

# Pomiar przepływu turbulentnego w modelu skrzyżowania ściany z chodnikiem wentylacyjnym z wykorzystaniem Cyfrowej Anemometrii Obrazowej PIV

MACIEJ BUJALSKI

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

MAREK JASZCZUR

*Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Wydział Energetyki i Paliw, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków*

## Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki analizy eksperymentalnej przepływu powietrza z wykorzystaniem Cyfrowej Anemometrii Obrazowej PIV (ang. *Particle Image Velocimetry*). Przedmiotem badań był przepływ turbulentny w fizycznym, uproszczonym modelu ściany z chodnikiem wentylacyjnym w kształcie litery *T*. Badania obejmowały wyznaczenie chwilowych, trójwymiarowych pól prędkości w sekcji pomiarowej. Na tej podstawie określono podstawowe wielkości charakteryzujące turbulencję: energię kinetyczną turbulencji, intensywność turbulencji, składowe tensora naprężeń Reynoldsa. Wyniki pomiarów zostaną wykorzystane do weryfikacji modeli turbulencji stosowanych do analiz numerycznych powyższego zagadnienia.

**Słowa kluczowe:** Cyfrowa Anemometria Obrazowa PIV, metrologia przepływów turbulentnych

## 1. Wstęp

Problem turbulentnego przepływu gazów w wyrobiskach podziemnych kopalni wydobywczych jest powszechnie analizowany z wykorzystaniem metod obliczeniowej mechaniki płynów. Z uwagi na trudności wynikające z modelowania komputerowego turbulencji zachodzi konieczność falsyfikacji zastosowanego modelu numerycznego na drodze eksperymentalnej (Branny i in., 2013). Podstawowym elementem badań zjawisk przepływowych jest określenie rozkładu pola prędkości, który doświadczalnie wyznaczyć można m. in. z wykorzystaniem techniki Cyfrowej Anemometrii Obrazowej PIV (Raffel i in., 2007).

Metoda PIV zaliczana jest do grupy bezinwazyjnych, optycznych metod pomiarowych (Tropea i in., 2007) i polega na analizie przemieszczeń posiewu – cząstek znacznikowych dodanych do badanego przepływu. Obszar pomiarowy podświetlany jest wąską płaszczyzną świetlną (tzw. nóż świetlny), która jest generowana za pośrednictwem impulsowego lasera Nd:YAG. Cząstki rozpraszają światło laserowe i są widoczne dla światłoczułej matrycy kamery CCD, której chwila wykonywania zdjęć jest zsynchronizowana z pulsami lasera. W rezultacie pomiaru otrzymuje się pary zdjęć zawierające położenie cząstek znacznikowych w przekroju pomiarowym w znanych przedziałach czasu. Wykorzystując metody komputerowej analizy obrazów znajdowane są przemieszczenia cząstek między kolejnymi rejestracjami. Wynikiem pomiaru jest ilościowy rozkład pola prędkości danego przepływu w całym przekroju pomiarowym. Uzyskane dane umożliwiają opracowanie wykresów wektorowych określających wartości poszczególnych składowych wraz z ich zwrotem. Zastosowanie jednej kamery skierowanej w kierunku normalnym względem noża świetlnego pozwala na wyznaczenie dwuwymiarowego pola prędkości (technika 2D PIV). Stanowi to poważne ograniczenie w aspekcie pomiarów przepływów turbulentnych, ponieważ losowe fluktuacje prędkości mają zawsze charakter trójwymiarowy (Elsner i in., 1995). W przypadku, gdy przepływ jest analizowany z wykorzystaniem dwóch

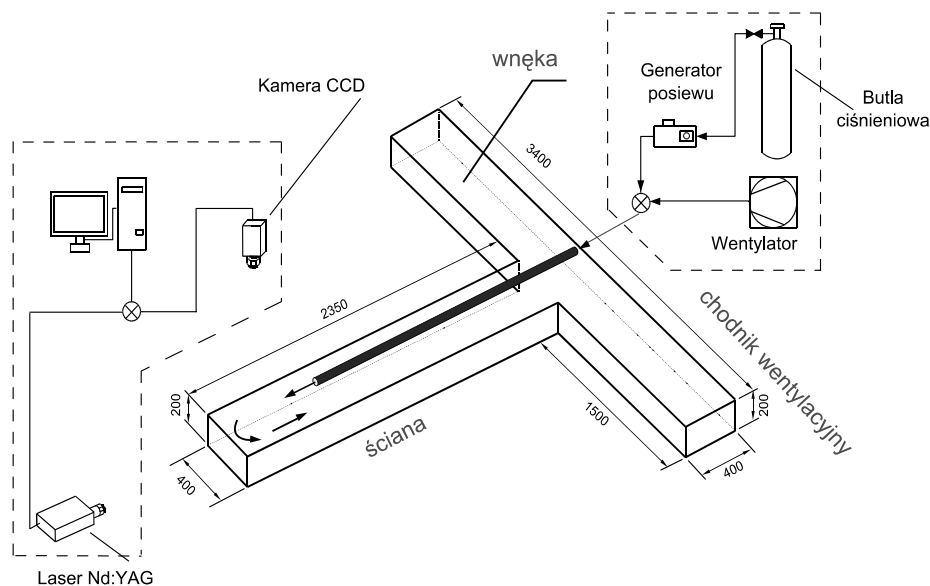
kamer, wówczas możliwe jest zrekonstruowanie pola opisanego przez wszystkie trzy składowe przestrzenne (technika Stereo PIV) (Prasad, 2000).

