

## ANEMOMETR HYBRYDOWY

Andrzej RACHALSKI

Instytut Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk  
tel.: 696 272 095, e-mail: rachalsk@img-pan.krakow.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono anemometr będący połączeniem termooanemometru stałotemperaturowego i anemometru z falą cieplną. Współczynnik nagrzania anemometru stałotemperaturowego przyjmuje okresowo dwie różne zadane wartości, wskutek tego włókno termooanemometru jest równocześnie nadajnikiem fali temperaturowej. Składowa stała prędkości jest mierzona za pomocą anemometru z falą cieplną, natomiast anemometr stałotemperaturowy mierzy składową zmienną. Zaletą takiego układu jest możliwość ciągłego pomiaru prędkości, również mieszanin gazów o nieznanym lub zmiennym w trakcie pomiaru składzie. Przedstawiono wyniki pomiarów dla mieszaniny dwutlenku węgla z powietrzem.

**Słowa kluczowe:** pomiar prędkości przepływu, fale cieplne, anemometr stałotemperaturowy.

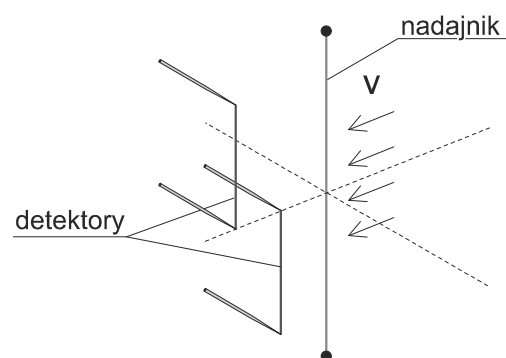
## 1. WSTĘP

Podstawą wyznaczania prędkości przepływającego strumienia gazu metodą fal cieplnych jest pomiar czasu rozchodzenia się fali temperaturowej w badanym przepływie, na znanej odległości.

Sonda pomiarowa, przedstawiona na rysunku 1 zawiera nadajnik fali w postaci cienkiego włókna i dwa detektory fali (termometry rezystancyjne), również w postaci cienkich włókien, umieszczone za nadajnikiem, w kierunku przepływu. Aby w przepływającym gazie wygenerować falę temperaturową, temperatura nadajnika musi się zmieniać w czasie. W metodzie fal cieplnych używane są różne postaci przebiegu prądu elektrycznego ogrzewającego nadajnik; może to być sygnał impulsowy [1], sinusoidalny [2,3] lub, najłatwiejszy w realizacji i najczęściej stosowany, prostokątny [4]. Ponieważ dla bardzo małych prędkości przepływu prędkość fali temperaturowej nie jest równa prędkości unoszenia (z uwagi na towarzyszące zjawisko dyfuzji cieplnej), to prędkość wyznacza się korzystając z dyspersyjnej zależności pomiędzy przesunięciem fazowym fali  $\Delta\varphi$ , a jej częstotliwością kołową  $\omega$  [5,6]:

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

gdzie:  $V_M$  – prędkość przepływu gazu,  $\kappa$  – dyfuzyjność temperaturowa gazu,  $\Delta x$  – odległość między detektorami. To powoduje, że należy stosować taki sygnał na nadajniku, który będzie zawierał przynajmniej kilka składowych harmonicznnych o na tyle dużej amplitudzie, aby można było zmierzyć ich przesunięcie fazowe na detektorach fali.



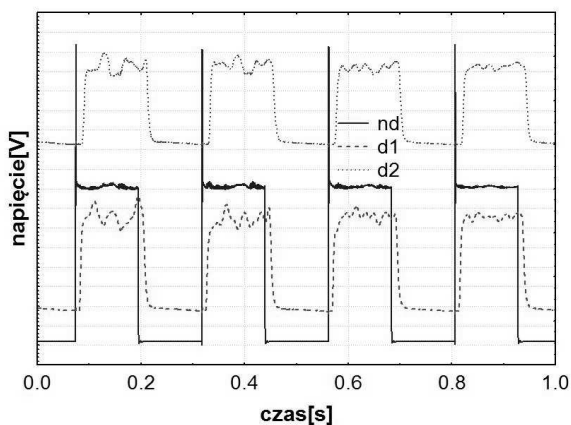
Rys. 1. Orientacja przestrzenna nadajnika fali oraz detektorów w płynącym gazie

