

Tunel aerodynamiczny przystosowany do badań metodą cyfrowej anemometrii obrazowej

MAREK GAWOR, JERZY GORGOŃ, JACEK SOBCZYK

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

Streszczenie

Podstawowym zagadnieniem w prezentowanej pracy jest opracowanie metodyki pomiarów przepływów gazów z wykorzystaniem cyfrowej anemometrii obrazowej. W celu badania opływu różnych modeli zbudowano tunel aerodynamiczny. Za pomocą termoanemometru przeprowadzono badania właściwości metrologicznych przestrzeni pomiarowej tunelu. Wykazano, że w obszarze pomiarowym prędkość przepływu jest stała, a intensywność turbulencji w przedziale prędkości od 0 do 3 m/s jest mniejsza od 2 %. Jednorodność prędkości przepływu badano również cyfrową anemometrią obrazową. Wyznaczono histogramy składowych wektora prędkości przepływu. Do histogramów dopasowano funkcję rozkładu normalnego. Na podstawie wartości średniej i odchylenia standardowego oceniano właściwości metrologiczne przestrzeni pomiarowej tunelu.

Słowa kluczowe: cyfrowa anemometria obrazowa, opływ modelu, tunel aerodynamiczny

Wstęp

Niniejszy artykuł prezentuje wybrane aspekty procesu opracowywania warsztatu badawczego umożliwiającego pomiary metodą cyfrowej analizy obrazowej opływu modeli umieszczonych w strudze powietrza. W pomiarach pilotażowych wykorzystano modele opisane szerzej w artykule „Pomiary opływu wybranych modeli metodą cyfrowej anemometrii obrazowej” (Gawor i in., 2011). Docelowo planuje się prowadzenie analiz opływu urządzeń w wyrobiskach górniczych oraz walidację obliczeń numerycznych.

Analityczny opis zjawisk aerodynamicznych i mechanicznych występujących podczas opływu brył, a w szczególności opływu urządzeń w wyrobiskach kopalnianych jest zagadnieniem złożonym i wymaga stosowania zaawansowanego aparatu matematycznego. Wiąże się z rozwiązywaniem nieliniowych równań mechaniki płynów. Dlatego w wielu przypadkach wykorzystuje się rozwiązania przybliżone uzyskiwane metodami numerycznymi. W celu weryfikacji wyników obliczeń numerycznych konieczne jest wykonywanie eksperymentów z wykorzystaniem dedykowanych technik pomiarowych (Kowalewski i inni IPPT PAN). Eksperymenty dostarczają również danych materiałowych, koniecznych do rozwiązywania konkretnych zagadnień teoretycznych oraz w obliczeniach numerycznych.

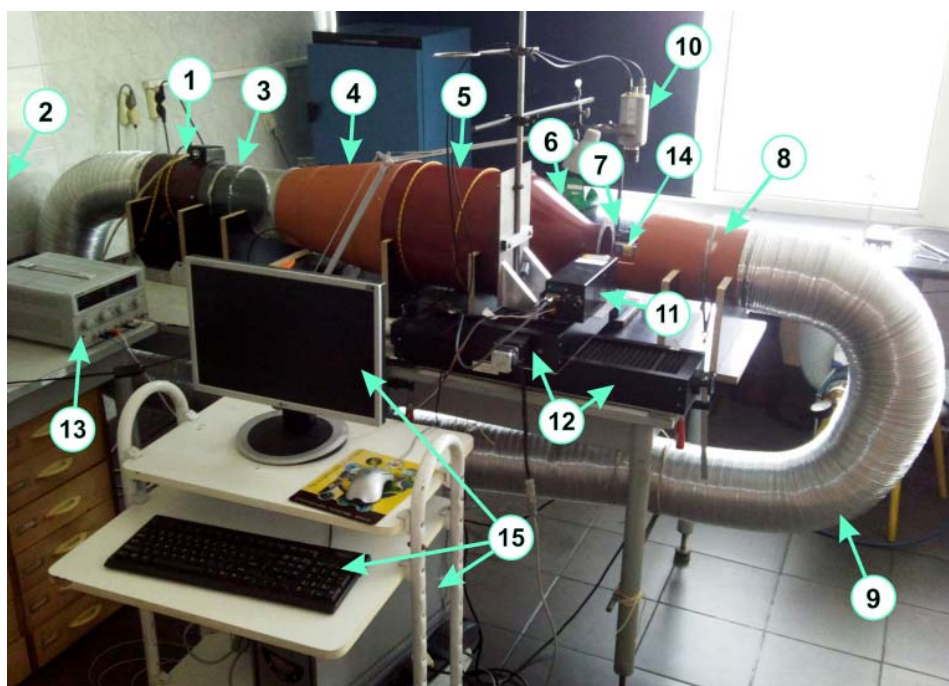
Dotychczasowe wyniki badań opływów urządzeń górniczych w wyrobiskach kopalnianych są niezbyt liczne i czasem sprzeczne ze sobą. Należy nadmienić, że przy opływach urządzeń górniczych mamy do czynienia z występowaniem odwrócenia przepływu oraz występowania przestrzeni wirowych. Zjawiska te prowadzą do złożonego rozkładu ciśnienia, a więc do oddziaływań na urządzenia umieszczone w wyrobiskach kopalnianych.