Cyfrowa Anemometria Obrazowa PIV, w przeciwieństwie do sond ciśnieniowych, czy termoanemometrii pozwala na wizualizację struktury przepływu i ilościowy pomiar prędkości w wielu punktach jednocześnie. Ponadto, metoda jest niemal bez-inwazyjna i nie wiąże się z koniecznością wprowadzenia do badanego obszaru sondy pomiarowej. Jedynym zakłóceniem przepływu jest dodanie do niego posiewu – tak, aby jego ruch był tożsamy z ruchem płynu.

Jaszczur i in. (2011, 2012), Nowak i in. (2013), Szmyd i in. (2013), Branny i in. (2012) analizowali eksperymentalnie przepływ powietrza w laboratoryjnym modelu systemu przewodów wentylacyjnych w podziemnej kopalni wydobywczej, na potrzeby weryfikacji turbulentnych modeli numerycznych. We wskazanych pracach przedmiotem badań z wykorzystaniem Cyfrowej Anemometrii Obrazowej PIV był przepływ, który zachodził we wnęce, powstałej w miejscu skrzyżowania ściany (rozumianej jako miejsce wydobywania) z chodnikiem wentylacyjnym. W niniejszej pracy autorzy podejmują problem analizy eksperymentalnej przepływu w rejonie ściany. Ponadto, analizie został poddany inny sposób przewietrzania wyrobiska kopalni, polegający na zastosowaniu lutni wentylacyjnej (kanału o przekroju kołowym, za pośrednictwem którego przepływa powietrze do wyrobiska ślepego).

## 2. Stanowisko badawcze

Przedmiotem badań eksperymentalnych był przepływ turbulentny, który zachodził w fizycznym modelu układu skrzyżowania ściany z chodnikiem wentylacyjnym w kształcie litery *T*. Badania zrealizowano w laboratorium Katedry Podstawowych Problemów Energetyki, Wydziału Energetyki i Paliw Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie (Jaszczur i in., 2012). Schemat stanowiska przedstawiono na rysunku 1. Fizyczny model kanału został wykonany w skali 1:10 z materiału pleksi, ponieważ zastosowana metoda pomiarowa wymaga, aby ścianki kanału były przezroczyste.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego

Przekrój poprzeczny kanału ma kształt prostokątny o wymiarach  $400 \times 200$  mm. Analizowany płyn – powietrze kierowany był do sekcji pomiarowej za pośrednictwem kanału rurowego o średnicy wewnętrznej 80 mm – zainstalowanego wewnątrz prostokątnego kanału. Przepływ wymuszano za pośrednictwem wentylatora, pracującego w trybie tłoczącym. Powietrze mieszano przed wlotem do rury z cząstkami znacznikowymi typu DEHS (olej) o średnicy ok.  $1 \mu\text{m}$ . Cząstki te, wytwarzane były za pośrednictwem generatora posiewu, do którego kierowano sprężone powietrze z butli ciśnieniowej. Obszar pomiarowy podświetlano impulsowym laserem neodymowym Nd:YAG serii Nano SPIV firmy Litron Lasers. Urządzenie to genero-

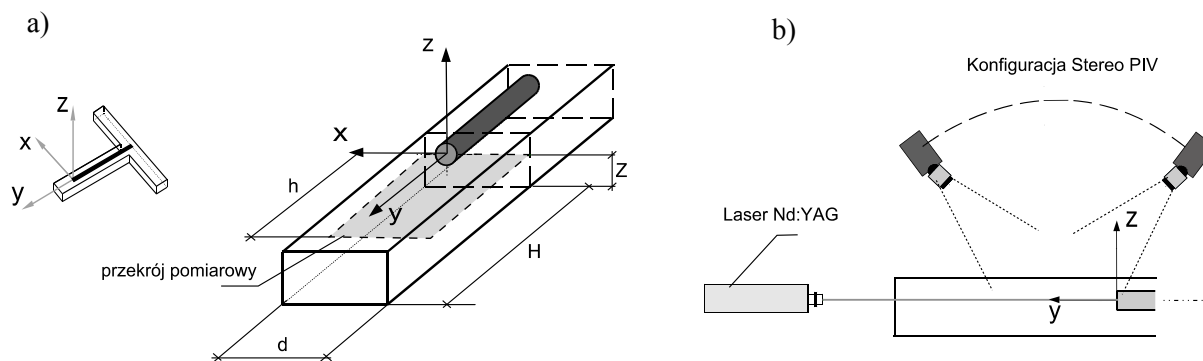
wało wiązkę świetlną o 532 nm (koloru zielonego), o maksymalnej energii pojedynczego pulsu na poziomie ok. 30 mJ. Czas trwania pulsu wynosił 6 ns. Układ optyczny dołączony do lasera, składający się z soczewki o ogniskowej  $f = 10$  mm formował płaszczyznę świetlną (nóż świetlny) o grubości ok. 3 mm.

