

# Zastosowanie cyfrowej anemometrii obrazowej w badaniach górniczych przyrządów pomiarowych przepływów gazów

## Application of the Particle Image Velocimetry in the examination of the gas flow mining measuring devices



*Dr Jacek Sobczyk\**



*Dr hab. Marek Gawor, prof. IMG PAN\**

**Treść:** Tematyka artykułu jest związana z analizą zaburzeń pól prędkości, jakie wytwarzają wokół siebie anemometry różnych rodzajów. Wstępne prace o charakterze eksperymentalnym wykonano na nowo powstałym w IMG PAN stanowisku pomiarowym do bezinwazyjnych pomiarów pól prędkości. Składa się ono z tunelu aerodynamicznego z obiegiem zamkniętym, skonstruowanego i wykonanego w sposób optymalny do prowadzenia na nim pomiarów z udziałem optycznych metod pomiarowych. Stanowisko wyposażono w zestaw pomiarowy do metody StereoPIV. Do analizy wytypowano dwa anemometry wykonywane w IMG PAN – anemometr skrzydełkowy i termooanemometr jednowłóknowy. Przeprowadzone pomiary wykazały obecność stosunkowo silnych zaburzeń przepływu w śladzie głowic oraz nieco słabszych, ale łatwo zauważalnych w pozostałych kierunkach. Zaprezentowane wyniki badań mogą posłużyć do optymalizacji budowy tych urządzeń, jak również do optymalizacji konfiguracji przestrzennych złożonych systemów pomiarowych, budowanych w oparciu o te anemometry.

**Abstract:** The subject of the presented paper is the analysis of flow fields disturbances induced by anemometers of various types. Preliminary experimental work was done on a new experimental stand built in SMRI PAS, dedicated to non-invasive measurements of velocity fields. It is mainly composed of a closed circuit wind tunnel, designed and built especially for the use with various optical measurement methods. The stand comprises also StereoPIV method equipment. Two anemometers built in SMRI PAS were chosen for the analysis – vane anemometer and single-wire hot-wire anemometer. The conducted research demonstrated the presence of strong flow disturbances in the wake of both devices and weaker but easily noticeable in the remaining directions. The obtained results, some of which are presented here, may provide an indication for the optimization of the devices as well as for optimization of the spatial configurations of measurement systems built with the use of these anemometers.

### **Słowa kluczowe:**

*tunel aerodynamiczny, cyfrowa anemometria obrazowa, anemometr skrzydełkowy, termooanemometr, zaburzenie pola prędkości*

### **Key words:**

*wind tunnel, particle image velocimetry (PIV), vane anemometer, hot-wire anemometer, flow field disturbance*

## **1. Wprowadzenie**

Ciągłe pomiary parametrów powietrza przepływającego przez wyrobiska są warunkiem koniecznym do prowadzenia prac pod ziemią. Lokalny i globalny monitoring składu i strumienia objętościowego płynącego powietrza służy do optymalizacji pracy sieci wentylacyjnej poprzez obniżanie poziomu zagrożeń gazowych i podnoszenie komfortu pracy górników – z jednej strony oraz redukcji kosztów wynikających z nadmiernego przewietrzania niektórych wyrobisk – z drugiej.

Niezwykle istotne jest prawidłowe działanie systemu monitoringu parametrów atmosfery kopalnianej w sytuacjach awaryjnych, takich jak wydzielenie się znacznych ilości gazów trujących lub/i palnych, zwłaszcza w połączeniu z wyrzutem gazów i skał, wybuchem metanu i pożarem. Modyfikacja rozpyływu powietrza w sieci wentylacyjnej, która będzie wykonana na podstawie wskazań tego systemu ma bezpośrednie przełożenie na stan bezpieczeństwa ludzi znajdujących się w rejonie objętym zdarzeniem.

Prawidłowe działanie opiera się na założeniu, że prowadzone pomiary są rzetelne i dokładne, a ich wyniki są na bieżąco i właściwie interpretowane. Niestety, powszechnie wiadomo, że z różnych przyczyn założenie to nie zawsze jest spełnione. Co więcej, występująca co roku liczba niebezpiecz-

\* Instytut Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie

nych zdarzeń wynikających głównie z aktywności gazowej górotworu, naruszonego eksploatacją górniczą wskazuje, że ciągle mamy niewystarczający poziom wiedzy w tym zakresie. Dlatego w jednostkach naukowych kontynuowane są prace m.in. w zakresie doskonalenia metod i przyrządów pomiarowych przepływu powietrza i gazów.

Wysoki poziom zaawansowania technicznego stosowanych przyrządów pomiarowych oraz specyficzne warunki kopalniane wymagają zaangażowania w prace rozwojowe najnowocześniejszych narzędzi badawczych. W 2013 roku w Instytucie Mechaniki Górotworu PAN został zbudowany specjalny tunel aerodynamiczny o unikalnych w skali Europy właściwościach metrologicznych. Wraz z towarzyszącymi mu urządzeniami do optycznych (zdalnych, nie zaburzających) pomiarów przepływów tworzy on stanowisko badawcze, którego możliwości techniczne doskonale predysponują go m.in. do tego typu działań.

Stanowisko to ciągle znajduje się w fazie testów, poznawania i dostosowywania, jednak pewne prace badawcze zostały już na nim przeprowadzone. Zaliczają się do nich pomiary zaburzeń pola prędkości w otoczeniu anemometrów.