Należy zauważyć, że fala temperaturowa zanika w miarę oddalania się od nadajnika i zjawisko to uwidacznia się silniej w miarę jak częstotliwość fali rośnie. Najbardziej dogodny, z tego punktu widzenia, okazał się sygnał typu MBS (*Multifrequency Binary Sequence*) [7]; jednak, dobierając odpowiednio parametry sondy pomiarowej (współczynnik nagrzania nadajnika, odległości pomiędzy nadajnikiem fali a detektorami), można było zastosować również sygnał prostokątny [8]. Istotną, z punktu widzenia praktyki, wadą metod pomiaru prędkości przepływu opartych na pomiarze czasu przelotu znacznika (którym jest w tym przypadku podgrzana objętość gazu) (*Time-of-Flight Method*) jest niskie pasmo przenoszenia wywołane czasem potrzebnym na dotarcie sygnału do detektorów. Sprawia to, że te metody można stosować tylko do pomiarów przepływów o stałej prędkości lub wolnozmiennych w czasie. Z drugiej strony, zaletą metody fal cieplnych jest możliwość pomiaru bardzo małych prędkości przepływu, a jej zmodyfikowana wersja, wykorzystująca dyspersję fali, jest praktycznie niewrażliwa na zmiany temperatury i składu płynącego gazu [8]. Pozwala to mierzyć poprawnie prędkość nawet gdy skład lub temperatura gazu zmienia się w trakcie pomiaru. Zastosowanie sygnału prostokątnego stwarza dodatkową możliwość; ponieważ nadajnik fali pracuje w układzie stałotemperaturowym, to sygnał napięciowy z nadajnika można wykorzystać do pomiaru wartości chwilowej prędkości. Jednak, aby taki pomiar był możliwy w warunkach zmiennego składu gazu należy połączyć obie metody to jest pomiar anemometrem stałotemperaturowym i metodą fal cieplnych.

## 2. OPIS METODY

### 2.1. Idea anemometru hybrydowego

Jeżeli na nadajniku fali wymuszamy prostokątny przebieg temperatury, to w trakcie trwania impulsu nadajnik może być zarazem czujnikiem anemometru



Rys. 2. Przebiegi napięcia na nadajniku i detektorach fali temperaturowej

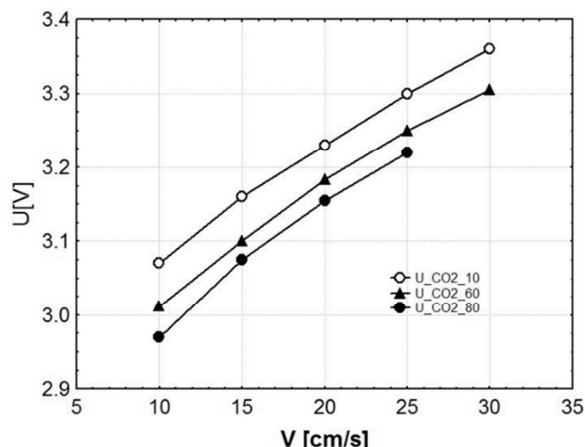
stałotemperaturowego. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe przebiegi napięć na nadajniku i na detektorach fali. Na sygnale napięciowym z nadajnika zauważyć można niewielkie zmiany napięcia wywołane fluktuacjami prędkości, które nakładają się na składową stałą prędkości. Jak widać, taki układ umożliwia równoczesny pomiar prędkości przepływu dwoma metodami: za pomocą termooanemometru stałotemperaturowego, oraz metodą fal cieplnych. W tym drugim przypadku mierzymy oczywiście tylko składową stałą prędkości. Jeżeli termooanemometr został wywzorcowany dla danego gazu, to uzupełnienie pomiaru o metodę fal cieplnych jest zbędne. Jednak gdy mierzymy np. przepływ mieszaniny gazów o nieznanym składzie, to wskazania anemometru stałotemperaturowego nie będą poprawne.

Zależność napięcia anemometru stałotemperaturowego od prędkości najczęściej opisuje się prawem Kinga [9]:

$$U^2 = A + BV^N \quad (2)$$

gdzie:  $V$  – prędkość przepływu,  $U$  – napięcie na włóknie termooanemometru,  $A$ ,  $B$ ,  $N$  – stałe. W literaturze jest wiele prac poświęconych zakresowi stosowalności prawa Kinga, podano też różne jego modyfikacje; szczegółową dyskusję tego zagadnienia można znaleźć w pracach monograficznych poświęconych termooanometrii np. Biernackiego[10] czy Bruuna[11]. Ponieważ, w badanym zakresie prędkości, dobrze przybliża ono charakterystykę napięcie-prędkość, to posłuży ono do zobrazowania pewnej, istotnej z punktu widzenia prezentowanej metody pomiarowej, właściwości charakterystyk napięcie-prędkość anemometru dla mieszaniny gazów o różnym składzie. Jak stwierdzili Pitts i McCaffrey [12], dla wielu badanych mieszanin gazów przebieg zależności wskazań anemometru stałotemperaturowego od prędkości jest podobny, w szczególności wykładnik  $N$  i stała  $B$  w prawie Kinga niewiele się zmieniają w szerokim zakresie prędkości. Wyniki badań dla mieszanin dwutlenku węgla z powietrzem Corrsina [13] oraz Chassaina [14] wskazują, że napięcie wyjściowe anemometru stałotemperaturowego dla różnych