Ruch cząstek znacznikowych w poszczególnych chwilach czasowych rejestrowano za pośrednictwem dwóch dedykowanych do pomiarów PIV kamer CCD. Kamery te pozwalały na akwizycję 14 bitowych obrazów o rozdzielczości  $2048 \times 2048$  pikseli, z maksymalną szybkością 14 klatek na sekundę. Odstęp czasowy pomiędzy poszczególnymi fotografiami mógł być ustalany w zakresie od 1  $\mu$ s do kilku ms. Kamery były zsynchronizowane z laserem, a dokładniej z jego pulsami i sterowane programowo za pośrednictwem komputera.

## 2.2. Sekcja pomiarowa

Pole prędkości analizowanego przepływu wyznaczano w sekcji pomiarowej, której lokalizację w modelu skrzyżowania ściany z chodnikiem wentylacyjnym przedstawiono na rysunku 2a. Obszar pomiarowy obejmował część kanału prostokątnego, gdzie następował bezpośredni wylot strugi płynu z unoszonym posiewem z kanału rurowego. Wylot rury o średnicy wewnętrznej 80 mm usytuowano w odległości  $H = 750$  mm od końca kanału prostokątnego. Płaszczyzna określająca środek symetrii znajdowała się na wysokości  $Z = 120$  mm od dołu kanału. Przekrój pomiarowy (płaszczyznę wyznaczoną przez nóż świetlny) ustalono podczas trwania eksperymentów wzdłuż kanału prostokątnego – na wysokości osi symetrii kanału rurowego (rys. 2a).

Do badań zastosowano metodę PIV w układzie Stereo PIV. W konfiguracji tej na przekrój pomiarowy skierowane są dwie kamery CCD, nachylone pod znacznym kątem. Rekonstrukcja trójwymiarowego pola prędkości odbywa się na podstawie analizy dwóch odrębnych, dwuwymiarowych pól zarejestrowanych przez dwie kamery (Willert, 1997).



Rys. 2. (a) Lokalizacja przekroju pomiarowego w kanale prostokątnym; (b) usytuowanie lasera i kamer w konfiguracji Stereo PIV względem przekroju pomiarowego

## 3. Metodyka badań eksperymentalnych i sposób wyznaczenia wielkości opisujących turbulentny przepływ

Ruch powietrza z unoszonymi cząstkami posiewu w sekcji pomiarowej rejestrowano w trybie podwójnej klatki, tzn. każdy obraz składał się z dwóch zdjęć sekwencyjnie po sobie wykonanych w określonym odstępie czasu  $\Delta t$ . Do analizy cyfrowych obrazów wykorzystano komercyjne oprogramowanie Davis w wersji 7.2 firmy Lavisision GmbH, stanowiące integralną część całego systemu pomiarowego. Analiza polega na wyznaczeniu przemieszczeń cząstek posiewu między kolejnymi rejestracjami. W tym celu poszczególne zdjęcia dzieli się równomiernie na podobszary – tzw. okna interogacji. Okno na zdjęciu pierwszym posiada pewien rozkład „wzór” rozmieszczenia cząstek, którego odpowiednik na zdjęciu drugim jest poszukiwany metodami korelacji statystycznej. Znając dokładne współrzędne pasujących do siebie struktur oraz czas pomiędzy wykonanymi zdjęciami, obliczane są (indywidualnie w każdym oknie interogacji) wektory prędkości, które uznawane są za prędkość płynu. Proces ten jest skomplikowany i zależy od wielu parametrów obliczeniowych związanych m. in. z rozmiarem okien, rodzajem funkcji korelacji. Foucaut i in. (2004) scharakteryzowali szczegółowo opis działania algorytmów w aspekcie pomiarów przepływów turbulent-

nych. Analizę obrazów zarejestrowanych podczas sesji pomiarowych prowadzono z oknem interogacji na poziomie  $32 \times 32$  pikseli i stopniem wzajemnego nakładania się okien (tzw. overlap) wynoszącym 50% – co odpowiadało rozmiarowi w przestrzeni pomiarowej równemu ok.  $3,6 \times 3,6$  mm. Rozmiar okna interogacji przyjęto tak, aby zawierało się w nim kilkanaście cząstek znacznikowych (Raffel i in., 2007).