Zarówno przy analizie wyników pomiarów, jak również sterowaniu kamerą cyfrową wykorzystano oprogramowanie napisane w Pracowni Metrologii Przepływów PAN. Programy zostały dostosowane tak, aby można było wykonać serię zdjęć, a następnie w sposób automatyczny analizować te zdjęcia. Podczas analizy zdjęć wykorzystano techniki przetwarzania obrazu (Tadeusiewicz i Korochoła, 1997).

1. Tunel aerodynamiczny

Stanowisko półotwartego 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 (PIV), którą po raz pierwszy w historii IMG PAN użyto do pomiarów przepływów gazów. Ze względu na konieczność stosowania posiewu o znacznym stężeniu wykorzystanie do badań jednego z dostępnych w IMG PAN tuneli otwartych byłoby nieekonomiczne oraz wiązałoby się z wytworzeniem znacznego poziomu zapylenia w pomieszczeniu. Takie działanie jest niezgodne z przepisami BHP. Zastosowanie posiewu w tunelu o tradycyjnej budowie wiąże się również z jego zanieczyszczeniem (zwłaszcza siatek) i w konsekwencji ze zmianą jego charakterystyki (zależność prędkości w przestrzeni pomiarowej od obrotów wentylatora).

Opisywany tunel aerodynamiczny (Fot. 1) wykonano w sposób możliwie ekonomiczny. Oznacza to, że do jego budowy zastosowano elementy, które nie posiadały już wartości użytkowej (ale nie zostały jeszcze usunięte, np. fragmenty rur, konfuzor z komorą wyrównawczą) oraz takie, które można było zakupić w niskiej cenie, gdyż są powszechnie stosowane do innych celów (np. dyfuzor został wykonany z plastikowej doniczki, a aluminiowa rura łącząca wlot tunelu z wentylatorem to standardowy element służący do odprowadzania spalin z piecyków gazowych). Wyjątkiem jest para wentylator-układ sterowania wentylatorem (wykonany przez B. Stasickiego w latach 70-tych ubiegłego wieku), które zostały wymontowane z nieużywanego już od wielu lat tunelu otwartego.



Fot. 1. Półotwarty tunel aerodynamiczny wraz ze stanowiskiem pomiarowym: 1 – wentylator, 2 – układ sterowania wentylatorem (niewidoczny na zdjęciu), 3 – ulownica, 4 – dyfuzor, 5 – komora wyrównawcza, 6 – konfuzor, 7 – otwarta przestrzeń pomiarowa, 8 – wlot tunelu, 9 – rura łącząca wlot tunelu z wentylatorem, 10 – szybka kamera, 11 – laser, 12 – stolik XY wraz ze wspólnym statywem kamery i lasera, 13 – zasilacz lasera, 14 – badany model, 15 – komputer

Konstrukcja tunelu jest kompromisem wynikającym ze sprzecznych wymogów: niskiej turbulencji przepływu w przestrzeni pomiarowej oraz braku elementów takich jak siatki, które szczególnie szybko wylapywałyby cyrkulujące znaczniki używane do obrazowania przepływu. Dlatego zamiast standardowego rozwiązania ulownica – siatka zastosowano samą ulownicę o smukłości otworów ~ 18 (wykonaną z rurek PCV o średnicy wewnętrznej 6 mm i długości 107 mm). Ulownica i wentylator, nie licząc badanych modeli w przestrzeni pomiarowej, są jedynymi elementami obecnymi w świetle tunelu. W celu poprawienia stabilności przepływu, gaz wypływający z ulownicy ($\phi = 200$ mm) rozpręży się i zwalnia w dyfuzorze, aby po przepłynięciu przez komorę wyrównawczą ($\phi = 350$ mm) ulec przyspieszeniu do wyższych wartości

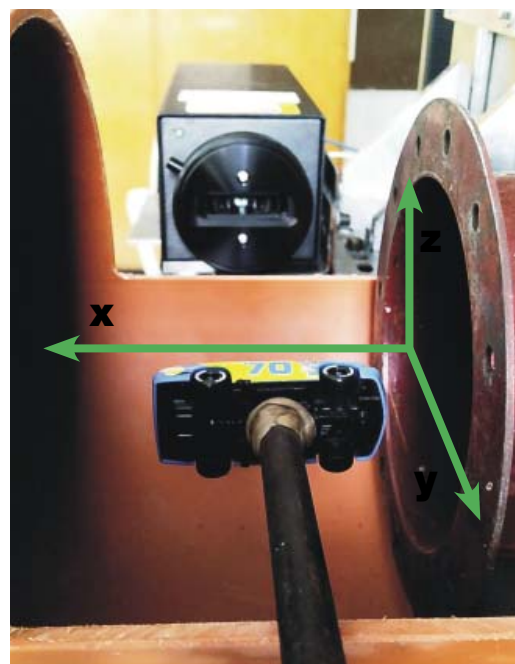
prędkości niż pierwotne. Efekt ten związany jest z mniejszą średnicą konfuzora ($\phi = 120$ mm). Biorąc pod uwagę założenie o wykorzystaniu tunelu w zakresie prędkości nie przekraczających 10 m/s taka budowa spełnia postawione wymagania.

