Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN Tom 19, nr 2, czerwiec 2017, s. 3-11 © Instytut Mechaniki Górotworu PAN

Badania przepływów dynamicznych w tunelu aerodynamicznym przy użyciu termoanemometru trójwłóknowego

JACEK SOBCZYK, WALDEMAR WODZIAK, MAREK GAWOR

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

Streszczenie

W artykule przedstawiono badania dynamiki przepływów w przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego. Generowanie nieustalonych pól prędkości realizowane było poprzez użycie modułu wymuszeń przepływów dynamicznych (MWPD) zainstalowanego na wlocie do komory pomiarowej. Pomiary przy użyciu termoanemometru trójwłóknowego przeprowadzono dla trzech trybów pracy modułu (różna amplituda otwarcia płatów MWPD i różna częstotliwość ich pracy) i trzech prędkości napływu. Przedstawiono zapisy przebiegów czasowych modułu wektora prędkości, ich widma amplitudowe oraz wyznaczono współczynniki turbulencji. Wyniki przedstawione w tej pracy stanowią podstawę do określenia warunków eksperymentalnych w przyszłych badaniach nad przepływami zmiennymi w czasie w tunelu aerodynamicznym.

Słowa kluczowe: przepływy dynamiczne, moduł wymuszeń przepływów dynamicznych, termoanemometria, tunel aerodynamiczny

1. Wstęp

Badania nad przepływami zmiennymi w czasie stanowią ważny problem naukowy i techniczny. Podmuchy wiatru mają wpływ na aerodynamikę samolotów, samochodów, budynków oraz innych obiektów znajdujących się w atmosferycznej warstwie przyziemnej. Z racji rozmiarów badanych obiektów, pomiary te wykonywane są w skali w tunelach aerodynamicznych. Indukowanie przepływów dynamicznie zmiennych odbywa się za pomocą specjalnie zaprojektowanych urządzeń, często mających budowę modularną, umieszczanych w tunelach aerodynamicznych. O ich właściwościach stanowią przede wszystkim elementy zmieniające w czasie pole przekroju poprzecznego, powodujące tym samym zmianę ciśnienia oraz prędkości przepływu. Najsilniejsze oddziaływanie występuje w ich bezpośrednim otoczeniu, stąd montuje się je w pobliżu komory pomiarowej.

W zależności od przeznaczenia można spotkać różne konstrukcje generatorów podmuchów. Najczęściej wzbudzanie zmiennych pól prędkości odbywa się poprzez ruch jednego [Mai i in., 2011] lub dwóch płatów [Passmore i in., 2001; Navarro-Medina i in., 2012] mających kształt profili NACA i poruszających się z określoną amplitudą i prędkością. Innym rozwiązaniem jest zainstalowanie siatki składającej się z kilku- lub kilkudziesięciu mniejszych płatów, zamontowanej na wlocie do komory pomiarowej. [Roadman i Mohseni, 2009]. Generowane w ten sposób zaburzenia pola prędkości powinny charakteryzować się sinusoidalnym przebiegiem czasowym oraz określoną amplitudą [Fonte i in., 2016].

Typowymi przyrządami stosowanymi w górniczych pomiarach wentylacyjnych są anemometry skrzydełkowe lub, coraz częściej spotykane, anemometry ultradźwiękowe. Ze względu na znaczną stałą czasową nadają się one przede wszystkim do prowadzenia pomiarów statycznych. Do prowadzenia pomiarów przepływów zmiennych w czasie, badania stanów nieustalonych sieciach wentylacyjnych i innych parametrów dynamicznych stosowane są termoanemometry. Termoanemometry posiadają szerokie pasmo

częstotliwościowe przenoszenia sygnałów prędkości. Jest to związane z zastosowaniem cienkich, kilkumikrometrowych włókien jako elementów pomiarowych [Jamróz i in., 2014].

Pomiary termoanemometryczne w kopalnianych sieciach wentylacyjnych wykonuje się w celach poznawczo-naukowych. W przypadku długo czasowych pomiarów stosuje się filtry wyłapujące cząsteczki stałe i krople wody [Ligęza i Poleszczyk, 2004].

Użycie trójwłókowych sond termoanemometrycznych pozwala wyznaczyć moduły poszczególnych składowych wektora prędkości. W celu wyznaczenia i śledzenia w czasie zmian strumienia objętościowego przepływu w wyrobisku kopalnianym (uwzględniając przepływ główny i składowe prostopadłe do przepływu głównego) stosuje się kilka termoanemometrów (niekiedy trójwłóknowych) umieszczonych na wysięgnikach w poprzek wyrobiska [Skotniczny i in., 2014].

