

ZASTOSOWANIA TERMOANEMOMETRÓW DWUWŁÓKNOWYCH DO POMIARÓW PRĘDKOŚCI PRZEPLYWÓW TURBULENTNYCH

Ewa BŁAZIK-BOROWA^{*}, Jarosław BĘC^{**}, Tomasz LIPECKI^{***}, Jacek SZULEJ^{****}

^{} Politechnika Lubelska, Katedra Mechaniki Budowli
ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, e-mail: e.blazik@pollub.pl*

*^{**} Politechnika Lubelska, Katedra Mechaniki Budowli
ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, e-mail: j.bec@pollub.pl*

*^{***} Politechnika Lubelska, Katedra Mechaniki Budowli
ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, e-mail: t.lipecki@pollub.pl*

*^{****} Politechnika Lubelska, Katedra Mechaniki Budowli
ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, e-mail: j.szulej@pollub.pl*

Streszczenie: W pracy przedstawiono metodę wykorzystania pomiarów termooanemometrów dwuwłóknowymi do wyznaczenia takich parametrów przepływu płaskiego w tunelu aerodynamicznym, jak składowe prędkości i ich fluktuacje, energię kinetyczną turbulencji oraz gęstości widmowe mocy. Termooanemometry dwuwłókowe w znacznie bardziej ograniczonym zakresie, ale mogą być także wykorzystane do pomiarów składowych średnich prędkości w przepływie przestrzennym, co zostanie również przedstawione w pracy.

Słowa kluczowe: Tunel aerodynamiczny, składowe prędkości, fluktuacje składowych prędkości, przepływ płaski i przestrzenny

1. WSTĘP

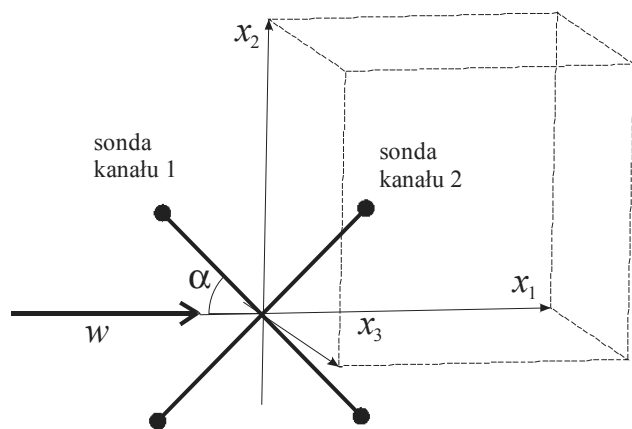
Pomiary składowych prędkości i ich fluktuacji są jednymi z ważniejszych elementów badań w tunelu aerodynamicznym, natomiast jednymi z częściej wykorzystywanych do tego celu urządzeń są termooanemometry (por. [1], [2], [3], [4] i [6]). W tej chwili coraz częściej do pomiarów parametrów przepływu stosuje się urządzenia laserowe. Jednak ze względu na ich cenę i dość skomplikowany sposób interpretacji wyników nadal w tunelach aerodynamicznych częściej używane są termooanemometry. W pracy zostaną opisane możliwości wykorzystania termooanemometrów dwuwłóknowych do pomiarów składowych prędkości i ich fluktuacji w przepływie płaskim oraz pomiarów składowych średnich prędkości w przepływie trójwymiarowym wraz z przedstawieniem możliwości i ograniczeń tego typu badań. Teoretyczne podstawy działania termooanometru czyli wykazanie zależności intensywności wymiany ciepła w cieple

od prędkości płynu wokół niego, opracował już na początku XX w. King [5]. Opis działania i interpretacji wyników przez lata był rozwijany a osiągnięcia z tego zakresu opisano m.in. w pracach [2], [3], [4] i [6]. W termooanemometrach wymiana ciepła zachodzi pomiędzy cienkim ogrzanym drutem i poruszającym się wokół niego płynem. Wzrost prędkości przepływu powoduje zmniejszenie temperatury, co powoduje zmianę oporu czujnika i odczytywanego napięcia. Każdy termooanemometr ma swoją charakterystykę napięcie-prędkość, która jest wyznaczana przez producenta. Ponieważ zmiana temperatury włókna zależy jedynie od prędkości a nie zależy od kierunku, to odczyty z czujników są zawsze dodatnie a na uzyskany odczyt ma wpływ zarówno składowa prędkości prostopadła jak i równoległa do włókien. Między innymi te dwa aspekty oraz fakt, że włókna są ułożone pod nieznanym kątem względem średniego napływu, muszą być uwzględnione podczas analizy wyników, której metodyka zostanie opisana poniżej w odniesieniu do termooanemometrów dwuwłóknowych.