2. Charakterystyka przestrzeni pomiarowej

Po zbudowaniu tunelu aerodynamicznego przeprowadzono badania przestrzeni pomiarowej (Fot. 2). Wlot powietrza do komory pomiarowej następuje „od dołu do góry” fotografii. Na fotografii 3 przedstawiono widok komory pomiarowej z zamontowanym modelem oraz związanej z przestrzenią pomiarową układ współrzędnych.



Fot. 2. Widok komory pomiarowej z zamontowanym modelem (z lewej strony widoczna jest kamera, a z prawej laser)



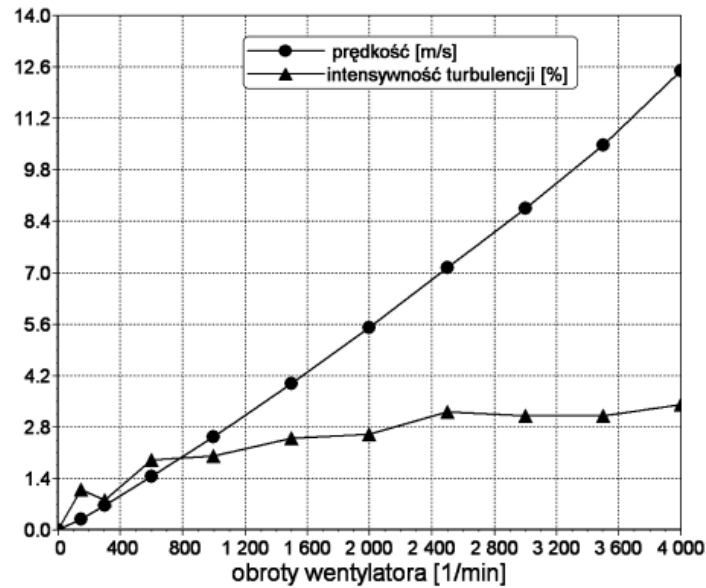
Fot. 3. Widok komory pomiarowej z zamontowanym modelem i układem współrzędnych (w części środkowej zdjęcia widoczny jest laser)

Charakterystyka tunelu została wyznaczona przy pomocy termoanemometru typu CC2000 wykonanego w Instytucie Mechaniki Górotworu (Ligęza, 2001). Do badań wykorzystano czujnik o średnicy włókna $8 \mu\text{m}$ i długości 2 mm. Czujnik umieszczono w osi tunelu w odległości 15 mm od jego wylotu. Odległość ta spowodowana była tym, że obsadka czujnika uniemożliwia bliższe, w stosunku do wylotu, umieszczenie czujnika. Na rysunku 1 przedstawiono charakterystykę tunelu – zależność prędkości przepływu powietrza od obrotów wentylatora. W celu wyznaczenia prędkości powietrza, podczas przeprowadzania eksperymentów, do otrzymanych wyników pomiarowych dopasowano wielomian drugiego stopnia (zauważono niewielkie odchylenia od liniowej charakterystyki tunelu). Zależność prędkości od obrotów wentylatora ω jest następująca:

$$v = A\omega^2 + B\omega - C$$

gdzie: $A = 1.79 \cdot 10^{-7}$ [m · s]; $B = 0.0024$ [m], $C = 0.049$ [m/s].