2. Termoanemometr trójwłóknowy

Sonda zastosowanego w pomiarach czujnika termoanemometrycznego składa się z trzech jednowłókowych sond termoanemometrycznych (Rys. 1a), których włókna są wzajemnie prostopadłe. Można przyjąć, że ich przedłużenia pokrywają się z krawędziami sześcianu wychodzącymi z jednego wierzchołka. Można zatem związać z nimi kartezjański układ współrzędnych (Rys. 1b). Przekątna wspomnianego sześcianu przechodzi przez środek i jest równoległa do obsadki czujnika. Łatwo sprawdzić, że kąt pomiędzy włóknami, a osią sondy wynosi 54.7 stopnia. Ze względu na małe rozmiary czujnik taki wnosi zwykle niewielkie zakłócenie do przepływu.

Włókna pomiarowe wykonano z drutu wolframowego o średnicy 5 mikrometrów i długości około 2 milimetrów. Wsporniki włókien mają długość około 20 milimetrów. Średnica obsadki, na której umieszczone są włókna wynosi 6 milimetrów.

W celu wykonania prawidłowych pomiarów sonda wymaga wzorcowania. Wzorcowanie polega na pomiarze napięcia z włókna oraz prędkości w tunelu aerodynamicznym. Każde włókno sondy wzorcowane jest w dwóch położeniach – prostopadle i równolegle do napływu. Pierwszy etap wzorcowania służy do wyznaczenia zależności pomiędzy rejestrowanym napięciem, a prędkością w tunelu aerodynamicznym (na ogół stosuje się wzór Kinga). Drugi etap ma na celu wykazanie jak zmienia się napięcie na włóknie w zależności od tego czy następuje napływ prostopadły, czy równoległy na włókno. Różnica tych napięć stanowi podstawę do wyznaczania modułów (wartości bezwzględnych) składowych wektora prędkości. Służy do tego algorytm Jorgensena, który wykorzystuje pojęcie tzw. prędkości efektywnej [Poleszczyk, 2002].



Rys. 1. Sonda zastosowanego termoanemometru trójwłóknowego: a) schemat budowy (za [Poleszczyk, 2002]), b) orientacja przestrzenna drutów wolframowych i osi sondy

3. Warunki pomiarowe

Badania przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym niskich prędkości o obiegu zamkniętym TAN-POZ. Całkowite wymiary zewnętrzne tunelu wynoszą $9,79 \times 4,08 \times 2,34$ m. Prędkość przepływu powietrza wymuszana jest poprzez działanie wentylatora o mocy 30 kW i wydajności maksymalnej 15,75 m³/h. Prędkość strumienia powietrza w komorze pomiarowej wynosi od 0,1 do 60 m/s, a intensywność turbulencji nie przekracza 0,5%. Tunel wyposażony jest w system regulacji temperatury i wilgotności względnej strugi powietrza. Zamknięta komora pomiarowa ma wymiary $1,5 \times 0,5 \times 0,5$ m i przystosowana jest do badań metodami optycznymi, w tym za pomocą cyfrowej anemometrii obrazowej PIV. Parametry tunelu szerzej opisano w [Bujalski i in., 2013].

Moduł Wymuszeń Przepływów Dynamicznych (MWPD) zainstalowano pomiędzy strefą kontrakcji, a komorą pomiarową. Podmuchy indukowane były poprzez ruch dwóch płatów w kształcie profili NACA, umocowanych przy ściankach komory na dwóch obracających się prętach (Rys. 2). Synchroniczny ruch obrotowy prętów w zakresie 0-90° odbywał się dzięki posuwowi silnika liniowego, który za pomocą sytemu dźwigni przekładany jest na moment skręcający prętów.

Do badań będących treścią niniejszej publikacji wybrano cykliczny sposób działania MWPD ze stałą prędkością¹ (wymuszenie w przybliżeniu trójkątne). Podczas jego funkcjonowania, na skutek cyklicznego tłumienia przepływu, w przestrzeni pomiarowej okresowo następowały wzrosty i spadki prędkości chwilowej względem zadanej prędkości napływu, najsilniej w pobliżu osi komory pomiarowej.

