwóch półkolistych czasz, które zamontowano do obudowy sondy za pomocą trzech wsporników w kształcie walca o średnicy 5 mm.



Rys. 1. Anemometr skrzydełkowy  $\mu$ AS4

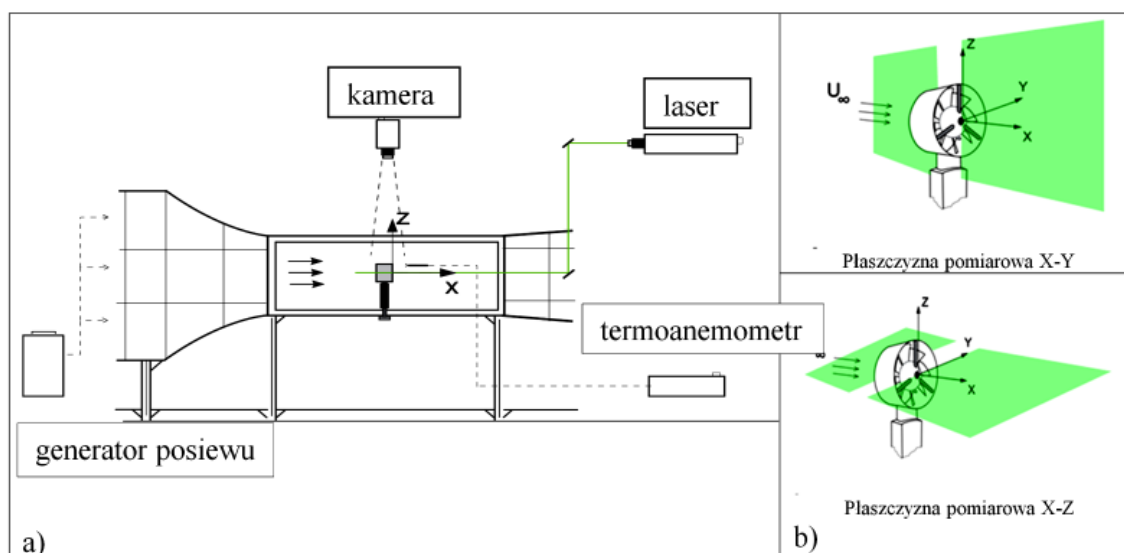
## 2. Schemat eksperymentu

Schemat eksperymentu przedstawiono na rys. 2. Eksperymenty przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym z zamkniętym obiegiem o jednorodnym rozkładzie prędkości i intensywności turbulencji mniejszej niż 0,5% (tunel ten znajduje się na wyposażeniu laboratorium w IMG PAN). Temperaturę w tunelu stabilizowano na poziomie 20°C i wilgotności względnej 35%. Komora pomiarowa o wymiarach 500×500×1500 mm wykonana była z przezroczystego poliwęglanu. Jako gazu używano do eksperymentu powietrza. Pomiary i obliczenia wykonano dla trzech prędkości przepływu  $U_\infty = 1$  m/s,  $U_\infty = 5$  m/s i  $U_\infty = 10$  m/s.

Jako posiew zastosowano cząsteczki oleju (DEHS), których średnica wynosiła około 1  $\mu$ m. Obszar pomiarowy został oświetlony światłem generowanym przez nóż świetlny podwójnego impulsowego lasera Nd: YAG o energii 220 mJ na impuls. Grubość noża wynosiła około 1 mm. Obrazy cyfrowe zostały zarejestrowane za pomocą jednej kamery typu sCMOS o rozdzielczości 2560×2100 pikseli. Rejestrowano 250 par zdjęć z częstotliwością 5 Hz, co dało całkowity czas pomiaru około 50 sekund. Czas pomiędzy dwoma kolejnymi

zdjęciami był zsynchronizowany z dwoma impulsami laserowymi i wahał się od 1 do 100 ms. Nastawa tego czasu zależała od prędkości przepływu.

Podczas obliczeń prędkości przepływu, wykorzystano metodę korelacyjną fragmentów dwu obrazów. Korelowano fragmenty (maski) o rozmiarach 32×32 piksele przemieszczając maskę co 16×16 pikseli, co po uwzględnieniu skali zdjęcia dawało rozmiar oka siatki pola wektorowego 1,4×1,4 mm.