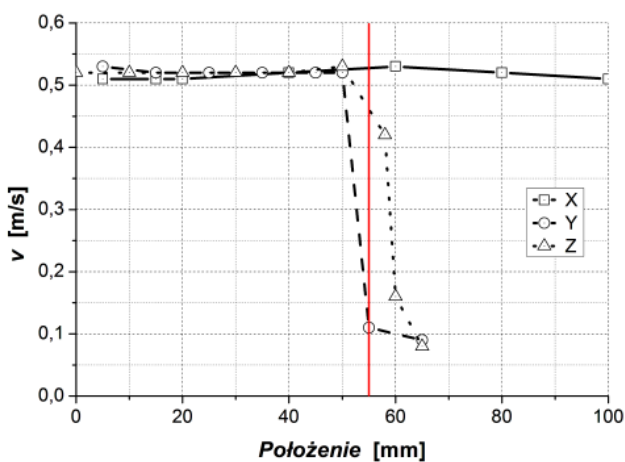
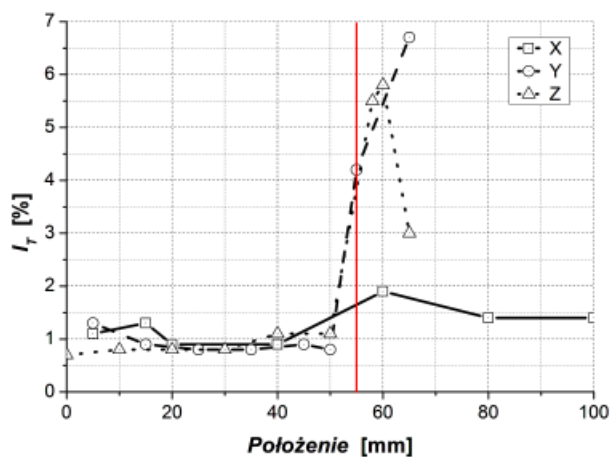
Wykorzystanie czujnika termoanemometrycznego umożliwiło pomiar prędkości w funkcji czasu. Pomiaru wykonywano z wykorzystaniem przetwornika analogowo-cyfrowego (Gawor, 1999), przy częstotliwościach próbkowania od 1 do 2 kHz (rejestrowano 16000 próbek; całkowity czas pomiaru wynosił od 8 do 16 sek.). Dla każdej nastawy obrotu wentylatora wyliczono lokalną intensywność turbulencji będącej stosunkiem odchylenia standardowego do wartości średniej prędkości i wyrażano ją w procentach. Zależność intensywności turbulencji od prędkości (dokładniej od obrotów wentylatora) przedstawiono na rysunku 1. Maksymalna wartość intensywności turbulencji dla prędkości 12 m/s (4 000 obrotów na minutę) wynosi ok. 3%.



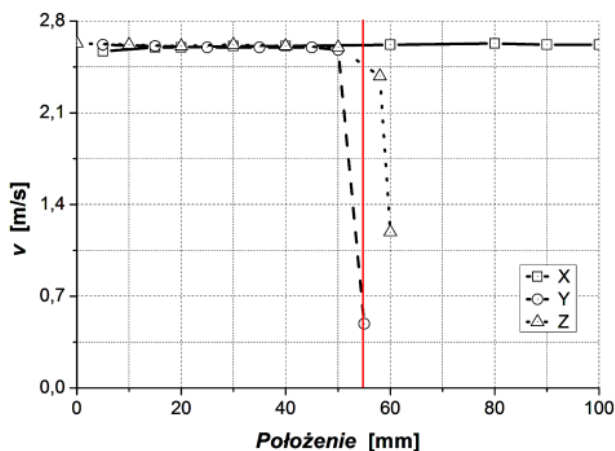
Rys. 1. Charakterystyka tunelu aerodynamicznego

W celu zbadania jednorodności przepływu powietrza w przestrzeni pomiarowej przeprowadzono badania zmian prędkości przepływu powietrza wzdłuż osi Ox (oś tunelu), Oy (oś pozioma), Oz (oś pionowa). Badania przeprowadzono przy pomocy termoanemometru opisanego powyżej. Badano profile prędkości przy prędkości przepływu 0.5 m/s oraz 2.5 m/s. Na rysunku 2 przedstawiono zmierzone profile prędkości dla prędkości przepływu 0.5 m/s. Kwadratem oznaczono profil wzdłuż osi Ox , kółkami wzdłuż Oy , trójkątami wzdłuż Oz . Pionową kreską zaznaczono krawędź wylotową z tunelu. Widać, że profile wzdłuż osi Oy i Oz są jednorodne do promienia tunelu $r = 45$ mm. W pobliżu krawędzi tunelu ($r = 55$ mm) prędkość spada do wartości 0.1 m/s. Profil wzdłuż osi Ox jest praktycznie stały wzdłuż całej przestrzeni pomiarowej tj. do 100 mm. Maksymalna różnica prędkości w badanym obszarze wynosi 2 cm/s. Wartość odchylenia standardowego do średniej wartości prędkości (intensywność turbulencji) jest największa wzdłuż osi Ox i wynosi 1.5%.

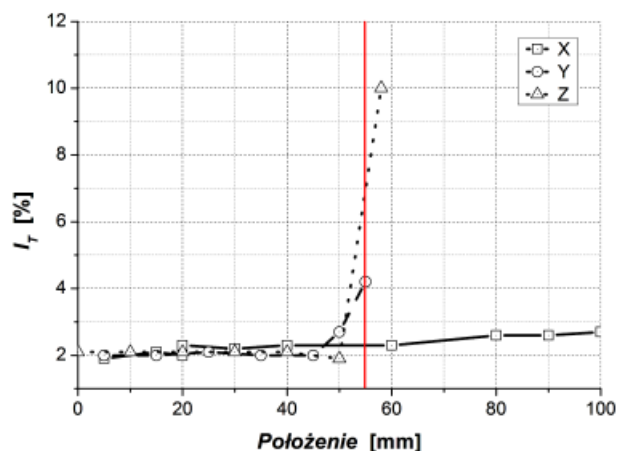
Na rysunku 3 przedstawiono intensywność turbulencji wzdłuż trzech osi (prędkość przepływu 0.5 m/s). W zakresie od osi tunelu do promienia $r = 45$ mm intensywność turbulencji wynosi ok. 1%. Nieco większa intensywność turbulencji 1-2% występuje dla osi Ox (od 60 do 100 mm). Jest to obszar otwartej przestrzeni pomiarowej bardzo wrażliwy na zakłócenia pochodzące z ruchu powietrza w pomieszczeniu. Oczywiście intensywność turbulencji wzrasta w pobliżu krawędzi tunelu ($r = 55$ mm). Poza krawędzią tunelu intensywność turbulencji dochodzi do wartości 7%.