W celu rozpoznania sposobu modulacji przepływu za pomocą MWPD w sterowniku modułu zdefiniowano trzy tryby pracy, które charakteryzują parametry zebrane w tabeli 1. Wybrano trzy prędkości przepływu v powietrza w tunelu, które mierzone w punkcie P zlokalizowanym 20 cm od wylotu z niepracującego MWPD (Rys. 2) wynosiły: 1.6 m/s, 9.4 m/s i 19.4 m/s.

Tryb pracy modułu	Amplituda przymykania przekroju przez każdą z łopat A [cm]	Szybkość ruchu postępowego krawędzi łopat V _a [cm/s]	Częstotliwość generowanej fali prędkości <i>f_a</i> [Hz]
1	7.7	6.58	0.42
2	7.7	3.77	0.24
3	3.1	6.58	0.72

Tab. 1. Tryby pracy MWPD

Pomiary przeprowadzono z wykorzystaniem trójwłóknowej sondy termoanemometrycznej dla następujących ustawień karty przetwornika analogowo-cyfrowego (ADC): częstotliwość próbkowania 2 kHz, ilość pomiarów 160-210 tys. Przebieg każdego pomiaru składał się z trzech etapów. W pierwszym rejestrowano ok. 5 sekundowy przebieg czasowy prędkości przepływu niezaburzonego pracą modułu (płaty przylegające do ścian bocznych tunelu), w etapie drugim uruchamiano moduł na kilkanaście okresów, by na początku etapu trzeciego moduł zatrzymać (płaty ponownie przylegające do ścian bocznych tunelu). Ten etap rejestracji prędkości przepływu służył zarejestrowaniu powrotu prędkości do wartości wyjściowej (Rys. 3).



Rys. 2. Lokalizacja punktu pomiarowego

Z wyjątkiem krótkich chwil podczas rozpędzania i zatrzymywania płatów. Są one realizowane z dużym, ale jednak skończonym przyspieszeniem.

Badania te są kontynuacją badań opisanych w pracy [Sobczyk i in., 2016]. Zawarta tam poglądowa analiza przepływu zaburzonego pracą modułu wymuszeń przepływów dynamicznych (MWPD) opierała się na pomiarach wykonanych metodą cyfrowej anemometrii obrazowej (ang. *PIV*). Metoda ta daje dobry wgląd w zależności przestrzenne obserwowanego przepływu, natomiast jej istotnym ograniczeniem jest brak adekwatnej rozdzielczości czasowej. Jej odwrotnością w tym zakresie jest termoanemometria, która charakteryzuje się doskonałą rozdzielczością czasową. Posiada natomiast ograniczone możliwości uzyskania informacji przestrzennej. Dlatego też wyniki opisane poniżej stanowią dopełnienie wyników opisanych w pracy [Sobczyk i in., 2016].

4. Wyniki pomiarów i ich analiza

Wyniki pomiarów w postaci przebiegów czasowych wartości wektora prędkości zaprezentowano na rysunku 3. Ujawniają one główne aspekty zastosowania MWPD (posiadanej konstrukcji) w zadanych warunkach przepływowych.

Uruchomienie modułu prowadziło do niesymetrycznych oscylacji prędkości strugi, prędkość wahała się od $v_{osc,min}$ do $v_{osc,max}$. Dla najniższej prędkości napływu dodatkowo widoczny jest początkowy spadek poziomu obwiedni sygnału. Zjawisko to może wynikać z faktu, że chwilowe wzrosty ciśnienia po stronie napływu na MWPD są zbliżone co do wartości do sprężu wentylatora modułu napędowego (MN). Propagując wstecz wpływają ujemnie na jego wydajność.



Rys. 3. Przebiegi czasowe wartości wektora prędkości. Jaśniejszym kolorem zaznaczono fragmenty wykresów wykorzystane m.in. do wyznaczenia prędkości średniej v_{osc.mean} (pozioma linia przerywana), a także do późniejszej analizy spektralnej. Nagłówki kolumn odnoszą się do prędkości v, numery przypisane wierszom oznaczają tryby pracy MWPD.

Wspomniana asymetria jest podwójna, ponieważ jeśli zdefiniujemy $v_{osc,m}$ jako prędkość, której wartość można odnaleźć w połowie odległości pomiędzy wartością minimalną i maksymalną przebiegu (1)

$$v_{osc,m} = v_{osc,\min} + \frac{v_{osc,\max} - v_{osc,\min}}{2}$$
(1)

to $v_{osc,m}$ jest różne zarówno od v, jak i prędkości średniej oscylacji $v_{osc,mean}$ (pozioma linia przerywana na rysunku 3).