2. KALIBRACJA TERMOANEMOMETRÓW W TUNELU AERODYNAMICZNYM

Kalibracja termooanemometrów dwuwłóknowych w tunelu aerodynamicznym polega na określeniu kąta pomiędzy średnim napływem, a włóknami oraz współczynników, które zniwelują błędy kalibracji producenta, wpływ składowej prędkości równoległej do włókien na odczyt oraz ewentualne wychylenie płaszczyzny włókien z płaszczyzny średniego napływu. Termooanemometry dwuwłóknowe

umożliwiają pomiar zmiennych w czasie dwóch składowych prędkości prostopadłych do ich włókien. Jeżeli mamy do czynienia z przepływem płaskim, to można ustawić włókna w taki sposób, że znajdują się w płaszczyźnie przepływu (rys. 1). Podczas kalibracji tak ustawiony termooanemometr należy umieścić w przepływie nie tylko płaskim, ale także jednokierunkowym o poziomej średniej wypadkowej prędkości w . Podczas kalibracji należy kontrolować średni pomiar prędkości innymi urządzeniami, np. termooanemometrami jednowłóknowymi lub skanerem ciśnień. To drugie urządzenie pozwala na uzyskanie lepszych rezultatów, ponieważ mierzy bezpośrednio wypadkową prędkość, natomiast termooanometry jednowłóknowe mogą być obciążone błędami, wynikającymi tak jak w przypadku termooanemometrów dwuwłóknowych z wychylenia z płaszczyzny pomiaru.



Rys. 1. Ustawienie włókien termooanemometru równoległe do średniego kierunku przepływu.

Fig. 1. Setting of the anemometer wires which are parallel to the average flow direction.

Z takiego zestawu urządzeń dostajemy przebiegi czasowe dwóch odczytów z włókien termooanemometru oraz jednego odczytu urządzenia kontrolującego. Ze wszystkich odczytów należy usunąć wartość średnią tła, zmierzoną przed uruchomieniem wentylatora, i wyznaczyć wartości średnie, tzn: w_s – średnia z odczytów z urządzenia kontrolującego, d_1 i d_2 – średnie z odczytów z dwóch kanałów. Odczyty z włókien d_1 i d_2 a prędkościami w układzie lokalnym włókien v_1 i v_2 są opisane następującymi zależnościami (por. [3] i [6]):

$$d_1 = v_1 + kv_2, \quad (1)$$

$$d_2 = v_2 + kv_1, \quad (2)$$

gdzie: k – współczynnik, który zależy od rodzaju włókna i od wychylenia sond z płaszczyzny pomiaru, i uwzględnia wpływ składowej prędkości równoległej do włókna na ostateczny odczyt z tego włókna.

Po przekształceniu równ. (1) i (2) otrzymujemy wzory na składowe prędkości w układzie lokalnym włókien:

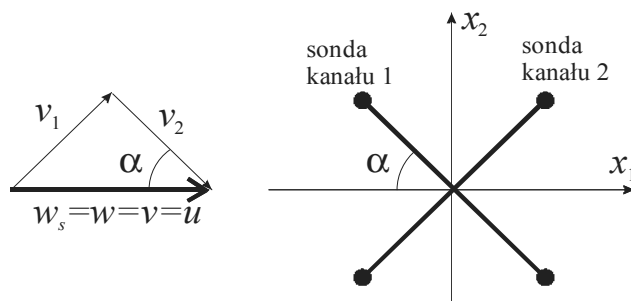
$$v_1 = \frac{d_1 - kd_2}{1 - k^2}, \quad (3)$$