Rys. 2. Układ stanowiska eksperymentalnego (a); płaszczyzny pomiarowe (u góry pionowa u dołu pozioma) oraz układ współrzędnych związany z anemometrem i przepływem (b)

Odbicia świetlne występujące na zdjęciach, pochodzące z elementów anemometru zostały stłumione zgodnie z procedurą podaną w pracy [5]. Polega ona m.in. na tym, że od każdego obrazu odjęto średni obraz przepływu z całej sesji pomiarowej.

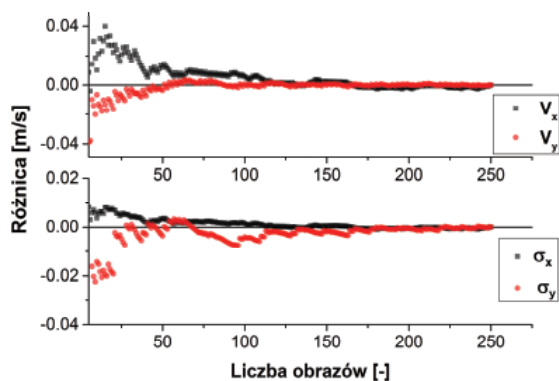
Opisany wcześniej anemometr skrzydełkowy został umieszczony w komorze pomiarowej tunelu aerodynamicznego (rys. 2a). Z anemometrem związany kartezyjski układ współrzędnych (rys. 2b). Środek układu współrzędnych umieszczono na przedłużeniu osi wirnika, przed czaszą anemometru. Wyniki

pomiarów przedstawiono w dwóch płaszczyznach XZ (dla  $y = 0$ ) – zorientowanej pionowo i XY (dla  $z = 0$ ) – zorientowanej poziomo.

W celu zbadania wysokoczęstotliwościowych fluktuacji przepływu wykonano pomiary za pomocą termooanemometru. Zaburzenia przepływu wywołane były przez łopatki, wsporniki czaszy i samą czaszę anemometru. System pomiarowy (wykonany w IMG PAN) oparty był na termooanemometrze stałotemperaturowym (CTA) [6]. W pomiarach użyto jednowłókowej sondy z drutem wolframowym o długości 2 mm i średnicy 5 mm. Punkty pomiarowe umieszczone były w płaszczyźnie YZ za anemometrem skrzydełkowym w przekroju dla  $x = 5$  mm (rys. 2). W każdym punkcie pomiarowym rejestrowano 16384 próbek z częstotliwością próbkowania 10 kHz (czas pomiaru wynosił 1,6 sek.).