Odstęp czasowy  $\Delta t$  uzależniony był od prędkości przepływu i zawierał się w przedziale 100-300  $\mu$ s. Czas  $\Delta t$  dobrany był w taki sposób, aby przemieszczenie cząstek znacznikowych pomiędzy kolejnymi zdjęciami wynosiło około 25% rozmiaru przyjętego okna interogacji. Pozwala to na istotne skrócenie czasu wykonywania obliczeń i zredukowanie liczby błędnie wyznaczonych wektorów prędkości (Raffel i in., 2007).

Dla każdej pary zdjęć poszczególnego obrazu zapisanego w trybie podwójnej klatki wyznaczano chwilowy rozkład pola prędkości. Następnie na tej podstawie obliczano średni rozkład w oparciu o uśrednianie serii  $N$  zarejestrowanych par zdjęć, w trakcie trwania serii pomiarowej. Pomiaru przeprowadzono dla trzech różnych zadanych prędkości na wlocie do sekcji pomiarowej wynoszących  $U_1 = 10$  m/s,  $U_2 = 20$  m/s i  $U_3 = 30$  m/s, co odpowiada liczbie kryterialnej Reynoldsa odpowiednio:  $Re_1 = 43470$ ,  $Re_2 = 90086$  i  $Re_3 = 133825$ . Przyjęto, że przepływ powietrza jest ustalony i izotermiczny. Dla tych warunków z równości liczb Reynoldsa w modelu i obiekcie rzeczywistym wynika warunek podobieństwa uśrednionych pól prędkości (przy założeniu nieściśliwości powietrza).

W celu opisu turbulentnego charakteru badanego przepływu, z poszczególnych składowych wektora prędkości wyodrębniano część fluktuacyjną, zgodnie z hipotezą Reynoldsa, na podstawie zależności (1).

$$u = \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v', \quad w = \bar{w} + w' \quad (1)$$

gdzie (rys. 2):

- $u$  – podłużna składowa wektora prędkości wzdłuż osi  $x$ ;
- $v$  – poprzeczna składowa wektora prędkości wzdłuż osi  $y$ ;
- $w$  – pionowa składowa wektora prędkości wzdłuż osi  $z$ .

Znając fluktuacje prędkości można obliczyć wielkości opisujące przepływ turbulentny, jak składowe tensora naprężeń turbulentnych Reynoldsa. Naprężenia normalne określone są zależnością (2a), zaś styczne (2b). Kolejnymi wielkościami, które opisują turbulentny ruch płynu i określają ilościowo fluktuacje prędkości są energia kinetyczna turbulencji (zależność 3) i intensywność turbulencji (zależność 4).

$$\tau_{xx} = \overline{u'u'}, \quad \tau_{yy} = \overline{v'v'}, \quad \tau_{zz} = \overline{w'w'} \quad (2a)$$

$$\tau_{xy} = \overline{u'v'}, \quad \tau_{xz} = \overline{u'w'}, \quad \tau_{yz} = \overline{v'w'} \quad (2b)$$

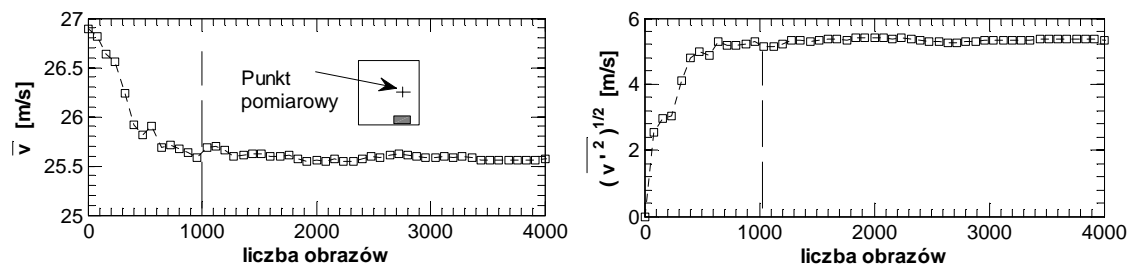
$$k = \frac{1}{2} \left( \overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right) \quad (3)$$

$$I = \frac{\sqrt{\frac{1}{3} \left( \overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right)}}{|\bar{U}|} \quad (4)$$