Amplitudy oscylacji $v_{osc,a}$ oraz wartości $v_{osc,m}$ zostały wyznaczone na podstawie tych części przebiegów, które utrzymywały stałe poziomy obwiedni. Zostały one oznaczone jaśniejszym kolorem na rysunku 3. Pełne zestawienie omawianych parametrów zebrano w tabeli 2. Oprócz omówionych w tekście dodano jeszcze dwie kolumny: $v_{osc,max}$ i $v_{osc,min}$, w których zebrano odpowiednio maksymalne i minimalne wartości prędkości zarejestrowane w przepływie pulsacyjnym. Wartości te wyznaczono jako średnie z pięciu odpowiednich ekstremów.

v [m/s]	Tryb pracy modułu	v _{osc,max} [m/s]	v _{osc,min} [m/s]	$v_{osc,a}$ [m/s]	$v_{osc,m}$ [m/s]	v _{osc,mean} [m/s]
1.6	1	2.23	1.26	0.48	1.74	1.52
1.6	2	2.22	1.28	0.47	1.75	1.55
1.6	3	1.78	1.52	0.13	1.65	1.61
9.4	1	13.73	8.00	2.86	10.86	9.94
9.4	2	13.24	8.16	2.54	10.70	9.89
9.4	3	10.69	9.09	0.80	9.89	9.76
19.4	1	26.29	16.50	4.90	21.40	20.06
19.4	2	24.62	16.88	3.87	20.75	19.99
19.4	3	21.44	18.67	1.38	20.05	19.87

Tab. 2. Parametry strugi powietrza z uruchomionym MWPD

Cykliczny ruch płatów MWPD wprowadzał cykliczne zaburzenia do analizowanego przepływu. Jeśliby przeanalizować kształty pojedynczych okresów każdego z czasowych przebiegów prędkości, to okaże się, że odbiegają one od kształtu trójkąta równoramiennego. Najbardziej zbliżone do niego są przebiegi dla prędkości 9.4 m/s. Pozostałe przypominają kształtem przebiegi piłokształtne, przy czym dla prędkości 1.6 m/s bardziej strome jest zbocze narastające, a dla prędkości 19.4 m/s – zbocze opadające. Tryb 3 okazał się najmniej wrażliwy na zmianę kształtu w kierunku piły, jedynie w miarę wzrostu prędkości zaokrągleniu ulegał wierzchołek piku.

Zostało to zobrazowane na rysunku 4, gdzie linią ciągłą oznaczono zarejestrowane przebiegi czasowe prędkości. Liniami kropkowaną i przerywaną oznaczono odpowiednio przebiegi powstałe z przefiltrowania sygnału prędkości filtrem dolnoprzepustowym z progiem odcięcia tuż powyżej częstotliwości własnej (ruchu płatów MWPD) oraz tuż powyżej czwartej harmonicznej. Pierwszy z nich reprezentuje zatem przebieg w przybliżeniu sinusoidalny, będący osnową przebiegu rzeczywistego. Drugi stosunkowo wiernie odtwarza już przebieg rzeczywisty. Wynika to z faktu, że znakomita większość informacji o sygnale wejściowym jest zawarta w przedziale częstotliwości do czwartej harmonicznej włącznie.

Jest to dobrze widoczne na widmach amplitudowych zarejestrowanych przebiegów prędkości (Rys. 5). Pik odpowiadający częstotliwości ruchu płatów MWPD oraz pierwsze 3-6 jego harmonicznych posiada amplitudy znacząco większe od wszystkich pozostałych. Skala częstotliwości została ograniczona do pierwszych 10 Hz, ponieważ w tej części znajdują się najistotniejsze informacje. W pozostałej części dziedziny wartości amplitud tylko maleją.

Wyznaczenie poziomu turbulencji w analizowanym przepływie nie jest zagadnieniem łatwym ani jednoznacznym. Autorzy niniejszej pracy proponują podejście pół-empiryczne, tzn. na podstawie ogólnie przyjętej definicji intensywności turbulencji I_t (1) [Elsner i Drobniak, 1995]:

$$I_t = \frac{\sqrt{\frac{1}{3} \left(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2\right)}}{\overline{v}} \tag{1}$$

gdzie:

 σ_x , σ_y , σ_z – odchylenia standardowe składowych prędkości wzdłuż osi x, y i z,

 \overline{v} – średnia prędkość napływu powietrza.