$$v_2 = \frac{d_2 - kd_1}{1 - k^2}. \quad (4)$$

Ponieważ wypadkowa z odczytów z termooanometru dwuwłóknowego musi być równa prędkości napływu w_s , to współczynnik k musi spełniać następującą zależność:

$$w_s^2 = \frac{(d_1 - kd_2)^2 + (d_2 - kd_1)^2}{(1 - k^2)^2} \quad (5)$$

i na tej podstawie może być wyznaczony podczas pomiarów. W pomiarach wykonywanych w 2010r. za pomocą trzech różnych zestawów ATU, wyprodukowanych przez Instytut Mechaniki Górotworu PAN, współczynnik ten wahał się w granicach od 0,07 do 0,13.



Rys. 2. Składowe prędkości w układzie lokalnym włókien.

Fig. 2. The components of the velocity in the wires local coordinate system.

Drugim etapem kalibracji jest określenie funkcji trygonometrycznych kąta α pomiędzy średnim kierunkiem napływu a sondą kanału 1 (rys.2). Jeżeli znamy składowe prędkości oraz wypadkową, to te funkcje muszą spełniać następujące zależności:

$$\sin \alpha = \frac{v_1}{w_s}, \quad (6)$$

$$\cos \alpha = \frac{v_2}{w_s}. \quad (7)$$

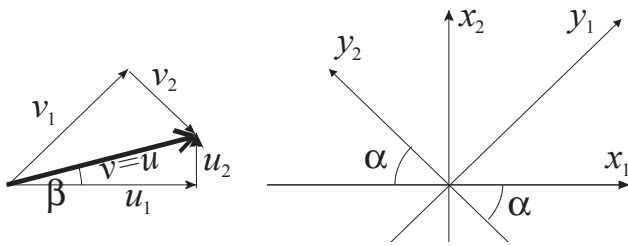
Dopiero po wyznaczeniu parametrów k i funkcji trygonometrycznych kątów α dla wszystkich czujników można przystąpić do właściwych pomiarów.

3. POMIARY PARAMETRÓW TURBULENTNEGO PRZEPLYWU PŁASKIEGO

Jak widać na rys.1 i rys. 2 włókna są ustawione tak, aby kąt $\alpha \sim 45^\circ$. Wynika to stąd, że odczyty z włókien są zawsze dodatnie i w przypadku, gdy kąt β pomiędzy chwilowym kierunkiem napływu i kierunkiem poziomym zawiera się w przedziale od $-\alpha$ do $\pi/2-\alpha$ (rys. 3), składowe prędkości u_1 i u_2 w układzie globalnym można wyznaczyć ze zwykłych wzorów transformacyjnych:

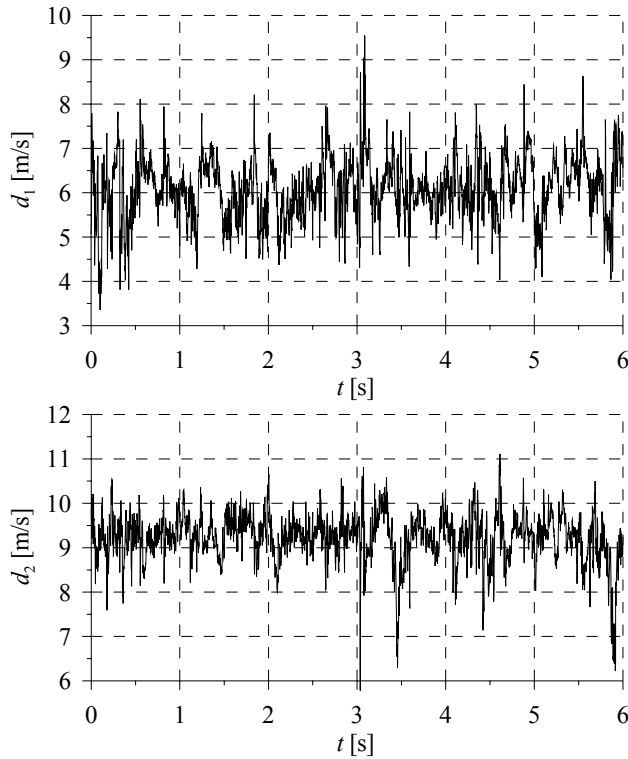
$$u_1 = v_1 \sin \alpha + v_2 \cos \alpha, \quad (8)$$