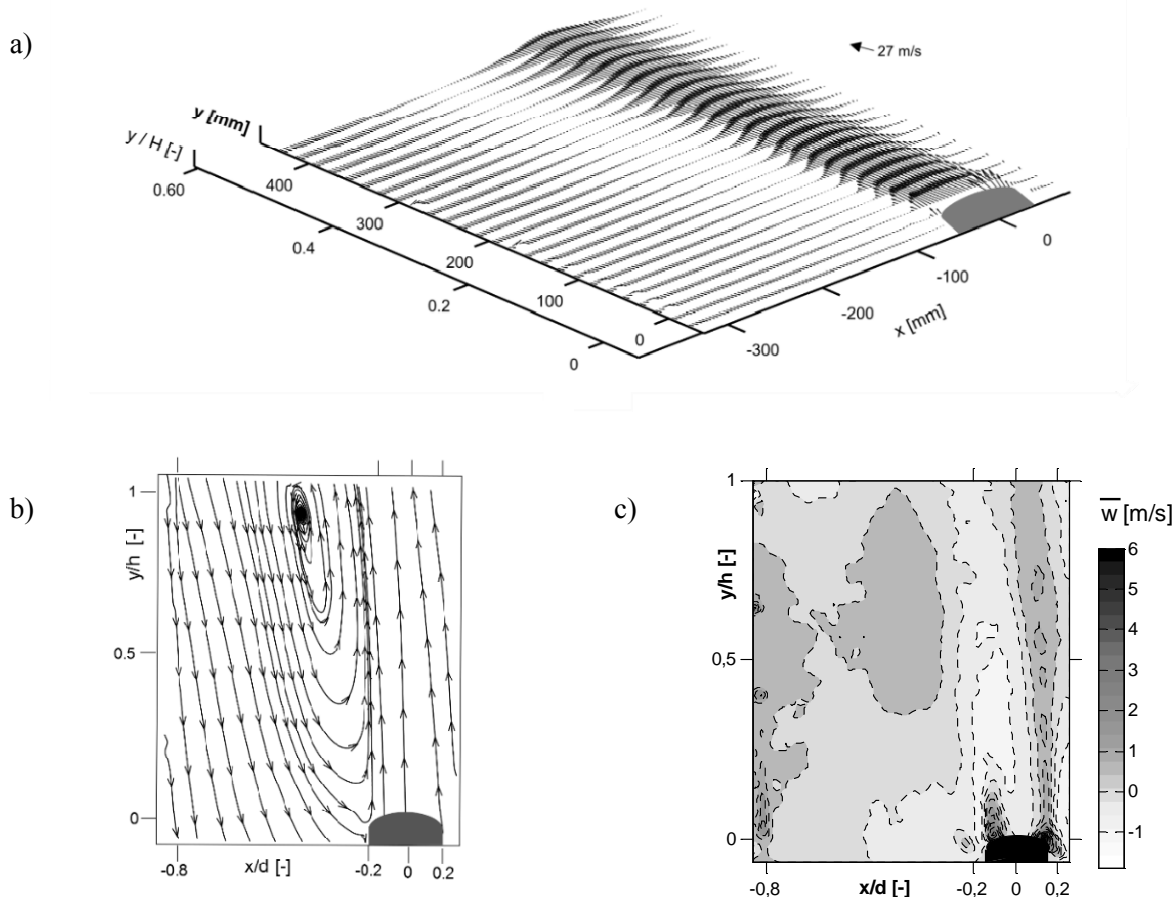
#### 4. Wyniki pomiarów

Przepływy turbulentne analizowane są z wykorzystaniem metod statystycznych. Dlatego też, podczas trwania sesji pomiarowych należało zgromadzić dostateczną liczbę chwilowych pól prędkości. Właściwe badania poprzedzono analizą liczby obrazów wykonanych w trybie podwójnej klatki (liczby chwilowych pól prędkości) uwzględnionych w procedurze uśredniania, na średnią wartość składowej poprzecznej  $v$  i jej odchylenia standardowego RMS w wybranym punkcie przekroju pomiarowego. Odchylenie RMS określa w tym przypadku ilościowo fluktuacje prędkości i nie jest utożsamiane z błędem obliczania jej wartości średniej. Rezultaty przedstawiono na rys. 3. Na tej podstawie dochodzi się do wniosku, że zarejestrowanie 1000 obrazów jest wartością wystarczającą.

Na rysunku 4a przedstawiono trójwymiarowy wykres wektorowy średniego rozkładu pola prędkości w sekcji pomiarowej, dla przepływu scharakteryzowanego przez liczbę  $Re = 133828$ . Rys. 4b przedstawia