Wiadomo, że urządzenia pomiarowe, a w szczególności anemometry rzadko pracują w idealnych warunkach. Dlatego podczas prac udoskonalających często analizuje się ich zachowanie w sytuacji, gdy napływ powietrza jest w jakimś stopniu zaburzony. Prowadzi to zwykle do modernizacji urządzenia, głównie w zakresie konstrukcji mechanicznej, np. poprzez dodanie elementów kompensujących oraz zmianę oprogramowania analizującego dane pomiarowe. Obok wzorcowania, jest to typowy cel prac badawczych z wykorzystaniem tunelu aerodynamicznego.

Wyniki pomiarów są przykładem podejścia w zasadzie odwrotnego. Analizie poddano zaburzenia pól prędkości powodowane poprzez samą obecność czujników anemometrycznych w przepływie. Problem zilustrowano na przykładzie anemometru skrzydełkowego [1] oraz termooanemometru stałotemperaturowego wykonanych w IMG PAN.

Zagadnienie to pomijane we współczesnej literaturze, wobec dostępności takich technik pomiarowych, jak np. cyfrowa anemometria obrazowa (ang. *Particle Image Velocimetry* – PIV), nabiera nowego znaczenia. Analiza zaburzeń pola prędkości płynu wokół czujnika dostarcza bowiem nie tylko przesłanek co do sposobu optymalizacji jego kształtu i sposobu działania, ale również określa strefę bezpośredniego wpływu zaburzenia, które on powoduje. Wiedza ta jest niezbędna np.

w sytuacji, gdy chcemy używać kilka czujników tego samego lub różnych typów obok siebie. Ich konfiguracja przestrzenna, włączając w to uchwyty, powinna być przedmiotem ścisłej analizy w celu minimalizacji wzajemnego wpływu, a więc i fałszowania wskazań.

## 2. Stanowisko badawcze

### 2.1. Tunel aerodynamiczny

Głównym elementem stanowiska badawczego był tunel aerodynamiczny o wymiarach 9,78x4,08x2,34 m (rys. 1) z poziomym, zamkniętym obiegiem powietrza. Został on zaprojektowany [2] i wykonany w sposób umożliwiający prowadzenie badań z wykorzystaniem optycznych technik pomiarowych. Tunel charakteryzuje konstrukcja modułowa, pozwalająca m.in. na łatwe zmiany jego konfiguracji w celu dostosowania do wymogów eksperymentu.

Komora pomiarowa tunelu w użytej konfiguracji miała wymiary 0,5x0,5x1,5 m. Podstawowe parametry strumienia powietrza w jej wnętrzu<sup>1</sup> to:

- prędkość: od 0,1 m/s do 62 m/s,
- różnica prędkości w przekroju: poniżej 1%,
- intensywność turbulencji<sup>2</sup> < 0,5%,
- stabilna i regulowana temperatura i wilgotność względna,
- ciśnienie statyczne zbliżone do ciśnienia atmosferycznego.

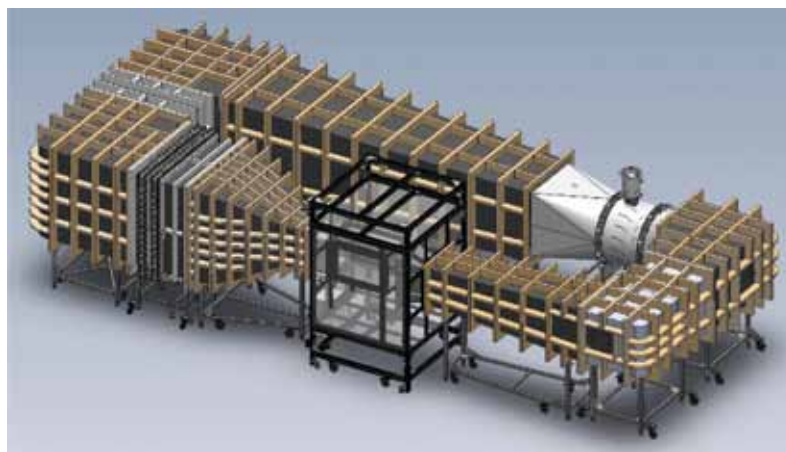
Tunel wyposażony był w system pomiarowo-kontrolny, w skład którego wchodziły m.in. czujniki, takie jak: termometry, barometry, manometry, higrometry, rurki Pitota, anemometr Schmidta, termooanemometry i anemometry z falą cieplną. Wskazania czujników były rejestrowane w trybie ciągłym, w sposób umożliwiający łatwą korelację warunków pomiarowych z wynikami prowadzonych eksperymentów.

### 2.2. Zestaw do pomiarów metodą PIV

W skład stanowiska badawczego wchodził również zestaw pomiarowy do metody PIV (rys. 2). Jego zasadnicze elementy to:

<sup>1</sup> W rdzeniu potencjalnym, który zajmuje około 80% przekroju komory pomiarowej i jest zlokalizowany w jej centralnej części.

<sup>2</sup> Mierzona za pomocą termooanemometru jednowłóknowego oraz metodą 2D PIV i wyrażona jako stosunek odchylenia standardowego do wartości średniej prędkości.



