

Anemometr z falą cieplną – generowanie i analiza sygnału

PAWEŁ LIGĘZA, JAN KIELBASA, ELŻBIETA POLESZCZYK, ANDRZEJ RACHALSKI,
KATARZYNA SOCHA, JAN PALACZ

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

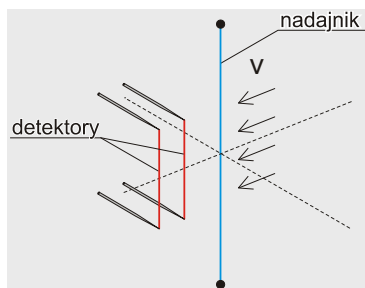
Streszczenie

Przedstawiono badania anemometru z falą cieplną, w którym źródło fali jest sygnałem posiadającym kilka dominujących składowych harmonicznych. Zastosowano sygnał będący sumą sygnałów sinusoidalnych oraz sygnał prostokątny typu MBS (*Multifrequency Binary Sequences*). Przedstawiono wyniki pomiarów prędkości przepływu i dyfuzyjności cieplnej powietrza w zakresie prędkości 5-50 cm/s.

Słowa kluczowe: termoanemometr z falą cieplną, prędkość przepływu, dyfuzyjność cieplna

1. Wstęp

Zjawisko fal cieplnych wykorzystuje się w pomiarach prędkości przepływu cieczy i gazów. Idea metody polega na określeniu czasu przelotu rozchodzącej się ośrodku fali cieplnej, pomiędzy dwoma punktami przestrzeni. W tym celu, w badanym przepływie umieszcza się źródło fali cieplnej, którym jest nagrzewany okresowo element (najczęściej są to cienkie włókna stosowane powszechnie w termoanemometrach). W pewnej odległości od źródła, zgodnie z kierunkiem przepływu znajduje się jeden lub dwa detektory fali cieplnej, w postaci cienkowłóknowych termometrów rezystancyjnych. Na rys. 1 przedstawiono układ przestrzenny nadajnika i detektorów fali, jaki zastosowano w niniejszej pracy.



Rys. 1. Konfiguracja przestrzenna sondy pomiarowej

Z uwagi na rodzaj zastosowanej fali wyróżniamy metody pomiaru z zastosowaniem fali ciągłej: sinusoidalnej [1-3], prostokątnej [4] oraz impulsowej – *pulsed wire anemometry* (PWA) [5-6]. W wyżej wymienionych metodach używa się sygnałów o jednej, ustalonej częstotliwości; można też zastosować sygnał złożony będący sumą sygnałów sinusoidalnych [7] lub sygnał losowo zmienny [8].

Zjawisko propagacji fal cieplnych jest szeroko stosowane również do pomiaru dyfuzyjności cieplnej zarówno ciał stałych (często o złożonej budowie jak np. półprzewodnikowe elementy elektroniczne, substancje porowate nasycone cieczą lub gazem), jak i cieczy oraz gazów. W cieczech i gazach ciepło, a zatem

i fala cieplna może rozchodzić się poprzez dyfuzję i konwekcję. W nieruchomym (względem źródła fali) gazie występuje tylko dyfuzja – jeżeli pominiemy konwekcyjny przepływ spowodowany pionowym gradientem temperatury gazu. W przepływającym gazie występują oba mechanizmy propagacji fali. Dlatego też pomiary dyfuzyjności cieplnej przeprowadza się w spoczywającym gazie, natomiast w przypadku pomiaru prędkości zjawisko dyfuzji cieplnej należy uwzględnić wzorując uprzednio czujnik, lub, o ile to możliwe, przeprowadzić pomiar w takich warunkach aby dyfuzję cieplną można było pominąć.