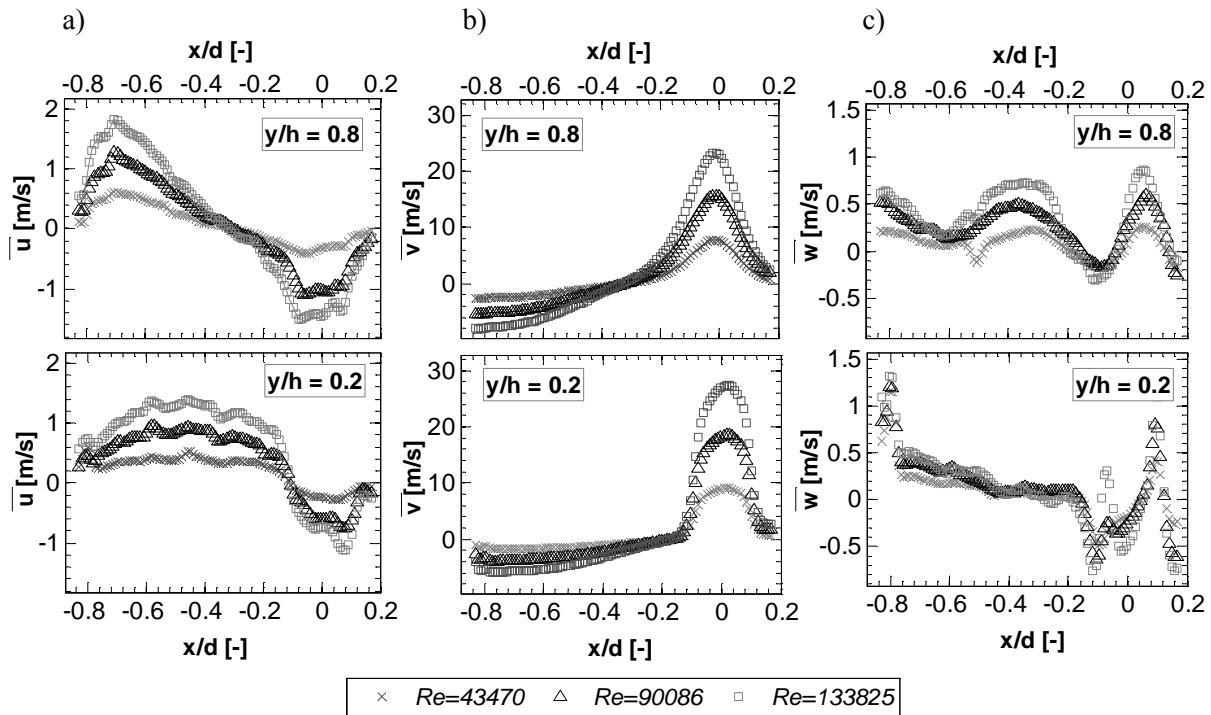
Rys. 3. Wyniki pomiarów dla  $Re = 133825$ . Średnia wartość składowej  $v$  wektora prędkości średniej i jej odchylenie RMS w zależności od liczby obrazów przepływu uwzględnionych w procedurze uśredniania



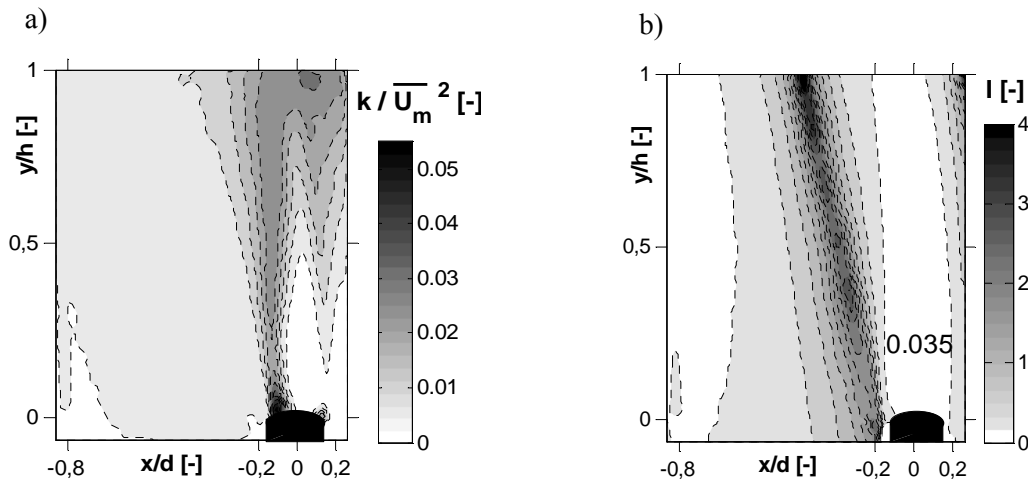
Rys. 4. Wizualizacja wyników pomiarów dla  $Re = 133825$  (a) Trójwymiarowy rozkład średniego pola prędkości; (b) linie prądu w płaszczyźnie  $x$ - $y$ ; (c) wykres konturowy składowej pionowej  $w$

linie prądu dla tej liczby Reynoldsa. Ponadto dokonano wizualizacji składowej pionowej  $w$  wektora prędkości średniej w kierunku normalnym do przekroju pomiarowego, w postaci wykresu konturowego (rys. 4c). Na rysunku 5 zaprezentowano profile poszczególnych składowych wektora prędkości średniej –  $u$ ,  $v$ ,  $w$ , w dwóch wybranych przekrojach –  $y/h = 0,2$  i  $y/h = 0,8$ , uwzględniając wyniki dla przepływu o liczbie  $Re = 43470$  oraz  $Re = 90086$ . Analizując powyższe wykresy, zauważyć można, że dominującą składową wektora prędkości średniej jest składowa w kierunku osi  $y$ .