Rys. 1. Trójwymiarowa wizualizacja tunelu aerodynamicznego w jednej z możliwych konfiguracji

Fig. 1. 3D visualization of one of possible configurations of the wind tunnel

- dwie kamery z matrycami typu sCMOS o rozdzielczości 5,5 MP, z obiektywami o ogniskowych 50 mm i 180 mm (makro 1:1) oraz pierścieniami dystansowymi,
- laser impulsowy Nd:YAG o energii impulsu 200 mJ przy długości fali 532 nm, wraz z ramieniem optycznym i optyką noża świetlnego,
- synchronizator,
- stacja robocza z oprogramowaniem dedykowanym do pomiarów m.in. metodą PIV oraz do analizy i wstępnej wizualizacji wyników pomiarów.

Metoda ta polega na precyzyjnym wykonywaniu zdjęć interesującego zjawiska w ściśle określonych odstępach czasu, a następnie na ich analizie korelacyjnej. Zwykle zdjęcia wykonuje się parami, przy czym w czasie jednego pomiaru często rejestruje się dziesiątki, a nawet setki takich par. W przypadku pomiarów w płynach dodaje się do nich znacznik<sup>3</sup>, o którym zakłada się, że porusza się tak jak cząsteczki otaczającego go płynu. Dzięki temu wykonane zdjęcia można podzielić na małe obszary, które w wyniku lokalnej analizy korelacyjnej dostarczają informacji o wektorowych polach przemieszczeń. Po odniesieniu każdego przemieszczenia do znanego odstęp czasuowego pomiędzy zdjęciami otrzymuje się chwilowe wektorowe pola prędkości. Możliwa jest oczywiście dalsza analiza i wyznaczenie wielkości pochodnych.



Rys. 2. Przygotowanie zestawu PIV do pomiarów  
Fig. 2. Setup of the PIV measurement set

### 3. Materiał badawczy

Do pomiarów wybrano dwa anemometry wykonywane w IMG PAN: anemometr skrzydełkowy  $\mu$ AS4 i termooanemometr stałotemperaturowy. Anemometr skrzydełkowy  $\mu$ AS4 (rys. 3) jest używany w zakładach górniczych do doraźnych pomiarów w ruchu<sup>4</sup>, w tym do wyznaczania średniej prędkości powietrza w przekroju wyrobiska oraz sprawdzania wskazań anemometrów stacjonarnych. Ta czynność o charakterze również serwisowym, jak wspomniano we wstępie, może dawać zafałszowane wyniki ze względu na fakt oddziaływania obu przyrządów na siebie [3]. Charakterystyczne cechy

anemometru  $\mu$ AS4 z punktu widzenia pomiarów zaburzenia przepływu w jego otoczeniu to:

- zakres pomiaru prędkości:  $0,20 \div 20,00$  m/s,
- minimalna prędkość mierzona:  $0,17 \pm 0,01$  m/s,
- średnica głowicy pomiarowej: 100 mm,
- wymiary: 289x60x100 mm.



Rys. 3. Anemometr skrzydełkowy  $\mu$ AS4  
Fig. 3. Vane anemometer  $\mu$ AS4

Termooanemometry są urządzeniami wykorzystywanymi przede wszystkim w pracy laboratoryjnej [4]. Ich najważniejszą cechą jest duża szybkość pomiaru, którą często wyraża się w jednostkach częstotliwości, tj. liczbą pomiarów na sekundę. Graniczne wartości tej wielkości zależą od typu anemometru i sposobu jego wykonania, ale w większości przypadków sięgają one kilkunastu, kilkudziesięciu tysięcy Hertzów. Do niedawna w warunkach dołowych wykorzystywane były sporadycznie ze względu na występujące tam zanieczyszczenie powietrza. Wskazania termooanemometrów są wrażliwe na zmiany wilgotności, temperatury i składu mieszanki gazowej. Dłuższa praca w zapyłonym powietrzu może trwale zmienić charakterystykę czujnika.

Mimo wymienionych niedogodności anemometry te coraz częściej wykorzystuje się w badaniach in situ. Zarówno w wersji jedno- (1V), jak i trójwłóknowej (3V) służą m.in. do weryfikacji wskazań innych urządzeń pomiarowych oraz wyników obliczeń numerycznych. Niewielkie wymiary czujnika oraz możliwość pomiaru wektora prędkości (czujnikiem 3V) w niemal dowolnie wybranym punkcie (np. tuż przy ociosie) rekomendują znaczną niepewność pomiaru<sup>5</sup> tej metody w warunkach dołowych.

Do analizy metodą PIV wybrano termooanemometr stałotemperaturowy w wersji 1V (rys. 4). Układ pomiarowy wykorzystujący ten czujnik składa się z kilku elektronicznych elementów o dużych rozmiarach (w porównaniu z czujnikiem), w tym komputera, ale nie wpływają one na przepływ gazu w sąsiedztwie czujnika. Elementem czułym na przepływ był w tym przypadku drut wolframowy o średnicy 8 mm i długości 2 mm, zamocowany na końcach wsporników o średnicy 0,4-0,7 mm i długości 30 mm. Ze względu na dużą dysproporcję w skali wielkości elementów składowych czujnika (średnica drutu : długość wsporników : długość czujnika) skupiono się na zaburzeniu przepływu w sąsiedztwie elementu czynnego czujnika, czyli drutu oporowego.