2. Podstawy teoretyczne

Zjawisko propagacji fal cieplnych w płynącym gazie opisuje równanie zachowania energii:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \mathbf{div}(\kappa \mathbf{grad} T) - V_G \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{Q(t)}{\rho c} \quad (1)$$

gdzie T – temperatura gazu, V_G – prędkość gazu, ρ , c , κ odpowiednio gęstość, ciepło właściwe przy stałej objętości i dyfuzyjność cieplna gazu, $Q(t)$ – gęstość energii źródła fali cieplnej. Jeżeli założymy, że współczynnik dyfuzji cieplnej jest stały, to równanie (1) przyjmuje postać:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \nabla^2 T - V_G \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{Q(t)}{\rho c} \quad (2)$$

Dla periodycznego źródła fali w postaci:

$$Q(t) = Q_0 \delta(x_0) \delta(y_0) \exp(-i\omega t) \quad (3)$$

Kielbasa [9] przedstawił analityczne rozwiązanie na przesunięcie fazowe fali $\Delta\varphi$ na drodze Δx

$$\Delta\varphi(\Delta x, \omega, \kappa, V_G) = \frac{V_G \Delta x}{2\kappa} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{16\kappa^2 \omega^2}{V_G^4}} - 1 \right)} \quad (4)$$

Gdy ułamek pod pierwiastkiem staje się dostatecznie mały, czyli zachodzi:

$$\frac{16\kappa^2 \omega^2}{V_G^4} \gg 1 \quad (5)$$

to po rozwinięciu w szereg wewnętrznego pierwiastka i prostych przekształceniach dostajemy:

$$\Delta\varphi = \frac{\omega \Delta x}{V_G} \quad (6)$$

co oznacza, że prędkość gazu można uznać za równą prędkości fali temperaturowej. W tych warunkach możemy mierzyć prędkość przepływu, natomiast dyfuzyjności nie da się wyznaczyć. Jeżeli nierówność (5) nie jest spełniona to prędkość gazu i dyfuzyjność można wyznaczyć stosując różne częstotliwości fali. Otrzymujemy wówczas układ równań:

$$\Delta\varphi_i(\Delta x, \omega_i, \kappa, V_G) = \frac{V_G \Delta x}{2\kappa} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{16\kappa^2 \omega_i^2}{V_G^4}} - 1 \right)} \quad (7)$$

który, uwagi na niedokładności pomiaru przesunięcia fazy może być sprzeczny. Dlatego też rozwiązujemy go metodą estymacji nieliniowej, dopasowując zmierzone przesunięcia fazowe dla fal o różnych częstotliwościach zgodnie z równaniem (7) [10].

Zamiast stosować kolejne ciągi fal o różnych częstotliwościach wygodnie jest użyć takiego sygnału periodycznego, którego widmo zawiera przynajmniej kilka składowych harmonicznym o odpowiednio dużej amplitudzie. Wyznaczenie prędkości wymaga rozłożenia sygnału na składowe harmoniczne, i obliczenia różnicy faz dla odpowiednich częstotliwości, a następnie rozwiązania układu równań (7). Metoda ta jest poprawna gdy dyfuzyjność cieplna jest stała, gdyż można wówczas zastosować równanie (2). Ponieważ jest ono liniowe, to składowe harmoniczne sygnału rozchodzą się niezależnie.

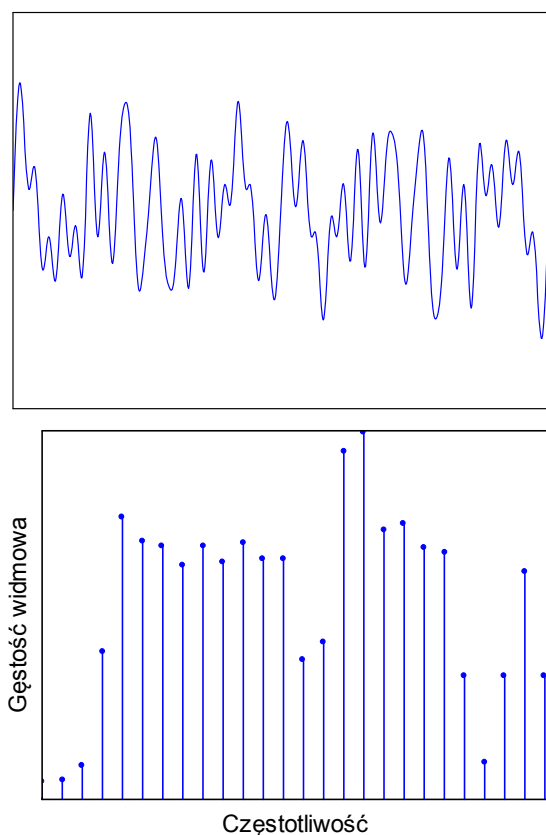
3. Sygnały złożone stosowane w anemometrze z falą cieplną