Rys. 4. Fragmenty zarejestrowanych przebiegów czasowych wartości wektora prędkości w prezentacji graficznej pozwalającej na wizualną ocenę kształtu każdego przebiegu oraz porównanie ich między sobą. Na wykresy naniesiono również przebiegi przefiltrowane filtrem dolnoprzepustowym z progiem odcięcia tuż powyżej częstotliwości własnej (linia kropkowana) oraz tuż powyżej czwartej harmonicznej (linia przerywana)

Wyznaczono rodziny współczynników turbulencji² $I_t^*(f_{filtr})$ w taki sposób, że każdą kolejną wartość z rodziny otrzymywano na podstawie analizy przebiegu prędkości filtrowanego filtrem górnoprzepustowym z rosnąca wartością częstotliwości progowej f_{filtr} (Rys. 6). Wartości f_{filtr} dobierano tak, by znajdowały się pomiędzy pikami w widmach częstotliwościowych sygnału oryginalnego.

Z rysunku 6 wynika, że w przeważającej liczbie przypadków istotny spadek wartości współczynnika turbulencji uzyskujemy do częstotliwości progowej ok. 2 Hz. Usuwanie wyższych częstotliwości z sygnału prędkości nie powoduje już tak intensywnej zmiany wartości $I_t^*(f_{filtr})$. Oznacza to, że zasadniczy wkład w wartość $I_t^*(f_{filtr})$ mają płynne zmiany prędkości (falowanie prędkości). Trudno jednak stwierdzić, stosując opisaną procedurę, gdzie znajduje się granica, do której odfiltrowaniu ulega jedynie wspomniane falowanie prędkości, a po której usuwane są również zaburzenia turbulentne. Jest to jednakże niejasność definicyjna wynikająca z niemożności odróżnienia celowej zmiany prędkości chwilowej od niezamierzonego jej zaburzenia. Można przypuszczać, że zaburzenie to również może mieć dwoistą naturę. Może być niezamierzone, ale o charakterze systematycznym i wynikać np. z niedostatecznej kontroli nad procesem modulacji przepływu. Zaburzenie takie będzie miało reprezentację w postaci co najmniej jednego piku na widmie amplitudowym. Jego przeciwieństwem będzie zaburzenie stochastyczne, które wnosi wkład w turbulencję przepływu. Jego obecności nie sposób dostrzec na widmie amplitudowym, ponieważ ma charakter przypadkowy i najczęściej wieloczęstotliwościowy.

² Być może dyskusyjne jest zastosowanie w tym przypadku tego określenia, jednak autorzy nie znaleźli w literaturze bardziej odpowiedniego.



Rys. 5. Widma amplitudowe przebiegów czasowych wartości wektora prędkości (amplituda w skali logarytmicznej)



Rys. 6. Wykresy rodzin współczynników turbulencji

Dla ustalenia poziomów odniesienia na wykresach naniesiono linię w kolorze zielonym (szersza linia pozioma), która określa intensywność turbulencji w przestrzeni pomiarowej tunelu pod nieobecność MWPD. Natomiast kolorem niebieskim (węższa linia pozioma) oznaczono linię, która określa poziom intensywności turbulencji z obecnym, ale niedziałającym MWPD. Poziom ten wyznaczano na podstawie pierwszego etapu każdego pomiaru, w którym MWPD nie został jeszcze uruchomiony. Taka procedura jest źródłem niewielkich różnic obserwowanych na wykresach odpowiadających tej samej prędkości napływu.

Punkty przecięcia poszczególnych wykresów $I_t^*(f_{filtr})$ z wymienionymi powyżej liniami nie wykazują wyraźnej prawidłowości, ani ze względu na tryb pracy MWPD, ani ze względu na prędkość napływu. Można co najwyżej stwierdzić, że dla trybu 3 uzyskano najniższe wartości $I_t^*(f_{filtr})$ w analizowanym zakresie częstotliwości progowych, co pozostaje w bezpośredniej korelacji z kształtem przebiegów czasowych wartości wektora prędkości (rys. 4). W trybie 3 przebiegi te były najbardziej zbliżone kształtem do funkcji sinus.

5. Uwagi końcowe

Wykonane badania mają charakter poglądowy. Zostały przeprowadzone, żeby sprawdzić użyteczność MWPD do generowania przepływów zmiennych w czasie w sposób powtarzalny i przewidywalny. Pozytywne wyniki tych prac prowadzą do wniosku, że będzie możliwe zastosowanie MWPD do badań, w których dużą rolę odgrywa dynamika przepływów, a więc np. nad czynnikami generującymi błędy pomiarów niestacjo-narnej prędkości przepływu powietrza.