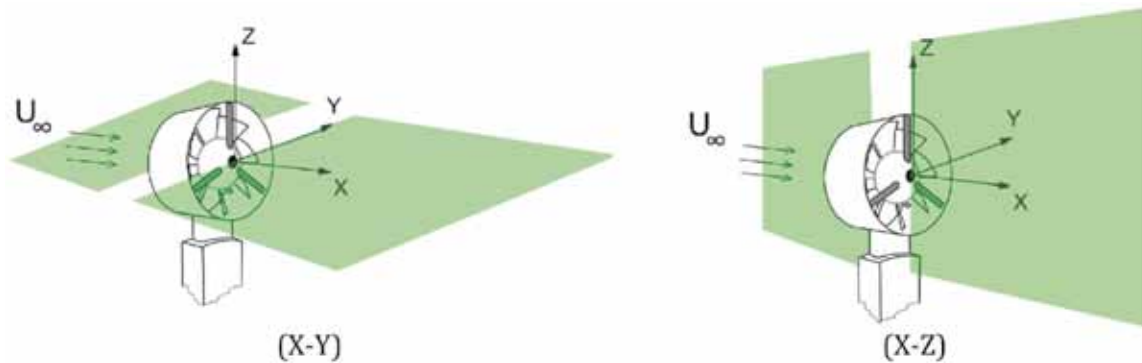


Rys. 4. Czujnik termooanemometryczny jednowłóknowy  
Fig. 4. Single-wire hot-wire anemometer

<sup>3</sup> W gazach jest to najczęściej powietrzna zawiesina olejowa, gdzie rozmiary kropelek oleju wynoszą ok. 1 mm.

<sup>4</sup> Ponadto w celach naukowych pracownia IMG PAN wykorzystuje go do precyzyjnych pomiarów strumienia powietrza w wybranych wyrobiskach. Przeważnie stosują wtedy zestaw kilku anemometrów zamocowanych w jednej płaszczyźnie i pracujących synchronicznie. Ich praca jest kontrolowana w sposób bezprzewodowy przez komputer przenośny.

<sup>5</sup> Jeśli razem z pomiarami prędkości wykonywano pomiary temperatury, wilgotności względnej i/lub składu mieszanki gazowej, to niepewność tę można zmniejszyć *post factum*, przy jednoczesnej korekcie wskazań termooanemometru.



Rys. 5. Wybrane płaszczyzny pomiarowe  
Fig. 5. Selected measurement planes

## 4. Wyniki pomiarów

### 4.1. Anemometr skrzydełkowy $\mu$ AS4

Analizie poddano głowicę anemometru oraz początkowy fragment uchwyty [1]. Wektorowe pola prędkości wyznaczano w wielu płaszczyznach poziomych (X-Y) i pionowych (X-Z) i dla wielu prędkości napływu. Pozwoliło to zgromadzić ogromną liczbę informacji o przepływie wokół i poprzez anemometr. Tu zostaną zaprezentowane dwa najbardziej charakterystyczne, wzajemnie prostopadłe pola pomiarowe leżące na osi symetrii wirnika (rys. 5).

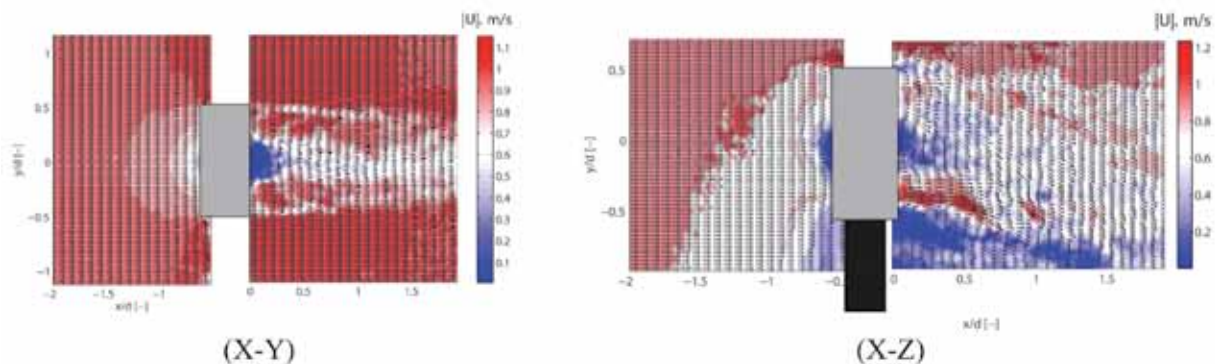
Na rys. 6 znajdują się chwilowe pola prędkości zmierzone wokół anemometru dla prędkości napływu  $U_\infty = 1$  m/s. Wartości współrzędnych zostały unormowane do średnicy anemometru skrzydełkowego  $d = 100$  mm. Wykresy te dają wyobrażenie na temat intensywności zaburzeń przepływu w bezpośrednim otoczeniu analizowanego przyrządu pomiarowego.