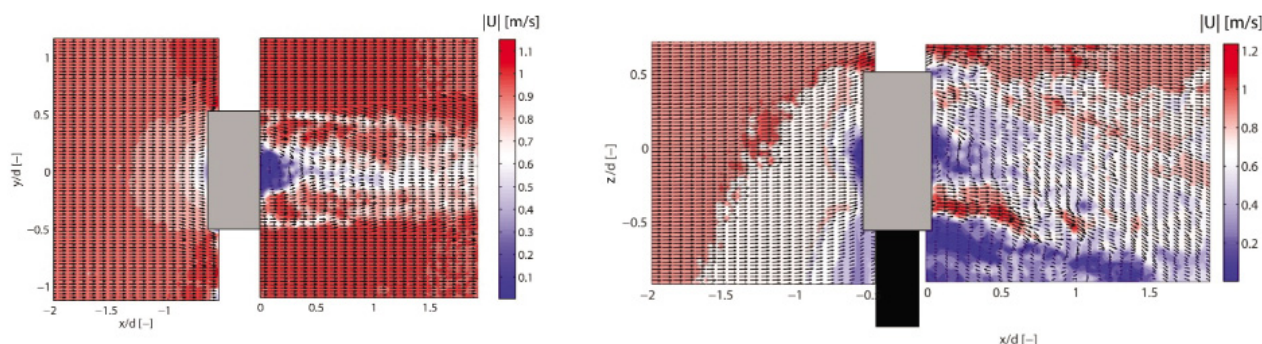
### 3. Wyniki badań

Do obliczeń statystycznych wykorzystano 250 chwilowych pól przepływu uzyskanych za pomocą cyfrowej anemometrii obrazowej (PIV). Dla arbitralnie wybranego punktu w płaszczyźnie pomiarowej obliczono ciągi średnich wartości prędkości  $V_x$  i  $V_y$ , wraz z odchyleniami standardowymi  $\sigma_x$  i  $\sigma_y$ , w taki sposób, że pierwsze wyrazy ciągów były wartościami średnimi wyznaczonymi na podstawie informacji z dwóch pól przepływu, a ostatnie wyrazy wyznaczono z użyciem wszystkich 250 pól przepływu. Następnie odniesiono wszystkie wyrazy w danym ciągu do wyrazu ostatniego poprzez obliczenie ciągu ich różnic. Rezultaty tych obliczeń obrazuje rysunek 3. Wynika z niego, że dla wybranego punktu pomiarowego średnie wartości prędkości i ich odchylenia standardowe stosunkowo szybko przestają wykazywać istotną zmienność. W szczególności zbieżność prędkości średniej na poziomie 0,02 m/s uzyskuje się już dla ok. 40 pól przepływu.



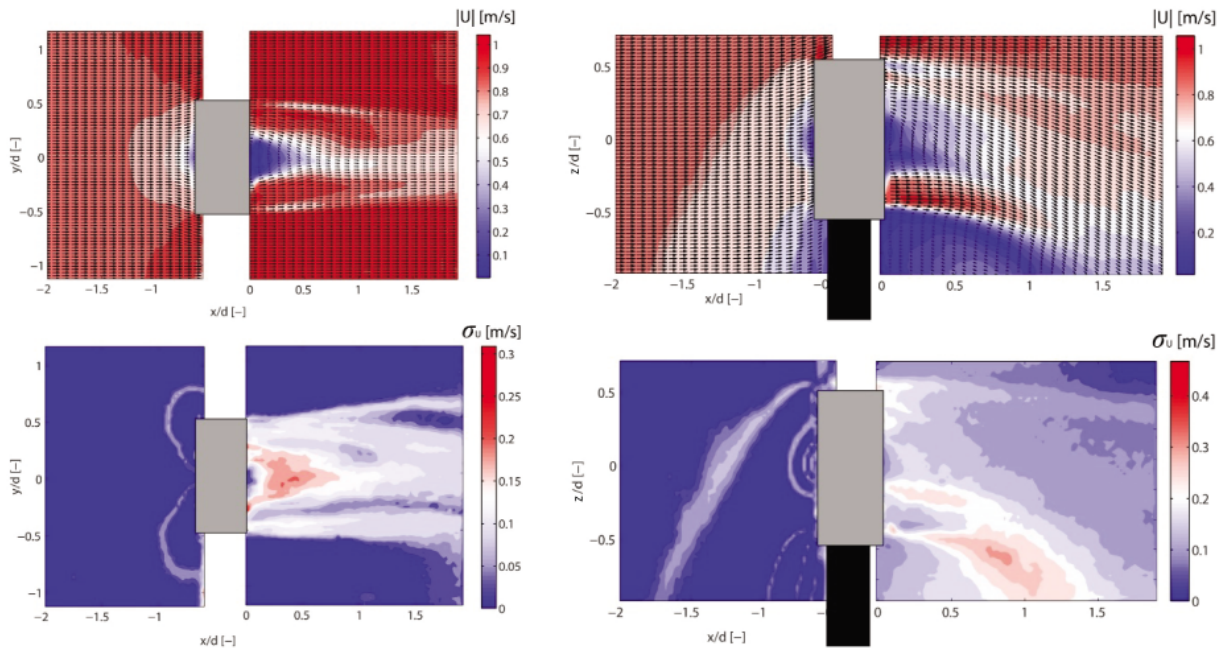
Rys. 3. Zależność wyliczonych składowych prędkości od ilości zdjęć uwzględnianych przy uśrednianiu oraz odchylenia standardowe

Na rysunku 4 przedstawiono dwuwymiarowe pola prędkości chwilowej  $|U|$ , a na rysunku 5 – prędkości średniej  $|\bar{U}|$  przy prędkości napływu na anemometr  $U_\infty$  wynoszącej 1 m/s, w dwóch prostokątnych płaszczyznach XY i XZ. Wartości współrzędnych zostały unormowane do średnicy anemometru skrzydełkowego  $D = 100$  mm. W celu scharakteryzowania fluktuacji przepływu obliczono odchylenie standardowe  $\sigma_u$  prędkości (rys. 5).