Parametry pracy MWPD oraz prędkości przepływu powietrza przyjęto arbitralnie w umiarkowanym zakresie zmienności po to, aby móc w spójny sposób porównać uzyskane wyniki. Analiza możliwości technicznych MWPD będzie tematem oddzielnej rozprawy.

W przyszłości, podczas dwutorowego (eksperyment i CFD) prowadzenia prac nad wybranym zagadnieniem badawczym, konieczne będzie dostosowanie parametrów pracy MWPD oraz wykonanie analizy aktualnych warunków pomiarowych w celu poznania warunków brzegowych dla ścieżki CFD. Wyniki opisane w niniejszej publikacji stanowią dobry punkt startowy do takich prac, ponieważ już na etapie planowania eksperymentów dają wyobrażenie o tym, jakich warunków brzegowych można się spodziewać.

Praca została wykonana w roku 2016 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Bujalski M., Gawor M., Sobczyk J., (2013). *Tunelu aerodynamiczny o obiegu zamkniętym, ze stabilizacją temperatury i wilgotności powietrza, przystosowany do pomiarów metodami optycznymi*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN Tom 15, nr 1-2, s. 65-74
- Elsner J., Drobniak S., (1995). *Metrologia turbulencji przepływów. Maszyny Przepływowe*. T. 18. Zakład Narodowy im. Ossolińskich Wydawnictwo PAN. Wrocław-Warszawa-Kraków.
- Fonte F., Riccobene L., Ricci S., Adden S., Martegani M., (2016). Design, manufacturing and validation of a gust generator for wind tunnel test of a large scale aeroelastic model. 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Science, Daejeon, 25-30.09.
- Jamróz P., Socha K., Ligęza P., Poleszczyk E., Skotniczny P., Bujalski M., (2014). *Analiza wpływu właściwości dynamicznych przyrządów pomiarowych na dokładność pomiarów wybranych parametrów środowiska*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN Tom 16, nr 3-4, s. 31-36.
- Ligęza P., Poleszczyk E., (2004). *Termoanemometryczne metody pomiaru prędkości aparatura pomiarowa w kopalni*. Archives of Mining Sciences 49. Special Issue 141-150.
- Mai H., Neumann J., Hennings H., (2011). *Gust response: a validation experiment and preliminary numerical simulations*. Proceedings "IFASD 2011". IFASD 2011 – 15th International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics, Paris, 27-30.06.
- Navarro-Medina F., Sanz-Andres A., Perez-Grande I., (2012). *Gust wind tunnel study on ballast pick-up by high-speed trains*. Experiments in Fluids, vol. 52, Issue 1.
- Passmore M.A., Richardson S., Imam A., (2001). An experimental study of unsteady vehicle aerodynamics. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D: Journal of Automobile Engineering, 215(7), pp. 779-788.
- Poleszczyk E. (2002). *Termoanemometryczna metoda wyznaczania wektora prędkości przepływu gazu*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu Rozprawy, Monografie 1.

- Roadman J.M., Mohseni K., (2009). *Gust characterization and generation for wind tunnel testing of micro aerial vehicles*. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando 5-8. 01.
- Skotniczny P., Jamróz P., Ligęza P., Poleszczyk E., (2014). Wielokanałowy system termoanemometryczny do wyznaczania zaawansowanych parametrów przepływowych powietrza w wyrobisku kopalnianym. Wybrane problemy eksploatacji pokładów węgla kamiennego ze szczególnym uwzględnieniem zagrożeń aerologicznych. Główny Instytut Górnictwa, Katowice.
- Sobczyk J., Wodziak W., Gawor M., (2016). Badania przepływów dynamicznych w tunelu aerodynamicznym przy użyciu cyfrowej anemometrii obrazowej. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN Tom 18, nr 4, s. 181-186.

Investigation of dynamic flows in a wind tunnel with use of hot-wire anemometer

Abstract

This paper presents investigations of dynamic flows generated in wind tunnel. Gust generator device installed on measuring chamber inlet was used to produce unsteady velocity fields. Measurements were made by using three-fiber hot wire anemometer for three modes and three inflow velocities. Time waveform, amplitude spectrum of velocity vector and turbulence intensity were showed. Results described on this paper can be used to determine boundary conditions in future dynamic flow investigations in wind tunnel.

Keywords: dynamic flows, dynamic flows generator, hot-wire velocimetry, wind tunnel