W dotychczasowych badaniach używano sygnałów sinusoidalnych i prostokątnych o ustalonej częstotliwości. Zastosowano również sygnał złożony będący sumą sygnałów sinusoidalnych o zadanej amplitudzie, częstotliwości i fazie wzajemnej w postaci:

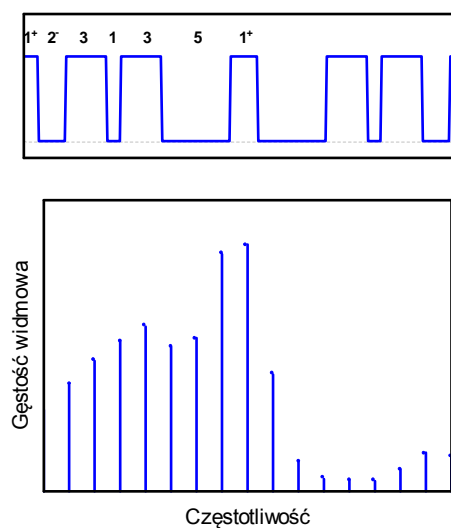
$$Q(t) = \sum_i q_i(t) = \sum_i a_i \sin(\omega_i t - \varphi_i)$$

Przykładowy sygnał i jego widmo częstotliwościowe przedstawiono na rys. 2.

Inną możliwością jest użycie jako źródła fali sygnału typu MBS (*Multifrequency Binary Sequences*). Sygnały MBS zostały wprowadzone przez van den Bossa, który podał też sposób ich konstruowania [11], gdyż nie da się ich wyznaczyć na drodze analitycznej. Są to ciągi fal prostokątnych, charakteryzujące się tym, że przeważająca część mocy sygnału jest skupiona w kilku-kilkunastu wybranych harmonicznym. W niniejszej pracy posłużono się sygnałem Stratchclyde MBS s1-8 [12]. Na rys. 3 przedstawiono przebieg sygnału i jego składowe harmoniczne. Pierwszych 8 składowych harmonicznym zawiera 76.7% mocy sygnału.



Rys. 2. Sygnał złożony z przebiegów sinusoidalnych oraz jego widmo



Rys. 3. Sygnał typu MBS Stratchclyde 1-8 oraz jego widmo

Tab. 1. Wyniki pomiaru prędkości przepływu i dyfuzyjności cieplnej powietrza metodą fal ciepłych

Częstotliwość podstawowa [Hz]	Prędkość gazu [cm/s]	Odchylenie standartowe prędkości [m/s]	Dyfuzyjność cieplna [cm ² /s]	Odchylenie standartowe dyfuzyjności [cm ² /s]
Sygnał typu MBS				
1	5,14	0,19	0,23	0,03
10	10,76	0,25	0,24	0,02
1	10,30	0,13	0,35	0,06
10	27,34	1,87	0,38	0,22
Sygnał złożony sinusoidalny				
1	6.51	0.14	0.24	0.005
1	13.36	0.022	0.25	0.005
1	49.76	0.051		

4. Badania eksperymentalne

Badania przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym, w powietrzu o temperaturze pokojowej. Nadajnik fali oraz dwa detektory wykonano z drutu wolframowego o średnicy 8 mm. Umieszczono je pionowo w jednej płaszczyźnie. Odległość pierwszego detektora od nadajnika wynosiła 1,5 mm, a odległość między detektorami 2 mm. Nadajnik fali pracował w układzie anemometru stałotemperaturowego, a detektory w układzie termometru rezystancyjnego. Do generowania fali zastosowano cyfrowy anemometr-termometr CCC'2002, który umożliwia wymuszenie przebiegu na nadajniku o zadanym kształcie [13]. Sygnały napięciowe z detektorów i nadajnika były przesyłane poprzez układ przetworników A/C do komputera, gdzie były poddawane analizie widmowej. Do analizy widmowej sygnału z detektorów zastosowano algorytm cyfrowej transformaty Fouriera.