Rys. 4. Chwilowe pola prędkości w płaszczyznach XY (z lewej) i XZ (z prawej). Wyniki pomiarów dla  $U_\infty = 1$  m/s

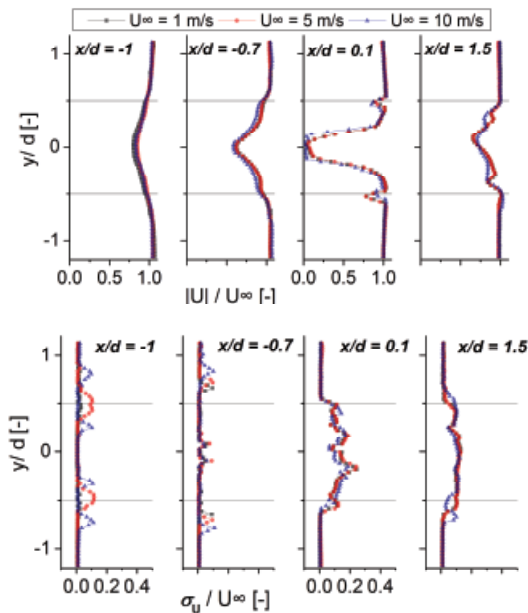
Z wykresów można wnioskować, że za sondą anemometru skrzydełkowego występują obszary znacznego spadku prędkości. Jest to szczególnie widoczne w śladzie czaszy. Tam również poziom współczynnika turbulencji sięga 500%. W płaszczyźnie XZ widać silny wpływ uchwytu anemometru na przepływ powietrza. Uchwyt sondy powoduje zmniejszenie modułu prędkości, przy jednoczesnym zwiększeniu udziału składowej



Rys. 5. Uśrednione pola prędkości (na górze) oraz ich odchylenia standardowe (na dole) w płaszczyznach XY (z lewej) i XZ (z prawej). Wyniki pomiarów dla  $U_\infty = 1$  m/s

$V_z$  oraz wzrost zakłóceń przepływu. Można zauważyć strefę recyrkulacji przepływu za uchwytem. Uwaga ta nabiera szczególnego znaczenia w przypadku gdy za sondą anemometru umieszczane zostają inne czujniki. Niezależnie od typu montowanych czujników zaburzenie przepływu może powodować ich niewłaściwe wskazania.

Zakłócenie przepływu występuje również w obszarze przed anemometrem. Choć jego wpływ gwałtownie maleje wraz z odległością, to łatwo go zauważyć w odległości 150 mm od krawędzi anemometru.

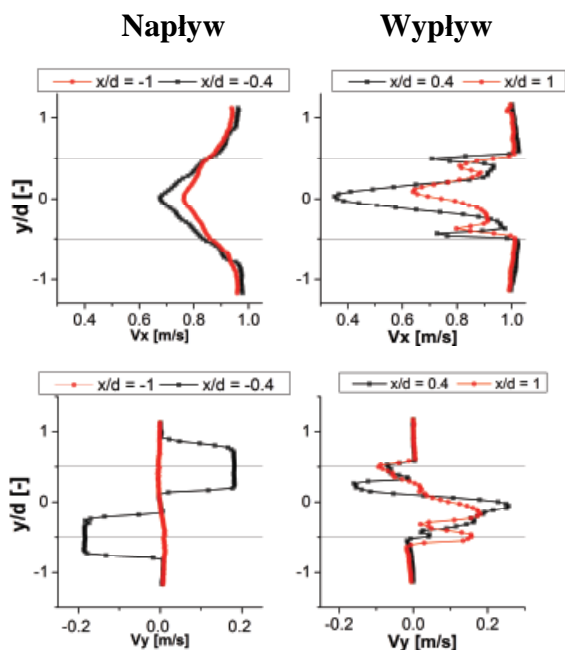


Rys. 6. Znormalizowane profile prędkości (u góry) i odchylenia standardowego (u dołu) w płaszczyźnie XY. Wyniki pomiarów dla  $U_\infty = 1$  m/s,  $U_\infty = 5$  m/s,  $U_\infty = 10$  m/s