Informacja o przeszkodzie z obracającym się elementem rozchodzi się nie tylko daleko w śladzie anemometru, ale również w nieco mniejszym zakresie w kierunku przeciwnym. Widać ponadto, że duży przyczynik do zaburzenia przepływu wprowadza uchwyt anemometru. Poprzez lokalne wyhamowanie napływu oraz strefę recyrkulacji w śladzie obecność uchwyty wpływa na pracę wirnika, co musi być kompensowane podczas wzorcowania anemometru. Łatwo przewidzieć, że trzymanie takiego urządzenia w dłoni, zwłaszcza zbyt blisko głowicy pomiarowej może, poprzez wprowadzenia dodatkowego zaburzenia przepływu w jej sąsiedztwie, wpływać na wskazania anemometru. Dlatego podczas pomiarów wymagających dużej precyzji należy stosować specjalne wysięgniki, które minimalizują wspomniany efekt.

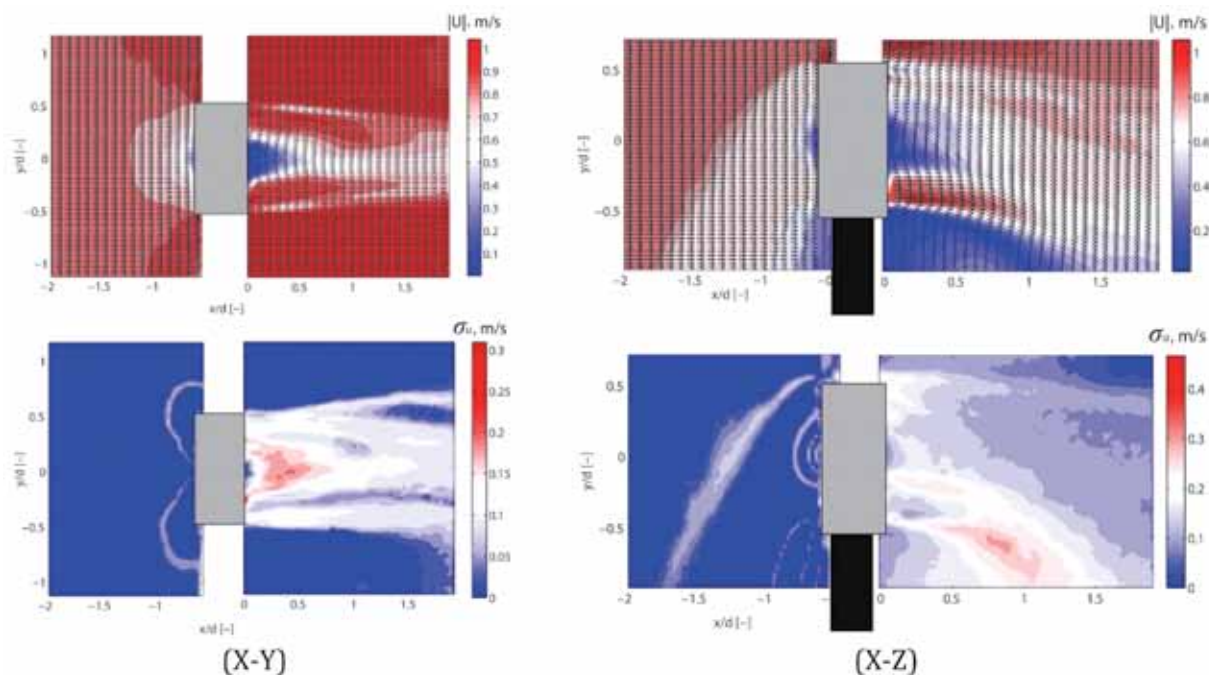
Pełniejszy obraz zaburzenia wywołanego umieszczeniem  $\mu$ AS4 w przepływie powietrza otrzymać można poprzez uśrednienie informacji o chwilowych polach prędkości z wielu pomiarów oraz wyrażenie ich zmienności za pomocą np. odchylenia standardowego (rys. 7). Należy dodać, że przygotowując wykresy z rys. 6 i 7, usunięto wiele szczegółów, aby zachować czytelność przy reprodukcji w pomniejszeniu. Pełna informacja to ok. 63 000 wektorów na każdym wykresie. Dlatego pomiary metodą PIV dają niespotykaną dotychczas możliwość wnikliwej analizy pól prędkości zarówno w dziedzinie czasu, jak i przestrzeni.

Wykresy w płaszczyźnie X-Y wskazują na symetrię przepływu w tej płaszczyźnie<sup>6</sup>. Nie jest to zaskoczeniem, ponieważ podczas wykonywania tych pomiarów nóż świetlny przecinał (idąc od środka): czasę, ruchome łopatki wirnika i obudowę głowicy pomiarowej – wszystkie elementy są symetryczne w tym przekroju. Na górnym wykresie z rys. 7 widać jak średnio spowalnia przepływ obecność każdego z wymienionych składników głowicy anemometru. Wykres dolny niesie informacje o zmienności przepływu w czasie, a więc o dynamice zaburzenia. Po stronie napływu widać dwa obszary stosunkowo intensywnych zaburzeń związanych z niestacjonarnym opływem przeszkody z ruchomym elementem. Po stronie cienia aerodynamicznego najintensywniejsze zaburzenia wytwarzają się przy krawędziach czaszy, w strefie zmiany kształtu łopatek wirnika. Potencjalna optymalizacja budowy głowicy mogłaby dotyczyć właśnie tego obszaru.

<sup>6</sup> Niewielka asymetryczna komponenta wynika z małego odchylenia osi wirnika od osi tunelu aerodynamicznego. Celem badań było poznanie zaburzenia pola prędkości wokół przyrządu pomiarowego w sytuacji rzeczywistej, a nie zarejestrowanie idealnie symetrycznego opływu.