Znajomość pól fluktuacji prędkości pozwoliła na wyznaczenie energii kinetycznej turbulencji. Wyniki przedstawiono na rys. 6a, gdzie przedstawiono wykres konturowy tej wielkości po unormowaniu przez kwadrat modułu prędkości maksymalnej w sekcji pomiarowej  $U_m$ . W obszarze wylotu strugi płynu z kanału rurowego intensywność turbulencji jest na poziomie ok. 3,5% (rys. 6b). W tym rejonie przepływ w postaci silnego strumienia wypływa z rury i podąża w kierunku rosnących wartości osi  $y$ . W okolicy wylotu z rury widoczny jest rejon o wysokiej energii kinetycznej turbulencji (rys. 6a). Ma to związek z występowaniem silnych fluktuacji składowej  $w'$  wektora prędkości. Występują tu bowiem silne naprężenia normalne  $\tau_{zz}$

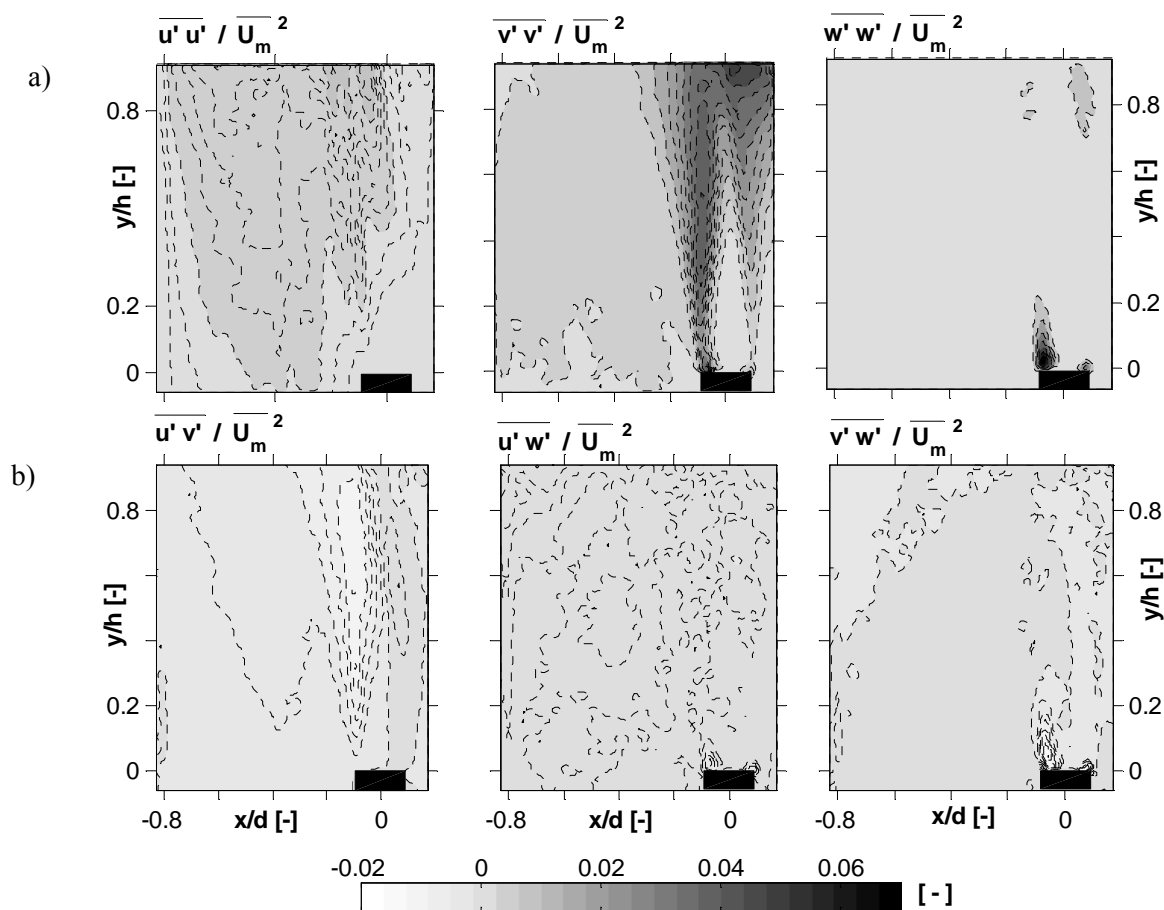


Rys. 5. Wyniki pomiarów dla  $Re = 43470$ ,  $Re = 90086$ ,  $Re = 133825$ . (a) profil składowej  $u$  wektora prędkości średniej; (b) profil składowej  $v$  wektora prędkości średniej; (c) profil składowej  $w$  wektora prędkości średniej



Rys. 6. Wyniki pomiarów dla  $Re = 133825$ . (a) wykres konturowy znormalizowanej energii kinetycznej turbulencji; (b) wykres konturowy intensywności turbulencji

(rys. 7a). Wraz ze zwiększaniem odległości od wylotu z kanału rurowego prędkość ulega zmniejszeniu, wraz z jednoczesnym wzrostem energii kinetycznej turbulencji. Im dalej od wylotu, tym struga płynu ulega silniejszemu rozmyciu – tzn. szerokość strugi ulega zwiększeniu, a prędkość zmniejszeniu. Występuje tu silne mieszanie się powietrza zawartego w strumieniu płynącym z dużą prędkością z powietrzem o znacznie niższej prędkości, wypełniającą kanał prostokątny. W obszarze tym większy udział w energii kinetycznej turbulencji posiadają fluktuacje związane ze składową poprzeczną wektora prędkości (rys. 7a, 7b). Wskutek tego mieszania, na granicy obszarów o małej i dużej prędkości następuje istotny wzrost intensywności turbulencji, gdzie jej wartość lokalnie wynosi nawet 400% (rys. 6b).