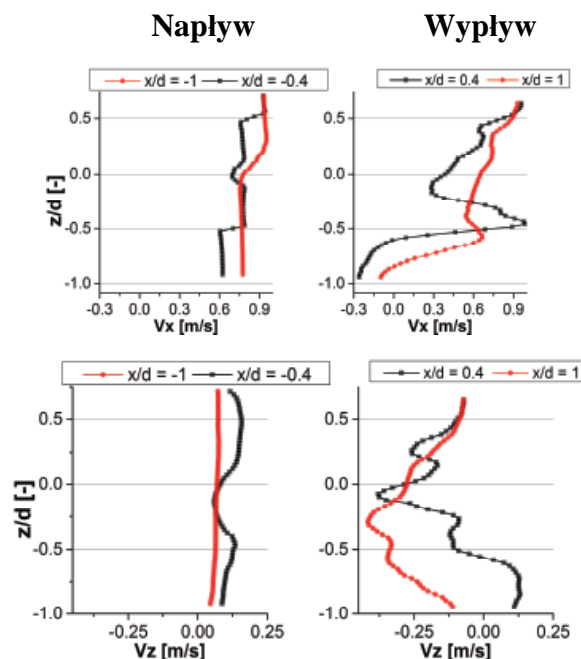
W celu lepszego zrozumienia zaburzenia przepływu wywołanego obecnością anemometru skrzydełkowego na rysunku 6 porównano charakter przepływu w jego otoczeniu dla różnych prędkości napływu (1, 5 i 10 m/s) korzystając ze znormalizowanych profili prędkości i ich odchyłeń standardowych, zmierzonych w płaszczyźnie XY.

Na rysunkach 7 i 8 zaprezentowano przykładowe profile składowych prędkości wyznaczone dla obydwu zmierzonych płaszczyzn. Jakościowo i ilościowo obrazują one pewne aspekty analizowanego przepływu. W szczególności wynika z nich np., że 100 mm przed środkiem czaszy od strony napływu składowa prędkości  $V_x$  obniża swoją wartość o ok. 25%.

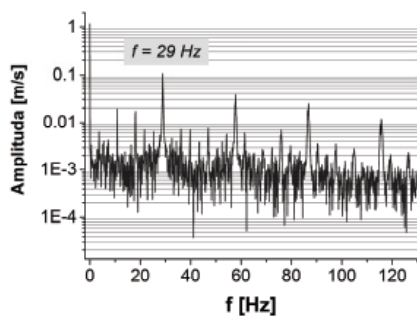
Czasowa analiza struktury przepływu za anemometrem skrzydełkowym została wykonana z wykorzystaniem termoanemometru. Uzyskane sygnały były analizowane za pomocą szybkiej transformaty Fouriera (FFT) i zostały przedstawione, w dziedzinie częstotliwości, na rysunku 9. Zaprezentowano tu wyniki dla punktu pomiarowego  $P(x/D = 0,15, y/D = 0,25, z/D = 0)$ . Punkt ten położony jest w śladzie za łopatkami wirnika. Widoczne na rysunku 9 wyraźne piki w widmie częstotliwościowym odpowiadają wprost częstotliwości obrotu łopatek wirnika. Zauważyć można również częstotliwości harmoniczne, których obecność jest typowa w tego typu zjawisku.