Rys. 6. Chwilowe pola prędkości zmierzone wokół anemometru skrzydełkowego dla prędkości napływu  $U_\infty = 1$  m/s  
Fig. 6. Transient velocity fields measured in the vicinity of the vane anemometer for the velocity of inflow  $U_\infty = 1$  m/s



**Rys. 7. Uśrednione pola prędkości (na górze) oraz ich odchylenia standardowe (na dole) dla prędkości napływu  $U_{\infty} = 1$  m/s**  
**Fig. 7. Mean velocity fields (up) and their standard deviations (down) for the velocity of inflow  $U_{\infty} = 1$  m/s**

W płaszczyźnie X-Z widać większą złożoność pola prędkości. Wynika to z faktu, że nóż optyczny przecinał tu wszystkie elementy składowe anemometru (idąc od góry): obudowę głowicy, wspornik, czaszę, ruchome łopatki wirnika, obudowę głowicy, uchwyt. Symetrię przepływu w tej płaszczyźnie zaburza nie tylko wspornik mocujący wirnik do obudowy głowicy, ale przede wszystkim uchwyt anemometru. Jego znaczne rozmiary poprzeczne względem analizowanego przekroju powodują silne wyhamowanie przepływu, aż do wytworzenia się obszaru niestacjonarnej cyrkulacji wstecznej włącznie. Powstały wir przyciąga strumień powietrza wypływający z wirnika i odchyła jego początkową trajektorię (na rys. 7 w dół). Zmienność czasowa przepływu jest największa w pasie oddziaływania tych dwóch struktur. Po stronie napływu widocznych jest kilka stref o podwyższonej zmienności. Najodleglejsza dotyczy opływu całego anemometru. Zaczyna się tuż powyżej górnej krawędzi obudowy głowicy i odsuwa się wstecz w miarę posuwania się w kierunku (niewidocznego) drugiego końca uchwytu. Przy dolnej krawędzi obudowy jej odległość wynosi ok. 150 mm. Tutaj optymalizacja mogłaby wiązać się na przykład ze zmniejszeniem średnicy uchwytu w bezpośrednim sąsiedztwie głowicy anemometru.

#### 4.2. Termoanemometr

Analiza opływu czujnika termoanemometrycznego wymaga niezwykle zaawansowanej aparatury i metodyki badawczej. Wynika to z konieczności analizy mikroskopowej wielkości obiektu umieszczonego w makroskopowym przepływie. W celu precyzyjnego przesledzenia przepływu wokół włókna przy prędkości napływu powyżej 1 m/s konieczne jest wykonywanie zdjęć w odstępach czasu poniżej 10 ms<sup>7</sup>.

Zastosowane stanowisko badawcze umożliwiło wykonywanie sekwencji par zdjęć z odstępem czasu na poziomie do

0,5 ms. Częstotliwość sekwencji wynosiła typowo 5-15 Hz. Na rys. 8a przedstawiono schematycznie sposób umieszczenia termoanemometru w przepływie i orientację płaszczyzny pomiarowej (X-Z). Zdjęcie z rys. 8b to przykładowe zdjęcie wykonane podczas pomiarów. Zaprezentowany kadr to 2560x2160 pikseli niosących informacje o najbardziej interesującym obszarze wokół włókna oporowego.

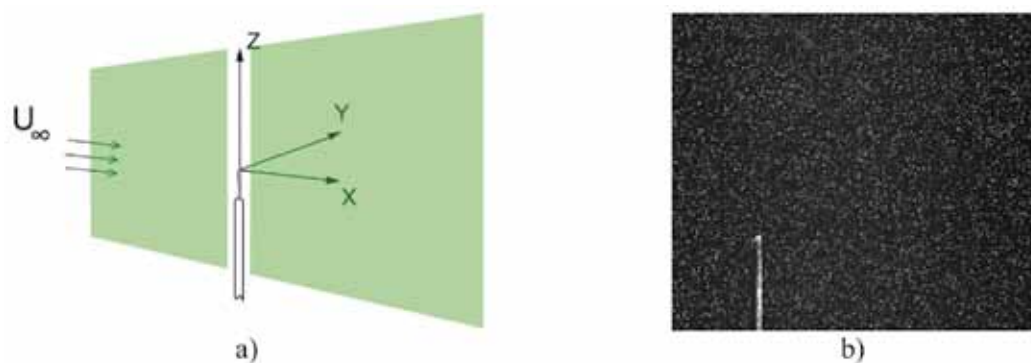
Pomiary opływu czujnika termoanemometrycznego wykonano dla współczynników nagrzania od  $R = 1$  (włókno zimne) do  $R = 2$  (włókno gorące) oraz dla prędkości napływu od  $U_{\infty} = 0,07$  m/s do  $U_{\infty} = 1,00$  m/s. Na rys. 9 widoczne jest porównanie przykładowych obrazów opływu czujnika dla  $R = 1,0$  i  $R = 1,8$  przy prędkości napływu  $U_{\infty} = 0,96$  m/s. Jest ono reprezentatywne dla całego analizowanego zakresu prędkości z zaznaczeniem, że w miarę obniżania prędkości napływu coraz silniej uwidacznia się obecność konwekcji swobodnej w otoczeniu nagrzanego włókna.