Rys. 7. Wyniki pomiarów dla  $Re = 133825$ . (a) znormalizowane naprężenia turbulentne Reynoldsa normalne; (b) znormalizowane naprężenia turbulentne Reynoldsa styczne

## 5. Podsumowanie

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki analizy eksperymentalnej przepływu powietrza o charakterze turbulentnym, który zachodził w fizycznym modelu układu wyrobisk skrzyżowania ściany z chodnikiem wentylacyjnym. Badania obejmowały wyznaczenie trójwymiarowych pól prędkości analizowanego przepływu z wykorzystaniem Cyfrowej Anemometrii Obrazowej PIV, dla trzech zadanych prędkości na wlocie do sekcji pomiarowej. Sekcja pomiarowa obejmowała rejon ściany, do której dostarczano powietrze za pośrednictwem kanału o przekroju kołowym (lutni wentylacyjnej). Zebranie w czasie trwania serii pomiarowych dostatecznej liczby chwilowych pól prędkości pozwoliło na wyznaczenie podstawowych statystyk analizowanego przepływu, jak: składowe tensora naprężeń turbulentnych Reynoldsa, energia kinetyczna turbulencji, intensywność turbulencji. Dokonano wizualizacji przepływu w postaci trójwymiarowej mapy wektorowej rozkładu średniego pola prędkości oraz skalarnych wykresów poszczególnych wielkości. Rezultaty pomiarów mogą służyć do falsyfikacji modeli numerycznych problemu, będącego tematem badań.

## Literatura

1. Branny M., Karch M., Wodziak W., Szmyd J., Jaszczur M., Nowak R., 2012. *Air flow measurements through the laboratory stand of the crossing of the long wall and ventilation gallery for CFD code validation*. AGH Journal of Mining and Geoengineering, Vol. 36, no. 2, p. 59-68.
2. Elsner J.W., Drobnik S., 1995. *Metrologia turbulencji przepływów*. Maszyny Przepływowe, T. 18. Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk.
3. Foucaut J.M., Miliat B., Perenne N., Stanislas M., 2004. *Characterization of Different PIV Algorithms Using the EUROPIV Synthetic Image Generator and Real images From a Turbulent Boundary Layer*. Particle Image Velocimetry: Recent Improvements, p. 163-185.

4. Jaszczur M., Nowak R., Szmyd J.S., Branny M., Wodziak W., 2012. *Experimental validation of the transport phenomena in T-shape channel flow*. Journal of Physics. Conference Series, 395, p. 1-9.
5. Jaszczur M., Nowak R., Szmyd J., Branny M., Karch M., Wodziak W., 2011. *An application of SPIV technique to experimental validation of turbulence model for the air flow in the intersection of the mining face with the ventilation gallery*. Journal of Physics: Conference Series 318 (5).
6. Nowak R., Wodziak W., Szmyd J., Branny M., Jaszczur M., Karch M., 2013. *Experimental investigations of turbulent flow phenomena in T-shape Chanel geometry*. Proc of ExHFT-8 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics 16-20 June 2013, Lisbon, Portugal.
7. Prasad A.K., 2000. *Stereoscopic particle image velocimetry*. Experiments in Fluids 29, p. 103-116
8. Raffel M., Willert C.E., Wereley S.T., Kompenhans J., 2007. *Particle Image Velocimetry a practical guide*. Springer.
9. Szmyd J., Branny M., Karch. M, Wodziak W., Jaszczur M., Nowak R., 2013. *Experimental and numerical analysis of the air flow in T-shape channel flow*. Arch. Min. Sci., Vol. 58, No. 2, p. 333-348.
10. Tropea C., Yarin A.L., Foss J.F., 2007. *Handbook of Experimental Fluid Mechanics*. Springer.
11. Willert C.E., 1997. *Stereoscopic digital particle image Velocimetry for application in wind tunnel flows*. Meas. Sci. Technol. 8, p. 1465-1479

### **Turbulent flow measurement in the crossing of a mining longwall and ventilation gallery using Particle Image Velocimetry**

#### **Abstract**

This paper presents the results of experimental investigations of turbulent air flow in the physical model of mine ventilation duct. The object investigated consists of airways (headings) arranged in a T-shape. Using PIV method instantaneous, three dimensional velocity fields were determined. Acquisition of large number of instantaneous velocity fields allow to perform statistical analysis to provide turbulent flow characteristics, such as turbulent kinetic energy, turbulence intensity, components of Reynolds turbulent stress tensor. The results can be used to verify the numerical solutions of the problem.

**Keywords:** Particle Image Velocimetry, Turbulent Flow Metrology