$$u_2 = v_1 \cos \alpha - v_2 \sin \alpha. \quad (9)$$

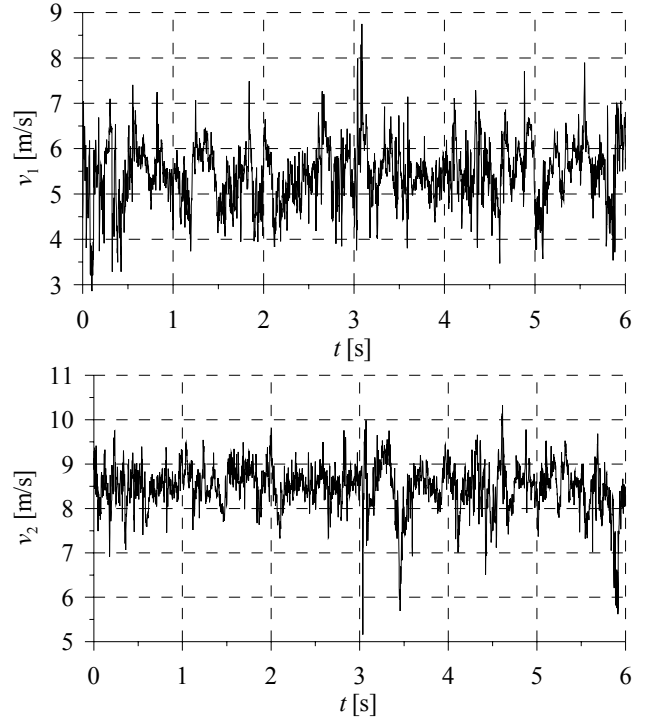


Rys. 3. Ustawienie składowych prędkości względem osi układu współrzędnych.

Fig. 3. Wind speed components with regard to the axes of the coordinate system.

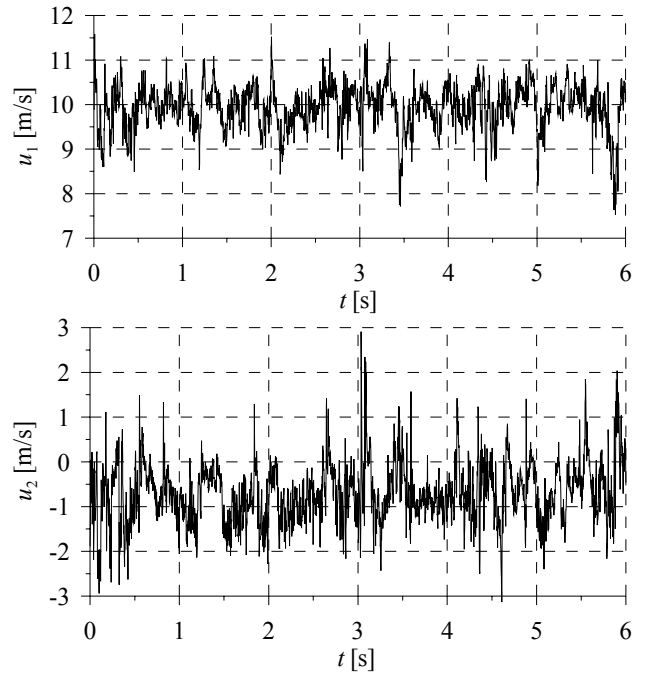


Rys. 4. Odczyty z dwóch włókien czujnika na wysokości 75 cm.
Fig. 4. Readings from two probe wires at the height 75 cm.



Rys. 5. Składowe prędkości w układzie lokalnym włókien na wysokości 75 cm.

Fig. 5. Wind speed components measured at the 75 cm height in the local coordinate system.



Rys. 6. Składowe prędkości w układzie globalnym na wysokości 75 cm.