Rys. 2. Profile prędkości wzdłuż osi Ox , Oy i Oz przy prędkości przepływu 0.5 m/sRys. 3. Intensywność turbulencji wzdłuż osi Ox , Oy i Oz przy prędkości przepływu 0.5 m/s

Podobny charakter przepływu występuje przy prędkości przepływu ok. 2.5 m/s (Rys. 4). W obszarze od osi tunelu do $r = 45$ mm (oś Oy i Oz) wartość prędkości przepływu jest stała. Intensywność turbulencji w tym obszarze pomiarowym wynosi 2.0% (Rys. 5).

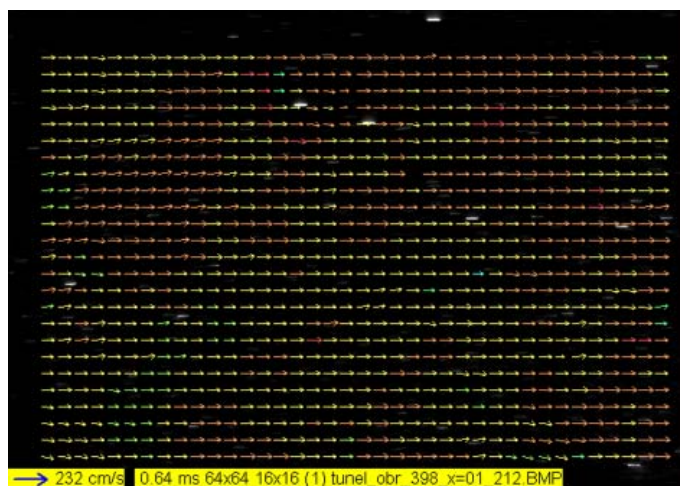


Rys. 4. Profile prędkości wzdłuż osi Ox, Oy i Oz przy prędkości przepływu 2.5 m/s



Rys. 5. Intensywność turbulencji wzdłuż osi Ox, Oy i Oz przy prędkości przepływu 2.5 m/s

Profil prędkości przepływu powietrza w przestrzeni pomiarowej można również zmierzyć przy pomocy cyfrowej anemometrii obrazowej. Wykonano pomiary prędkości przepływu w przestrzeni pomiarowej bez obecności modelu. Pomiary wykonano przy prędkości przepływu 95 cm/s. Na zdjęciu 1 przedstawiono wyznaczone wektory przepływu. W idealnej sytuacji (oczywiście nie ma idealnych tuneli aerodynamicznych) wektory powinny mieć stałą składową v_x (95 cm/s) i zerową składową v_y .



Zdj. 1. Pole prędkości przepływu wykonane przy pomocy cyfrowej anemometrii obrazowej

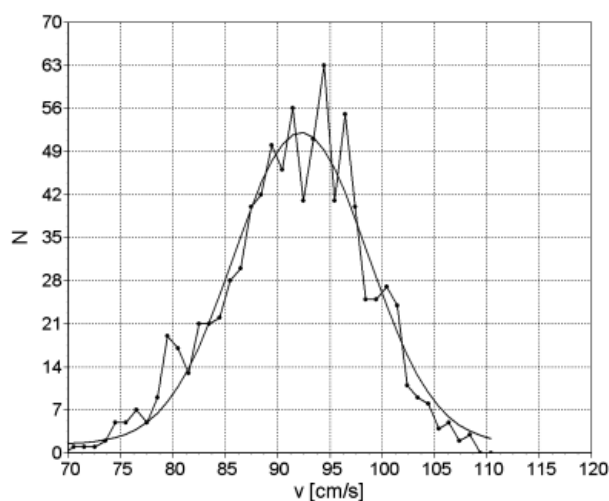
W celu wyznaczenia odchylenia zmierzonych wartości prędkości od prędkości zadanej dla zmierzonych wartości (v_x i v_y) wyznaczono histogramy H_x i H_y . Przedział okna histogramu wynosił 1.12 cm/s. Do wyliczonych histogramów dopasowano funkcję Gaussa (G_x i G_y):

$$G_i = \frac{D_i}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(H_i - H_i^{sr})^2}{2\sigma_i^2} \right) + G_{0i}$$