stężeń dwutlenku węgla w powietrzu różni się przede wszystkim o stałą (czyli stałą  $A$  w prawie Kinga). Ilustracją tego faktu jest rysunek 3, na którym przedstawiono zależność pomiędzy napięciem wyjściowym anemometru stało-temperaturowego, a prędkością przepływu, dla mieszaniny dwutlenku węgla z powietrzem. Jak widać, zmiana stężenia  $CO_2$  w powietrzu powoduje że, różnica wskazań termooanemometru dochodzi do około 20%. Istotną własnością charakterystyk przedstawionych na rysunku 3 jest to, że krzywe te są, z dobrym przybliżeniem,



Rys. 3. Charakterystyki napięcie-prędkość dla anemometru stałotemperaturowego przy różnych stężeniach dwutlenku węgla w powietrzu

równoległe. Inaczej mówiąc, wskazania anemometru stałotemperaturowego, dla różnych stężeń dwutlenku węgla różnią się jedynie o stałą wartość. Prędkość przepływu  $V(t)$  możemy zapisać jako sumę składowej stałej  $V_M$  i zależnej od czasu składowej zmiennej  $V_Z(t)$ :

$$V(t) = V_M + V_Z(t) \quad (2)$$

Dla mieszaniny o dwóch różnych składach oznaczonych odpowiednio przez  $\alpha$  i  $\beta$ , napięcie wyjściowe anemometru w otoczeniu pewnej ustalonej prędkości  $V_M$  przedstawić można jako:

$$U^\alpha(t) = U_M^\alpha + U_Z^\alpha(t) \quad (3)$$

$$U^\beta(t) = U_M^\beta + U_Z^\beta(t) \quad (4)$$

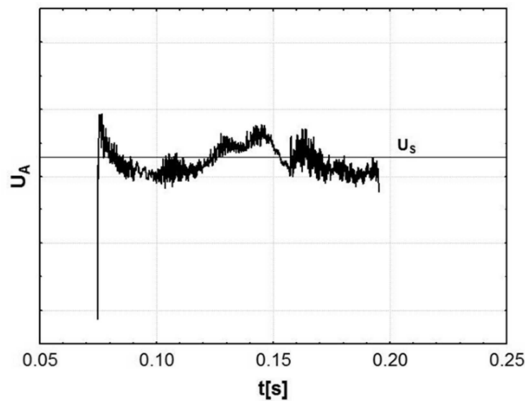
Z powyższych rozważań wynika, że:

$$U_Z^\alpha(t) \approx U_Z^\beta(t) \quad (5)$$

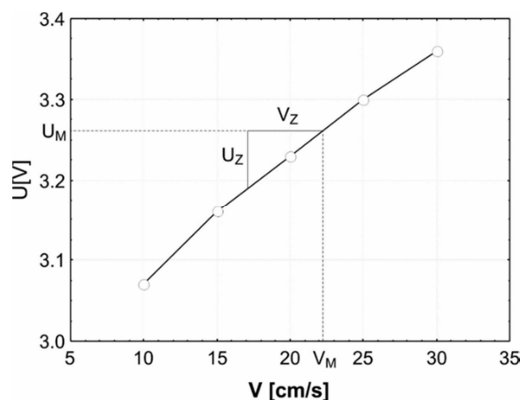
czyli odpowiedź anemometru na małą zmianę prędkości nie zależy od składu mieszaniny płynącego gazu. Tak więc termooanemometr wywzorcowany np. dla mieszaniny o stężeniu 60%  $CO_2$  mierzy składową zmienną w sposób poprawny, nawet gdy stężenie ulegnie zmianie. Dlatego, aby otrzymać poprawną wartość mierzonej prędkości wystarczy wywzorcować anemometr stałotemperaturowy dla jednego stężenia dwutlenku węgla, a następnie dodać wyznaczoną wartość składowej zmiennej prędkości do składowej stałej zmierzonej za pomocą układu z falą cieplną.