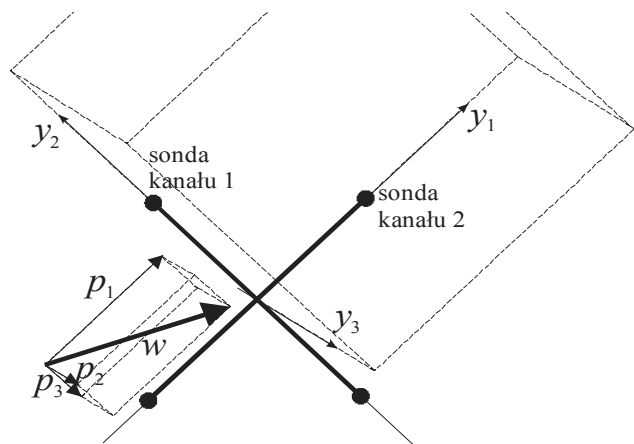
Fig. 6. Wind speed components measured at the 75 cm height in the global coordinate system.

Jeżeli nie ma pewności, że warunek $-\alpha < \beta < \pi/2 - \alpha$ jest spełniony, to należy pomiary powtórzyć przy takim kącie nachylenia włókien, przy którym składowe w układzie lokalnym włókien będą dodatnie.

Na rys. 4 pokazano przykładowy odczyt z dwóch włókien czujnika. Rys. 5 przedstawiony jest przebieg czasowy składowych prędkości w układzie lokalnym włókien, otrzymany na podstawie równań (4) i (5), a na rys. 6 pokazane są ostateczne wyniki czyli składowe prędkości w układzie globalnym, uzyskane ze wzorów (8) i (9). Na podstawie tak wyznaczonych przebiegów czasowych można wyznaczyć składowe średniej prędkości, ich odchylenia standardowe, energię kinetyczną turbulencji, składowe tensora Reynoldsa, gęstości widmowe mocy oraz skalę turbulencji. Opisana powyżej metoda wyznaczania parametrów przepływu turbulentnego została wykorzystana m.in. w pracy [1] do badania opływu wokół prostokątów oraz badania struktury przepływu w tunelu aerodynamicznym Laboratorium Inżynierii Wiatrowej Politechniki Krakowskiej.

4. POMIARY PARAMETRÓW TURBULENTNEGO PRZEPLYWU PRZESTRZENNEGO

Termoanemometry dwuwłókowe mogą być wykorzystane do pomiarów składowych prędkości przepływu przestrzennego, ale w ograniczonym zakresie. Przed przystąpieniem do pomiarów należy tak, jak w przypadku pomiarów parametrów przepływu płaskiego należy wykonać kalibrację termoanemometrów w sposób opisany w poprzednim punkcie. Z kalibracji otrzymujemy informacje o nachyleniu włókien do płaszczyzny poziomej oraz współczynniku wpływu składowej przepływu równoległej do włókna na odczyt.



Rys. 7. Składowe prędkości w układzie lokalnym włókien.
Fig. 7. Wind speed components in the local coordinate system of the wires.

W przypadku przepływu trójwymiarowego odczyt z danego włókna jest sumą wpływu, wynikającego z przepływu

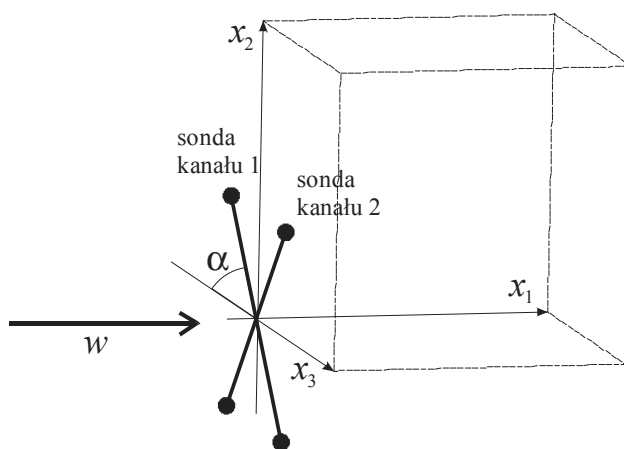
wzdłuż włókna, oraz prędkości prostopadłej do osi włókna (rys.7):

$$m_1 = kp_2 + \sqrt{p_1^2 + p_3^2}, \quad (10)$$

$$m_2 = kp_1 + \sqrt{p_2^2 + p_3^2}. \quad (11)$$

Ponieważ w układzie dwóch równań (10) i (11) mamy trzy nieznanne składowe, to na tej podstawie nie można ich wyznaczyć. Wyznaczenie wszystkich składowych wymaga dodatkowych równań, które można uzyskać poprzez wykonanie pomiarów w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach:

- w ustawieniu I – pokazanym na rys.1 czyli w płaszczyźnie średniego kierunku przepływu,
- w ustawieniu II – pokazanym na rys.8 czyli w płaszczyźnie prostopadłej do średniego kierunku przepływu.