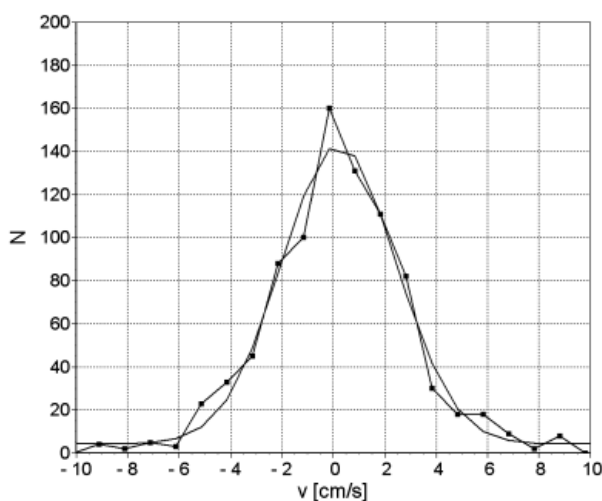
gdzie:

- indeks i dotyczy składowych prędkości v_x i v_y ;
- H_i – wartość funkcji histogramu,
- H_i^{sr} – średnia wartość histogramu,
- σ_i – odchylenie standardowe histogramu,
- D_i, G_{0i} – parametry związane z normowaniem funkcji Gaussa.

Wyliczone histogramy, dla składowej v_x i v_y , oraz dopasowane funkcje Gaussa przedstawiono na poniższych wykresach (Rys. 6 i 7). Szczególnej analizie zostaną poddane parametry dopasowania funkcji Gaussa H_i^{sr} i σ_i . Parametr H_i^{sr} wyznacza średnią wartość prędkości w rozważanym obszarze pomiarowym. Wyznaczona średnia prędkość wynosi dla składowej v_x 92.3 cm/s (prędkość napływu powietrza wynikająca z charakterystyki tunelu wynosiła 95 cm/s). Odchylenie standardowe wynosi 6.4 cm/s i odzwierciedla statystyczną niejednorodność składowej osiowej prędkości. Tak więc statystyczna niejednorodność badanego pola przepływu wynosi $6.4/95 \cdot 100 = 6.7\%$ (Cierniak i in., 2009).



Rys. 6. Histogram składowej prędkości v_x oraz dopasowana funkcja Gaussa (parametry dopasowania $H_x^{sr} = 92.26$, $\sigma_x = 6.40$, $G_{0x} = 1.44$, $D_x = 812.6$)



Rys. 7. Histogram składowej prędkości v_y oraz dopasowana funkcja Gaussa (parametry dopasowania $H_y^{sr} = 0.22$, $\sigma_y = 2.23$, $G_{0y} = 2.26$, $D_y = 776.1$)

Kolejnym problemem jest odchylenie od osiowego przepływu wzdłuż przestrzeni pomiarowej. Miarą tego odchylenia jest różna od zera wartość składowej v_y . Na rysunku 7 przedstawiono histogram rozkładu składowej v_y . Średnia wartość składowej v_y wynosi 0.22 cm/s. Odchylenie standardowe histogramu σ_y wynosi 2.23 cm/s.

Przedstawione wyniki pomiarów świadczą o dobrych, pod względem metrologicznym, właściwościach przestrzeni pomiarowej.

3. Warsztat badawczy

Wypracowanie warsztatu badawczego przeprowadzono z użyciem różnych modeli. Analizowano opływy takich obiektów jak: modele samochodów, lokomotywy „górnicy”, walca oraz prostokątnej blaszki. Podjęto również próby pomiaru przepływu powietrza wokół wsporników jednowłótkowego czujnika termomanometrycznego (dwa wsporniki) oraz trójwłótkowego czujnika (sześć wsporników). Prace dotyczyły jednocześnie wielu aspektów między innymi:

1. posiewu, czyli:
 - a. wyboru substancji, której można użyć jako posiew,
 - b. wykonania generatora posiewu,
 - c. określenia sposobu i gęstości dawkowania posiewu,

2. kamery (Hiller i in., 1996) i lasera, czyli:
 - a. określenia optymalnego położenia kamery i lasera względem przestrzeni pomiarowej tunelu,
 - b. zamocowania kamery i lasera na stoliku XY w sposób pozwalający na dowolne ustawienie ich względem modelu,
 - c. kalibracji obrazu kamery pod względem metrologicznym i optycznym,
 - d. określenia optymalnego czasu ekspozycji oraz czasu pomiędzy zdjęciami w zależności od prędkości przepływu powietrza,
3. modeli – wybranych do analizy opływu:
 - a. modele 3 typów samochodów: formuła 2 („Formuła F2”), typowego samochodu osobowego („samochodzik”), oraz kabrioletu („kabriolet”),
 - b. walec o średnicy 10 mm,
 - c. wsporniki jednowłóknowego termoanemometru,
 - d. opływ „blaszki”,
 - e. model lokomotywy („umieszczonej w wyrobisku kopalnianym”).