Porównanie pól skalarnych składowej  $U$  (rys. 9) wskazuje na pewne różnice, wyrażające się przede wszystkim w wielkości cienia aerodynamicznego za włóknem. Obszar cienia ma tu w przybliżeniu kształt trójkąta równoramiennego. Kąt rozwarcia ramion trójkąta (leżących na wybranych izotachach) jest nieznacznie większy w przypadku włókna grzanego, niż zimnego. Ma to prawdopodobnie związek ze zmianą parametrów termodynamicznych gazu, który podgrzał się, przepływając obok włókna.

Bezpośrednio za włóknem umieszczonym w przepływie formuje się obszar o istotnie obniżonej prędkości. Podobnie, obszar ten za włóknem grzanym jest większy, niż za zimnym. Częściowego wyjaśnienia tego zjawiska dostarczają wykresy składowej  $V$  (rys. 9). Wynika z nich, że włókno grzane stanowi większą przeszkodę dla przepływu, niż włókno zimne. Omywający je gaz jest silniej odpychany w kierunku radialnym (od włókna), niż to ma miejsce w przypadku włókna zimnego.

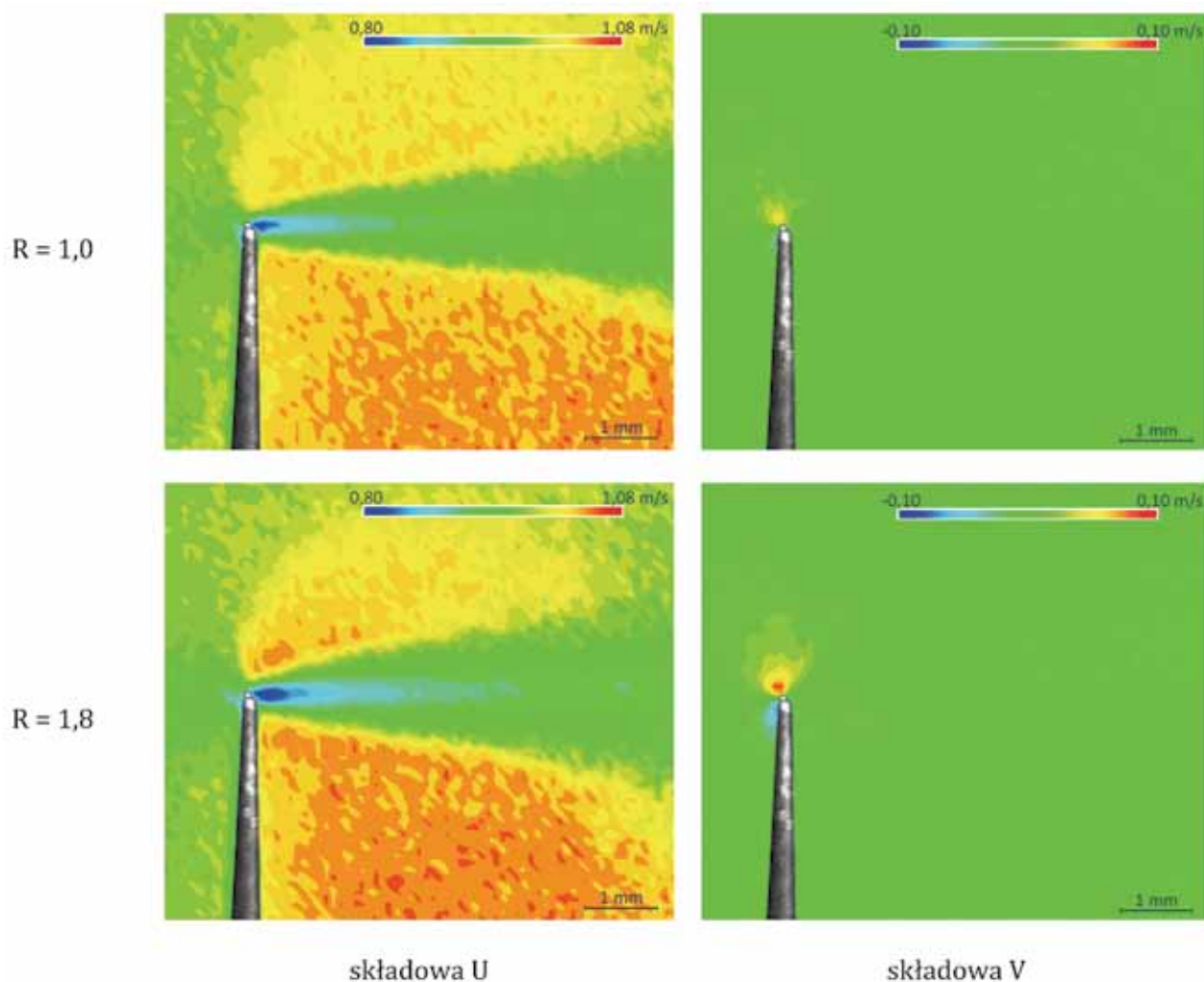
Omówione tu różnice wynoszą od kilku do kilkunastu procent [5]. Ich obecność jest zjawiskiem znanym w literaturze. Jednak zaprezentowany tu na przykładach pełny obraz

<sup>7</sup> Co oznacza, że w przypadku rejestracji ciągłej częstotliwość zdjęć byłaby większa niż 100 kHz.