Rys. 8. Ustawienie włókien termoanemometru prostopadle do średniego kierunku przepływu.
Fig. 8. Setting the probe wires perpendicular to the average flow direction.

Z dwóch wymienionych ustawień otrzymujemy cztery równania:

$$d_1 = kp_2 + \sqrt{p_1^2 + p_3^2}, \quad (12)$$

$$d_2 = kp_1 + \sqrt{p_2^2 + p_3^2}. \quad (13)$$

$$c_1 = kq_2 + \sqrt{q_1^2 + q_3^2}, \quad (14)$$

$$c_2 = kq_1 + \sqrt{q_2^2 + q_3^2}, \quad (15)$$

gdzie: d_1, d_2 - odczyty z kanałów termoanemometru w ustawieniu I, c_1, c_2 - odczyty z kanałów termoanemometru w ustawieniu II, p_1, p_2, p_3 - składowe prędkości w układzie lokalnym włókien w ustawieniu I, q_1, q_2, q_3 - składowe prędkości w układzie lokalnym włókien w ustawieniu II.

Pomiędzy składowymi prędkościami w układach lokalnych obu ustawień włókien oraz składowymi prędkościami w układzie globalnym zachodzą następujące zależności (rys.9):

$$u_1 = v_1 \sin \alpha + v_2 \cos \alpha, \quad (16)$$

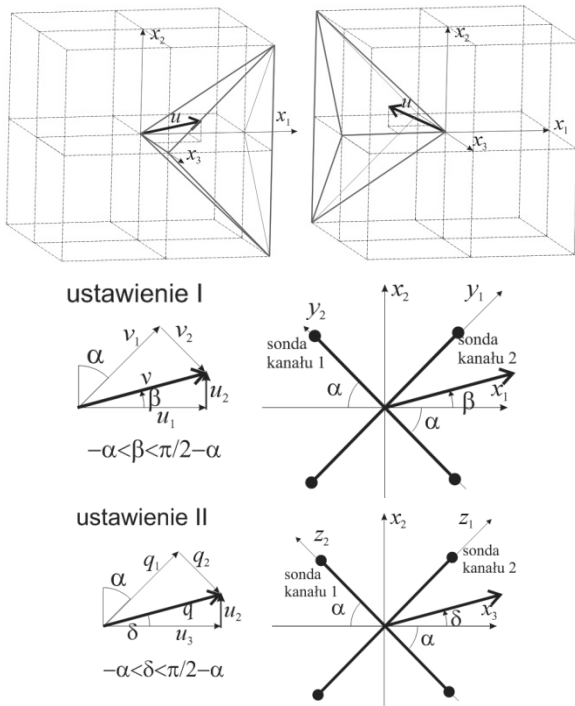
$$u_2 = v_1 \cos \alpha - v_2 \sin \alpha, \quad (17)$$

$$|u_3| = v_3, \quad (18)$$

$$u_3 = q_1 \sin \alpha + q_2 \cos \alpha, \quad (19)$$

$$u_2 = q_1 \cos \alpha - q_2 \sin \alpha, \quad (20)$$

$$|u_1| = q_3. \quad (21)$$



Rys. 9. Wzajemny układ składowych prędkości w układach lokalnych i globalnym dla kierunku napływu A.

Fig. 9. Wind speed components in local and global coordinate systems for the wind inflow direction A.