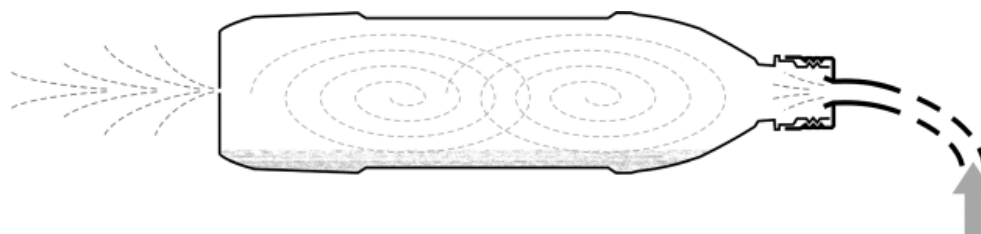
Ad. 1)

Standardową substancją wykorzystywaną do wykonania posiewu w metodzie PIV jest dwutlenek tytanu (TiO_2). Jest to spowodowane jego właściwościami fizycznymi i biologicznymi. W szczególności zdecydowały o tym trzy jego zasadnicze cechy:

- wpływ na zdrowie człowieka: obojętny,
- rozmiary cząstek: 0.1-5 μm ,
- kształt cząsteczek: zbliżony do kuli.

Ze względu na najnowsze badania w dziedzinie medycyny donoszące o szkodliwości TiO_2 dla zdrowia (okazało się, że jest karcynogenem) poszukiwano substancji mogącej go zastąpić. Wybrano do tego celu lekki węglan magnezu ($60\% \text{Mg}(\text{HCO}_3)_2 + 40\% \text{MgO}$, gęstość usypowa $\sim 0.2 \text{ kg/dm}^3$).

Generator posiewu, podobnie jak tunel, wykonano również w wersji ekonomicznej (Rys. 8). Pustą butelkę po napoju gazowanym przewiercono wiertłem $\phi = 1 \text{ mm}$ od strony dna i znacznie większym ($\phi = 8 \text{ mm}$) – od strony zakrętki. W większym otworze umieszczono gumowy wąż połączony z butlą ze sprężonym powietrzem. Butla napełniana jest za pomocą sprężarki. Optymalne ciśnienie robocze wynosi $\sim 0.6 \text{ MPa}$. Mniejszy otwór pozostaje otwarty funkcjonując jako dysza. Butelka, po umieszczeniu w niej niewielkiej ilości węglanu magnezu i otwarciu zaworu butli, spełnia zadanie generatora posiewu w stopniu zadawalającym.



Rys. 8. Schemat ideowy generatora posiewu. Strzałką zaznaczono wlot sprężonego powietrza

W wyniku prób okazało się, że umieszczenie modelu w przestrzeni pomiarowej skutkuje wytrącaniem cząsteczek posiewu cyrkulujących w tunelu do pomieszczenia laboratorium. Jest to wynikiem zaburzenia przepływu w tej przestrzeni, przez co część powietrza wylatującego z konfuzora nie wpada z powrotem do wlotu tunelu. Dzieje się tak pomimo różnicy średnic tych elementów (średnica mniejsza – wylotowa ($\phi = 110 \text{ mm}$), średnica większa – wlotowa ($\phi = 190 \text{ mm}$). Dodatkowo cząsteczki posiewu w naturalny sposób osadzają się na wszystkich powierzchniach, które mijają. Wobec tego konieczne jest systematyczne uzupełnianie ilości cząstek w tunelu. Uzupełnienie to musi następować tym częściej, im mniejsza jest prędkość przepływu i im bardziej przepływ w komorze pomiarowej zaburzany jest obecnością modelu. W praktyce może oznaczać to konieczność uzupełniania posiewu nawet co 2-3 minuty.

Ad. 2)

Przeźródź pomiarowa tunelu ma wymiary ok. $x = 150$ mm, $y = 110$ mm $z = 110$ mm. Jej dolna połowa jest osłonięta na stałe wycinkiem pobocznicę walca (pół walca) o promieniu 95 mm. Od góry jest otwarta w celu umożliwienia oświetlenia światłem lasera, jak również wykonywaniu zdjęć przez kamerę. Konieczne jest również udostępnienie przestrzeni pomiarowej w celu zamocowania statywu z modelem.

Wzdłuż tunelu umieszczono stół XY tak, aby oś X pokrywała się z osią tunelu, a oś Y była do niej prostopadła. Na stole umieszczono specjalny statyw, do którego przytwierdzono laser i kamerę (Fot. 2). Cała konstrukcja pozwalała na dowolne względne ustawienie obu urządzeń w celu np. kalibracji, a po zaaretowaniu – na jednoczesne poruszanie nimi bez zmiany względnej konfiguracji przestrzennej.