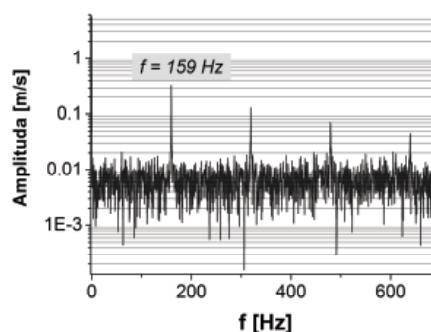
Rys. 7. Profile znormalizowanych składowych wektora prędkości w płaszczyźnie XY. Wyniki pomiarów dla  $U_\infty = 1$  m/s



Rys. 8. Profile znormalizowanych składowych wektora prędkości w płaszczyźnie XZ. Wyniki pomiarów dla  $U_\infty = 1$  m/s



Rys. 9. Unormowana transformata Fouriera sygnału zmierzonego w obszarze wirnika. Wyniki pomiarów dla  $U_\infty = 1$  m/s,  $U_\infty = 5$  m/s



#### 4. Podsumowanie

Obecność anemometru skrzydełkowego zaburza strukturę przepływu przed nim, a znacznie silniej za nim. Indukowane zaburzenie ma złożoną strukturę, wyróżnia się obszary o niskiej, średniej i wysokiej intensywności turbulencji. Przestrzenne zaburzenia pola przepływu przedstawione na rysunkach 4 i 5 wykazują, że zwłaszcza w śladzie czaszy i wspornika można znaleźć obszary prędkości zredukowanej nawet do 50%, co ma miejsce jeszcze w odległości 200 mm za anemometrem. Ponadto silne zaburzenie przepływu wprowadza uchwyt anemometru. Analiza przebiegów czasowych dowodzi obecności pulsacji prędkości oraz struktur turbulentnych. Wyznaczono charakterystyczne częstotliwości związane z ruchem łopatek anemometru.

Wyniki przeprowadzonych badań mogą być wykorzystywane do optymalizacji wzajemnego położenia anemometru skrzydełkowego oraz innych czujników umieszczonych w przepływie. Spostrzeżenie to ma istotne znaczenie w systemach wentylacji przemysłowych, takich jak np. wyrobiska górnicze. W rzeczywistości położenie dodatkowych czujników dowolnego typu (zwłaszcza o dużej częstotliwości rejestracji) powinno być zaprojektowane dokładnie w miejscu niezakłóconego przepływu.

Praca została wykonana w roku 2014 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## Literatura

1. Sauer H.J., Howell R.H. 1990. *Airflow measurement at coal faces with vane anemometers – statistical correlation and recommended field measurement procedure*. ASHRAE Transactions, 96, part I.
2. Hardcastle S.G., Grenier M.G., Butler K.C., 1991. *Electronic vane anemometry. Finding a suitable replacement of mechanical analog devices for mine airflow assessment*. Proceedings of the 5<sup>th</sup> US Mine Ventilation Symposium, Chapter 60.1
3. Chmiel W., Kruczkowski J., 2005. *Badania wpływu zaburzeń profilu prędkości powietrza na pomiary anemometrami stacjonarnymi różnych typów*. Prace IMG PAN, Vol. 7, No. 1-2, s. 117-128.
4. Gawor M., 2003. *Zaburzenie przepływu wywołane obecnością sondy anemometru skrzydełkowego*. Mechanizacja i automatyzacja górnictwa, nr 12, p. 9-14.
5. Mejia-Alvarez R., Christensen K.T., 2013. *Robust suppression of background reflections in PIV images*. Meas. Sci. Technol. 24, 027003.
6. Ligeza P., 2008. *Construction and experimental testing of the constant-bandwidth constant-temperature anemometer*. Review of Scientific Instruments, 79, No. 9, p. 096105-096105-3.

### Analysis of the flow field in the vicinity of a vane anemometer

#### Abstract

The disturbance of velocity field in the wake of a vane anemometer was investigated. Experimental research was conducted in a wind tunnel with a closed loop. For the measurement process, Particle Image Velocimetry method was used to visualize the flow structure and evaluate the instantaneous, two-dimensional velocity vector fields. Instantaneous, ensemble averaged velocity distributions and root-mean-square velocity fluctuations were determined. In order to investigate velocity fluctuations in the wake of vane anemometer with high temporal resolution hot-wire anemometry technique was used. Frequency analysis by means of Fourier transform was carried out. The obtained results give evidence to a significant flow disturbance in the vicinity of analyzed instrument.

**Keywords:** particle image velocimetry, vane anemometr, wind tunel, flow around anemometric sensors