W układzie dziesięciu równań (12÷21) mamy dziewięć niewiadomych czyli po rozwiązaniu tego układu powinniśmy uzyskać zarówno odczyty z włókien jak i składowe przepływy. Niestety wzory (16÷21) są prawdziwe tylko wtedy, gdy kierunek i zwrot prędkości w punkcie są zgodne z pokazanymi na rys.9. Wynika stąd, że odczyty z termooanemometrów są zawsze dodatnie i trudno na ich podstawie określić kierunek prędkości. Po to, aby zobrazować problem, na rys.10 pokazany jest inny kierunek napływu, dla którego są ważne następujące zależności:

$$u_1 = v_1 \sin \alpha + v_2 \cos \alpha, \quad (22)$$

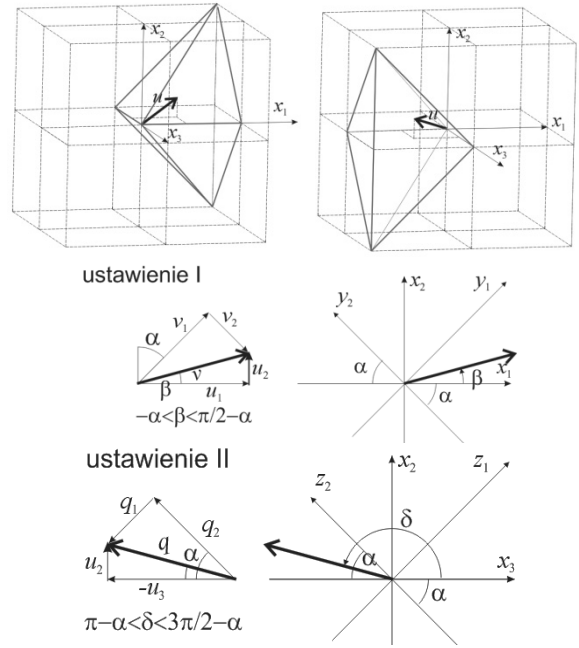
$$u_2 = v_1 \cos \alpha - v_2 \sin \alpha, \quad (23)$$

$$|u_3| = v_3, \quad (24)$$

$$u_3 = -q_1 \sin \alpha - q_2 \cos \alpha, \quad (25)$$

$$u_2 = -q_1 \cos \alpha + q_2 \sin \alpha, \quad (26)$$

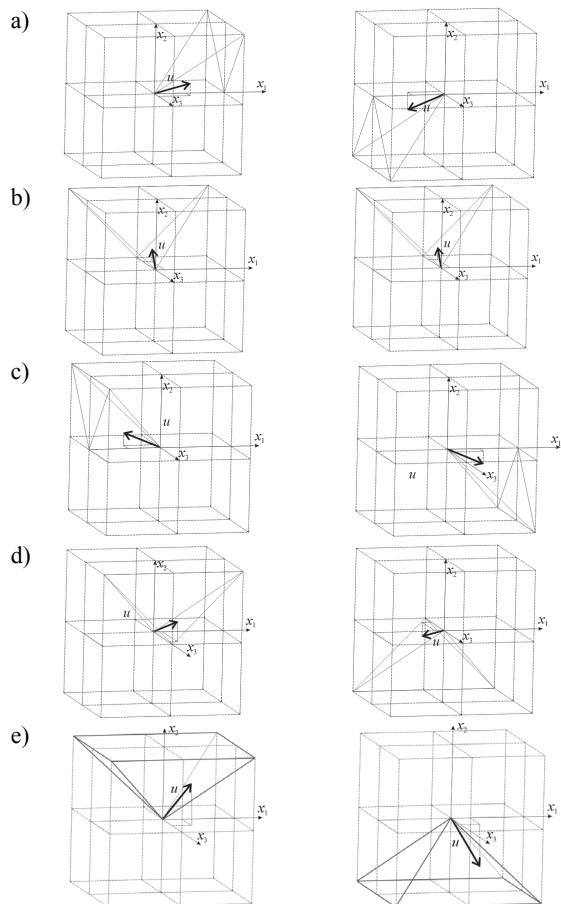
$$|u_1| = q_3. \quad (27)$$



Rys. 10. Wzajemny układ składowych prędkości w układach lokalnych i globalnym dla kierunku napływu B.

Fig. 10. Wind speed components in local and global coordinate systems for the wind inflow direction B.