Wyniki estymacji zmierzonego przesunięcia fazowego dla poszczególnych harmonicznych zgodnie ze wzorem (7) przedstawiono w tab. 1. Widoczna jest większa dokładność pomiaru prędkości przepływu przy użyciu sygnału sinusoidalnego. Wynika to stąd, że w analizie sygnału MBS użyto 8. harmonicznych, natomiast w przypadku sygnału sinusoidalnego 12 (rys. 2 i 3). Porównanie zmierzonych wartości dyfuzyjności cieplnej wskazuje, że pomiary przy użyciu obu sygnałów dają podobne wartości dla prędkości rzędu kilkunastu cm/s. Dla prędkości 50 cm/s wyznaczenie dyfuzyjności cieplnej nie jest możliwe, z uwagi na małą czułość wyrażenia (4) na zmianę wartości dyfuzyjności przy tej prędkości. Dokładność wyznaczenia dyfuzyjności jest również gorsza dla sygnału MBS; przyczyna jest taka sama jak w wypadku pomiaru prędkości. Obserwowany wzrost wartości dyfuzyjności z prędkością wynika ze wzrostu temperatury przepływającego gazu. Ponieważ nadajnik fali pracuje w układzie stałotemperaturowym, ze wzrostem prędkości moc oddawana do przepływającego gazu rośnie, co wywołuje wzrost temperatury gazu. Z danych literaturowych wiadomo, że dyfuzyjność cieplna powietrza rośnie ze wzrostem temperatury [14].

4. Wnioski

Przedstawiona metoda została oparta na rozwiązaniu analitycznym liniowego równania dyfuzji-konwekcji dla fal sinusoidalnych. Zastosowanie sygnału prostokątnego typu MBS o kilku dominujących harmonicznych jest uprawnione, o ile prawdziwe jest założenie, że fale o poszczególnych częstotliwościach rozchodzą się niezależnie. Wzrost wartości zmierzonych wartości dyfuzyjności wskazuje, że założenie to nie jest dokładnie spełnione. Mimo to, wyniki pomiaru można uznać za poprawne. W celu zwiększenia dokładności pomiaru należałoby zastosować analizę opartą na równaniu nieliniowym. Pożądane byłoby też użycie sygnału MBS o większej liczbie dominujących harmonicznych.

Praca została wykonana w roku 2013 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- [1] Walker R.E., Westenberg A.A., Rev. Sci. Instrum. **27**, 844 (1956).
- [2] Bauer A.B., AIAA J. **3**, 1189 (1965).
- [3] Tombach I.H., Rev. Sci. Instrum. **44**, 141 (1973).
- [5] Bradbury L.J.S., Castro I.P., J. Fluid Mech. **49**, 657 (1971).
- [6] Handford P.M., Bradshaw P., Exp. Fluids **7**, 125 (1989).
- [7] Rachalski A., Rev. Sci. Instrum. **77** (2006).
- [8] Gawor M., Materiały Konferencji Naukowej: Podstawowe Problemy Metrologii, Ustroń 2005, s. 447.
- [9] Kiełbasa J., *Fale cieplne w metrologii powolnych przepływów*, Wyd. AGH, Kraków, 1976.
- [10] Rachalski A., Rev. Sci. Instrum. **84**, 025105 (2013).
- [11] Van den Bos A., First IFAC Sym. in Automatic control, Prague (1970).
- [12] Jackowska-Strumillo L., Sankowski D., McGhee J., Henderson I.A., Measurement, **20**, 49 (1997).
- [13] Ligęza P., Exp. Fluids **29**, 505 (2000).
- [14] Mandelis A., Pang G., Rev. Sci. Instrum. **69**, 2918 (1998).

Thermal wave anemometer – signal generation and analysis

Abstract

Testing is done on a thermal wave anemometer in which the wave source is a signal composed of several dominant harmonics. The signal applied was the sum of the sine signal and the square signal of the MBS type. The results of flow velocity and air diffusion measurements were taken in the velocity range 5-50 cm/s.

Keywords: thermal wave anemometer, flow velocity, thermal diffusion