Rys. 8. Sposób umieszczenia termoanemometru w przepływie powietrza (pomiar wykonano w płaszczyźnie X-Z): rysunek schematyczny – a oraz jedno ze zdjęć wykonanych podczas pomiarów – b. Na zdjęciu widoczna jest górna część wsporników stojących jeden za drugim. Niewielki rozblysk na ich czubku to światło laserowe odbite od włókna

Fig. 8. Position of the hot-wire anemometer in the airflow (measurement was conducted in the X-Z plane): chart (a) and one of pictures taken during the measurements. On the picture one can see the upper part of supports standing one behind the other. Small flare visible on their top is the laser light reflected from the wire



Rys. 9. Pola skalarne prędkości wokół termoanemometru z włóknem zimnym ( $R = 0,0$ ; na górze) i grzanym ( $R = 1,8$ ; na dole) dla prędkości napływu  $U_\infty = 0,96$  m/s, zmierzone w płaszczyźnie X-Z. a – rozkłady składowej poziomej prędkości U (wzdłuż osi X), b – rozkłady składowej pionowej V (wzdłuż osi Z)

Fig. 9. Velocity scalar fields in the vicinity of cold wire ( $R = 0,0$ ; up) and hot wire ( $R = 1,8$ ; down) for the velocity of inflow  $U_\infty = 0,96$  m/s, measured in the X-Z plane. Graphs on the left are distributions of the horizontal coordinate (along X axis), while on the right distributions of the vertical coordinate (along X axis)

przepływu może być punktem wyjścia do nowych badań w dziedzinie termooanemometrii, względnie weryfikacji istniejących poglądów. Niech za przykład posłuży pomiar prędkości w pobliżu obiektu o dowolnym kształcie i rozmiarach, w szczególności pomiar jego warstwy przyściennej. Każdy bezpośredni pomiar czujnikiem anemometrycznym, nawet o tak niewielkich rozmiarach jak termooanemometr, może prowadzić do niejednoznacznych wyników, ponieważ urządzenie to było wzorcowane z dala od jakichkolwiek obiektów. Z rys. 9 widać, że wzajemne oddziaływanie czujnika z innymi obiektami może występować w odległości co najmniej kilku milimetrów od włókna. Przy tej konfiguracji przestrzennej dotyczy to zwłaszcza kierunku równoległego do wsporników. W obszarze cienia odległość ta zwiększa się kilkukrotnie. Oczywiście są to wyniki pomiarów przeprowadzonych w płaszczyźnie przechodzącej przez środek włókna. W innych płaszczyznach obszar zaburzony może być jeszcze większy.

## 5. Uwagi końcowe

Zaburzenie, jakie wprowadza w przepływie prędośny anemometr skrzydełkowy znacznie przekracza rozmiary głowicy pomiarowej w każdym kierunku. Oznacza to w szczególności, że wynik pomiaru zależy od obszaru większego niż tylko krótki, walcowy wycinek strugi, będący przedłużeniem obudowy głowicy anemometru w kierunku napływu. Efekt ten powinien być wzięty pod uwagę, np. podczas pomiarów doraźnych w sąsiedztwie dowolnych przeszkód oraz weryfikacji wskazań anemometrów stacjonarnych zabudowanych w wyrobiskach.

Oddziaływanie termooanemometrycznego włókna oporowego z opływającym go gazem od dawna było przedmiotem dociekań wielu badaczy. W drugiej połowie XX wieku,

kiedy wymyślono inne typy czujników, bardziej odporne na warunki środowiskowe, potrzeba ta stała się mniej pilna. Zadowolono się wtedy m.in. stosunkowo dokładnymi, ale pseudopunktowymi pomiarami pola prędkości wykonanymi z użyciem drugiego termooanemometru. Obecnie, dzięki ogólnemu rozwojowi technicznemu metrologii, a w szczególności rozwojowi metod takich jak PIV stała się możliwa weryfikacja dawnych wyobrażeń. Szersze rozważania w tym zakresie będą tematem osobnej publikacji.

***Pomiary wykonano na stanowisku badawczym sfinansowanym ze środków FNiTP, nr umowy: 682/FNiTP/34/2011.***

## Literatura

1. *Bujalski M., Gawor M., Sobczyk J.*: Flow disturbance due to presence of the vane anemometer, XXI Fluid Mechanics Conference, IOP Publishing, Journal of Physics: Conference Series 530 (2014) 012045 doi:10.1088/1742-6596/530/1/012045.
2. *Bujalski M., Gawor M., Sobczyk J.*: Tunel aerodynamiczny o obiegu zamkniętym, ze stabilizacją temperatury i wilgotności powietrza, przystosowany do pomiarów metodami optycznymi, „Prace Instytutu mechaniki Górotworu PAN” 2013, Vol. 15, No. 1-2, s. 65-74.
3. *Gawor M.*: Zaburzenie przepływu wywołane obecnością sondy anemometru skrzydełkowego. „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa” 2003, Nr 12, s. 9-14.
4. *Ligeza P.*: Compendium of two-state hot-wire anemometer measurement method, SMRI PAS, Krakow 2012.
5. *Poleszczyk E.*: Termooanemometryczna metoda wyznaczania wektora prędkości przepływu gazu, „Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN”, Seria Rozprawy, Monografie, 2002.