Takich różnych układów jest siedem (rys. 10), przy czym dany zestaw wyników spełnia tylko jeden układ równań. W celu wyznaczenia, który układ równań jest prawidłowy, można wykorzystać fakt, że mamy więcej równań niż niewiadomych, tzn. rozwiązujemy siedem różnych układów równań, ale z wykorzystaniem tylko dziewięciu pierwszych równań. Następnie wyniki podstawiamy do dziesiątego równania i sprawdzamy, który zestaw wyników spełnia to ostatnie równanie. W ten sposób określone rozwiązanie też nie daje jednoznacznej odpowiedzi, bo jak pokazano na rys.9 i rys. 10, każdy zestaw równań odpowiada dwóm kierunkom napływu. Ostateczny wybór kierunku może być wykonany na podstawie bądź intuicji bądź z wykorzystaniem sprawdzających obliczeń komputerowych.



Rys. 11. Kierunki i zwroty wektorów prędkości w układzie globalnym dla kierunków napływu: a) C, b) D, c) E, d) F, e) G.

Fig. 11. The directions and senses of velocity vectors in global coordinate systems for the inflow direction: : a) C, b) D, c) E, d) F, e) G..

W niniejszym punkcie przedstawiono procedurę wyznaczania składowych prędkości w turbulentnym przepływie przestrzennym, ale wyraźnie trzeba powiedzieć, że podstawową wadą tej procedury jest konieczność użycia pomiarów z dwóch różnych ustawień termoanemometrów w tym samym punkcie i w tym samym czasie. Wykonanie takich pomiarów jest niemożliwe, dlatego proponuje się kolejne wykonanie pomiarów w tym samym punkcie, a zaproponowaną procedurę należy zastosować tylko do wyznaczenia składowych wartości średnich przepływu. Niestety w ten sposób wiele istotnych informacji o przepływie jest niemożliwe do uzyskania, dlatego w przyszłości planuje się badania nad możliwością wykonywania jednocześnie pomiarów w dwóch blisko położonych od siebie punktach. Takie badania zawierać będą analizę możliwych ustawień, przy których sondy nie wprowadzałyby zbyt dużych zaburzeń, oraz zależności między prędkościami przepływu w dwóch blisko położonych punktach.

5. WNIOSKI

Termoanemometry są użytecznym narzędziem pomiarowym, ale niestety o ograniczonym zakresie stosowania. Pomiary parametrów przepływów płaskich są wykonywane dość dokładnie, natomiast pomiary przepływów trójwymiarowych wymagają znacznej precyzji wykonania pomiarów i weryfikacji np. za pomocą obliczeń. Niestety mimo takiej kontroli, pomiary prędkości turbulentnego przepływu trójwymiarowego mogą być obarczone znacznymi błędami.

Artykuł został opracowany w ramach grantu MNiSzW N506 267337

THE APPLICATION OF THE X HOT-WIRE ANEMOMETERS FOR MEASUREMENTS OF TURBULENT FLOW VELOCITIES

Summary: The method for the X hot-wire anemometer measurements in obtaining of such parameters of planar flows in the wind tunnel as wind speed components and their fluctuation, turbulence kinetic energy and power spectral density function. X hot-wire anemometer may be used for measurements of mean wind speeds in spatial flows, but in a very limited range, which has been presented in the paper.

Literatura

- [1] Błazik-Borowa E. *Problemy związane ze stosowaniem modelu turbulencji k-ε do wyznaczania parametrów przepływu*, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2008.
- [2] Elsner J.W., *Turbulencja przepływów*, PWN, Warszawa 1987.
- [3] Evans R.L., *Free stream turbulence effects on the turbulent boundary layer*, Report Nr 1282 for Procurement Executive, Ministry of Defence USA, 1974.
- [4] Hinze J.O., *Turbulence*, drugie wydanie, McGraw-Hill, Nowy York 1975.
- [5] King L.V., *On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid determination of the convection constants of small platinum wires with application to hot-wire anemometry*, Phil. Trans. R. Soc., Londyn 1914.
- [6] Shabbir A., Beuther P.D. i George W.K. *X-wire response in turbulent flows of high-intensity turbulence and low mean velocity*, Experimental Thermal and Fluid Science, 12, 52-56, 1996.