Adjustacja lasera polegała na ustawieniu jego mocy (typowo: na minimum podczas konfigurowania nowego eksperymentu i na maksimum podczas pomiarów) oraz na wyborze położenia ogniska noża świetlnego (typowo: w okolicy powierzchni modelu). 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. Drugi dotyczy sterowania pracą kamery za pomocą interfejsu programu „Marko” (program został napisany przez autorów artykułu) (Gawor 2005), który pozwala wybrać m.in. tryb pracy (ilość zdjęć, zdjęcia po przyjsciu sygnału wyzwalającego „trigger”), czas ekspozycji, czas odstępu pomiędzy zdjęciami, czas błysku oświetlenia, wzmocnienie sygnału matrycy, opóźnienie pierwszego zdjęcia i wiele innych. Konieczne jest indywidualne ustawienie tych parametrów dla każdego eksperymentu. Dodatkowo, po każdorazowej zmianie konfiguracji przestrzennej kamera-laser lub/i regulacji obiektywu konieczne jest wykonanie zdjęcia obiektu o znanych wymiarach w celu określenia skali odwzorowania przestrzennego (ilość pikseli na zdjęciu przypadająca na jednostkę długości obiektu).

Ad. 3)

Eksperymenty polegały na zbadaniu profili prędkości powietrza, wokół modeli umieszczonych w przestrzeni pomiarowej. Pomiarę takie umożliwiają określenie niektórych charakterystyk aerodynamicznych (pomniejszonych) modeli, a dzięki metodom podobieństwa mechanicznego – również rzeczywistych obiektów.

Ze względu na pilotażowy charakter badań główny nacisk położono na określenie możliwości zastosowanej metody pomiarowej, natomiast pominięto szczegółowe analizy właściwości aerodynamicznych użytych modeli. Wyniki tych prac zawarto w artykule pt. „Pomiary opływu wybranych modeli metodą cyfrowej anemometrii obrazowej” (Gawor i in., 2011).

4. Podsumowanie

Wykonano tunel aerodynamiczny o obiegu zamkniętym ze strugą swobodną przystosowany do badań metodami cyfrowej anemometrii obrazowej. Określono charakterystykę tunelu oraz przebadano właściwości aerodynamiczne jego przestrzeni pomiarowej. Uzyskane wyniki pozwalają na stwierdzenie, że tunel ten doskonale nadaje się do badań opływów niewielkich obiektów przy prędkości strugi powietrza poniżej 12 m/s.

Pracę wykonano w ramach zadań statutowych Instytutu Mechaniki Górotworu PAN pt. *Opracowanie metody nieinwazyjnego pomiaru powolnych przepływów gazów przy pomocy cyfrowej anemometrii obrazowej* w 2011 roku, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Gawor M. (1999): *Karta szybkiego przetwornika analogowo cyfrowego z oprogramowaniem*. Metrologia i Systemy Pomiarowe VI. (4) 249-255.
- 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. s. 1-12.
- Gawor M. (2008): *Opis metody i stanowiska pomiarowego do badania przepływów pulsacyjnych w elastycznych przewodach*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Tom 10, nr 1-4, s. 169-186 Kraków.

- Cierniak W., Gawor M., Gorgoń J., Mnich-Medoń K., Tichoruk M., (2009): *Stanowisko do pomiarów odkształceń elastycznych przewodów oraz ciśnienia przy różnych warunkach brzegowo-początkowych*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Tom 11, nr 1-4, s. 167-176, Kraków.
- Gawor M., Mnich-Medoń K., Sobczyk J., (2011): *Pomiar opływu wybranych modeli metodą cyfrowej anemometrii obrazowej*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Tom 13, nr 1-4, s. 245-255, Kraków.
- Hiller W. J., Kowalewski T.A., Tatarczyk Th. (1996): *High speed imaging with a frame-transfer CCD*. Int. Cong. High-Speed-Photography Victoria, Canada, 21-25 Sept. 1992.
- Kowalewski T. A., Michałek T., Błoński S. *Model przepływu sektora komory spalania turbiny gazowej*. IPPT PAN, Zakład Mechaniki i Fizyki Płynów, Warszawa. Badania realizowane w ramach projektu FLOXCOM 5PRE UE.
- Ligęza P. (2001): *Układy termoanemometryczne – struktura, modelowanie, przyrządy i systemy pomiarowe*. Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków.
- Tadeusiewicz R., Korohoda P., (1997): *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*. Kraków 1997.

A wind tunnel adapted to research carried out by means of the PIV method

Abstract

The focus of the present work has been to develop a methodology for measuring gas flows that would make use of digital particle image velocimetry. In order to investigate the flow-around of various models, a wind tunnel was built. The properties of the measuring space of the tunnel were subsequently checked with a thermoanemometer. It was demonstrated that the flow velocity within the measuring space is constant, and the intensity of the turbulences, for the velocity range of 0-3 m/s, is less than 2 percent. The uniformity of the flow velocity was also tested by means of digital particle image velocimetry. The histograms of the constituents of flow velocity vector were determined. Then, the normal distribution function was matched with the histograms. The metrological properties of the measuring space of the tunnel were assessed on the basis of the average value and standard deviation.

Keywords: digital particle image velocimetry, model flow-around, wind tunnel