### 2.2. Procedura wyznaczania prędkości

W pierwszym kroku wyznaczamy składową stałą prędkości  $V_M$  za pomocą metody fal cieplnych. Znajc



Rys. 4. Wyznaczanie wartości średniego napięcia  $U_S$  anemometru stałotemperaturowego



Rys. 5. Wyznaczanie wartości fluktuacji prędkości  $V_Z$  dla danej prędkości  $V_M$  na podstawie charakterystyki anemometru stałotemperaturowego

wartości prędkości średniej  $V_M$  znajdujemy na krzywej wzorcowania anemometru stałotemperaturowego odpowiadającą jej wartość napięcia  $U_M$ . Z kolei wyznaczamy składową zmienną napięcia  $U_Z(t)$ . W związku z tym dla sygnału napięciowego  $U_A$  anemometru stałotemperaturowego obliczamy wartość średnią napięcia  $U_S$ , w czasie równym połowie okresu prostokątnej fali temperaturowej, co przedstawiono na rysunku 4. Następnie obliczamy składową zmienną napięcia  $U_Z(t)$  jako różnicę między wartościami napięcia  $U_A$  i napięcia uśrednionego  $U_S$ , odpowiadającą fluktuacjom prędkości, tak że zachodzi związek:

$$U_Z(t) = U_A(t) - U_S \quad (6)$$

Ponieważ  $V(t) = V_M + V_Z(t)$ , to otrzymujemy:

$$f(U_A(t)) = f(U_S + U_Z(t)) \quad (7)$$

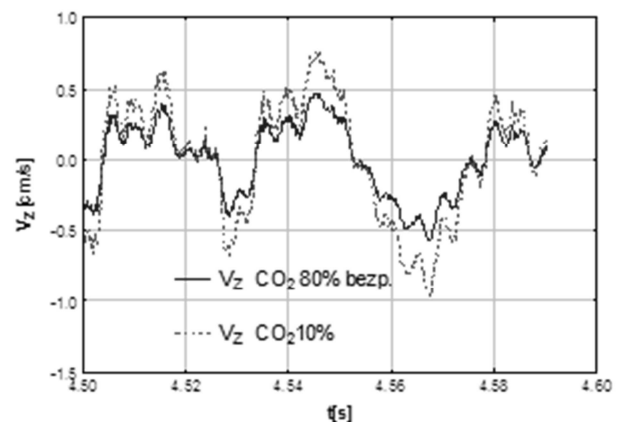
Jeżeli zmienimy rodzaj gazu, oraz uwzględnimy fakt, że charakterystyki wzorcowania  $f(U_A)$  są względem siebie równoległe przesunięte w kierunku osi napięcia, to do wyznaczenia składowej zmiennej wystarczy zastąpić w powyższym wzorze  $U_S$  wielkością  $U_M$ . Na koniec otrzymujemy zależność na wartość fluktuacji prędkości w kierunku przepływu jako:

$$V_Z(t) = f(U_M + U_Z(t)) - V_M \quad (8)$$

Należy podkreślić, że przedstawiona metodę można stosować tylko wtedy, gdy charakterystyki anemometru stałotemperaturowego dla różnego składu mieszaniny płynącego gazu różnią się o wartość stałą (czyli równanie (5) jest spełnione z wystarczającą dokładnością).

### 3. WYNIKI

Na rysunku 6 przedstawiono wyliczone wartości fluktuacji prędkości w przepływie o prędkości średniej 9.95 cm/s i stężeniu 80% CO<sub>2</sub>. Krzywą ciągłą zaznaczono fluktuacje wyliczone na podstawie charakterystyki termooanemometru wyznaczonej dla tego stężenia, natomiast krzywa przerywana przedstawia wartości wyliczone na podstawie charakterystyki dla stężenia 10% CO<sub>2</sub>. Widoczne różnice wynikają z różnego nachylenia charakterystyk w otoczeniu prędkości 10 cm/s, które



Rys. 6. Porównanie wartości fluktuacji prędkości zmierzonych bezpośrednio z wyznaczonymi na podstawie charakterystyki dla innego stężenia dwutlenku węgla

spowodowane jest zapewne zbyt małą ilością punktów pomiarowych użytych do wyznaczenia charakterystyk. Analizując charakterystyki z rysunku 3 można zauważyć, że dokładność wyznaczenia składowej zmiennej dla prędkości np. 20 cm/s byłaby lepsza. Wskazuje to na konieczność wykonania bardziej dokładnej charakterystyki termooanemometru.

### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

Zastosowanie układu pomiarowego łączącego anemometr stałotemperaturowy z anemometrem z falą cieplną pozwala zmierzyć składową stałą i składową zmienną prędkości przepływu mieszaniny dwutlenku węgla z powietrzem niezależnie od składu mieszaniny. Do pomiaru wystarczą dwie dokładne charakterystyki napięcie-prędkość anemometru stałotemperaturowego. W przypadku mieszanin innych gazów należałoby najpierw wyznaczyć charakterystyki dla dwóch skrajnych stężeń, i stosować metodę wtedy gdy ich nachylenie z wystarczającą dokładnością można uznać za jednakowe. Przedstawiony układ pomiarowy ma jeszcze jedną zaletę. Umożliwia on wzorcowanie termooanemometru stałotemperaturowego przy różnych stężeniach płynącej mieszaniny. Jest to wygodne, gdyż pomiar składowej stałej i napięcia wyjściowego z układu stałotemperaturowego odbywa się równocześnie,

przy tym samym stężeniu, więc można uniknąć kłopotliwego powtórnego sporządzenia mieszaniny o zadanym stężeniu. Dodatkową korzyścią jest lepsza dokładność wzorcowania dla bardzo małych prędkości przepływu, gdyż wytworzenie powtarzalnego przepływu o zadanej bardzo małej prędkości bywa również niełatwe.

## 5. BIBLIOGRAFIA

1. Bradbury L.J.S., Castro I.P.: A Pulsed Wire Technique for Turbulence Measurements, *J. Fluid Mech.*, Nr 49 (1971) s. 657-691.
2. Walker R.E., Westenberg A.A.: Absolute Low Speed Anemometer, *Rev. Sci. Instrum.*, Nr 10(27), 1956, s. 844-848.
3. Kiełbasa J.: On the possibility of absolute measurement of gas flow velocity, *Bull. Acad. Pol. Sci., Ser. Tech.*, Nr 5(18), 1970, s. 199-204.
4. Biernacki Z.: A system of wave thermoanemometer with a thermoresistive sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, Nr 3(70), 1998, s. 219-224.
5. Rachalski A.: Absolute Measurements of Very Low Gas Flow Velocity by Means of Spectral Analysis of Thermal Wave, *Rev. Sci. Instrum.*, Nr 2 (84), 2013, 025105.
6. Rachalski A., Bujalski M., Ligęza P., Poleszczyk E.: Absolute Flow Velocity Measurements by Means of the Thermal Waves, *Proceedings of the 10th International Conference on Measurement, Smolenice, Slovakia 2015*, s. 297-300.
7. Kęsek D., Rachalski A.: Wykorzystanie sygnału typu MBS do pomiaru prędkości przepływu i dyfuzyjności temperaturowej powietrza w anemometrze z falą cieplną, *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr 8 (90), 2014, s. 172-174.
8. Rachalski A., Poleszczyk, E., Zięba, M.: Use of the thermal wave method for measuring the flow velocity of air and carbon dioxide mixture, *Measurement*, Nr 95, 2017, s. 210-215.
9. 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 applications to hot-wire anemometry, *Phil. Trans. R. Soc., London*, A 214, 1914, s. 373-432.
10. Biernacki Z.: *Sensory i systemy termoanemometryczne*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1997.
11. Bruun H.H.: *Hot-Wire Anemometry*, Oxford University Press, Oxford, New York, Tokyo 1995.
12. Z Pitts W.M., McCaffrey B.J.: Response behavior of hot wires and films to flows of different gases, *J. Fluid. Mech.* 169, 1986, s. 465-512.
13. Corrsin S.: Extended Applications of the Hot-Wire Anemometer. *Rev. Sci. Instrum.*, Nr 7(18), 1947, s. 469-471.
14. Chassaing P.: Heat transfer from cylindrical anemometer probes in CO<sub>2</sub>-air mixtures, *Physics of Fluids* 20, 1977, s. 1260-1262.

## HYBRID ANEMOMETER

The paper presents an anemometer which is a combination of a constant-temperature anemometer and an anemometer with a thermal wave. The coefficient of heating of a constant temperature anemometer takes periodically two different set values, as a result of which the anemometer fiber is also a temperature wave transmitter. The velocity constant component is measured by means of an anemometer with a thermal wave, while the constant temperature anemometer measures the variable component. The advantage of such a system is the possibility of continuous measurement of velocities, also of unknown or variable composition of the gas mixtures during the measurement. The results of measurements for a mixture of carbon dioxide and air are presented.

**Keywords:** flow velocity measurement, thermal waves, constant temperature anemometer.