

Badania modelowe wpływu stężenia mieszaniny powietrze – dwutlenek węgla na pomiar prędkości metodą termoanemometryczną

PAWEŁ LIGĘZA

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

Streszczenie

Badania pól prędkości i temperatury w przepływach gazu stanowią istotne zagadnienie metrologiczne w wielu obszarach współczesnej nauki i techniki. Jedną z metod pomiarowych stosowanych w takich badaniach jest termoanemometria. Jest to metoda pomiaru prędkości przepływu gazu poprzez pomiar strat ciepłych grzanego elementu umieszczonego w badanym przepływie. Metoda ta jest metodą pośrednią, w której sygnał wyjściowy jest funkcją nie tylko mierzonej prędkości, ale zależy również od innych parametrów takich jak temperatura i skład gazu oraz parametry czujnika i układu zasilania. W pracy poddano teoretycznej analizie zagadnienie wpływu stężenia mieszaniny powietrze – dwutlenek węgla na pomiar prędkości metodą termoanemometryczną oraz przedstawiono rezultaty badań modelowych.

Słowa kluczowe: prędkość przepływu, mieszanina gazów, termoanemometria, modelowanie

1. Wprowadzenie

Badania pól prędkości i temperatury w przepływach gazu stanowią istotne zagadnienie metrologiczne w wielu obszarach współczesnej nauki i techniki. W pracach eksperymentalnych w zakresie mechaniki płynów i termodynamiki, oraz takich dziedzinach techniki jak aerodynamika, lotnictwo, motoryzacja, wentylacja i klimatyzacja, chłodnictwo i ciepłownictwo, pomiary te mają charakter podstawowy. W wielu dziedzinach działalności naukowej i technicznej pomiary rozkładu prędkości i temperatury w przepływającym gazie stanowią zagadnienie pomocnicze, jednak ważne dla całości procesu. W obu przypadkach warunkiem uzyskania poprawnych rezultatów jest zastosowanie odpowiedniego narzędzia badawczego, oraz znajomość jego parametrów.

Termoanemometria jest pośrednią metodą pomiaru prędkości przepływu gazu, poprzez pomiar strat ciepłych grzanego elementu umieszczonego w badanym przepływie. Metoda ta cechuje się szerokim zakresem pomiarowym oraz umożliwia badania przepływów szybkozmiennych. Termoanemometria zapewnia pomiar zbliżony do punktowego oraz małą inwazyjność pomiaru. Ponadto wyróżnikiem metody jest brak elementów ruchomych czujnika, duży stosunek sygnał/szum i elektryczny sygnał wyjściowy [1,2].

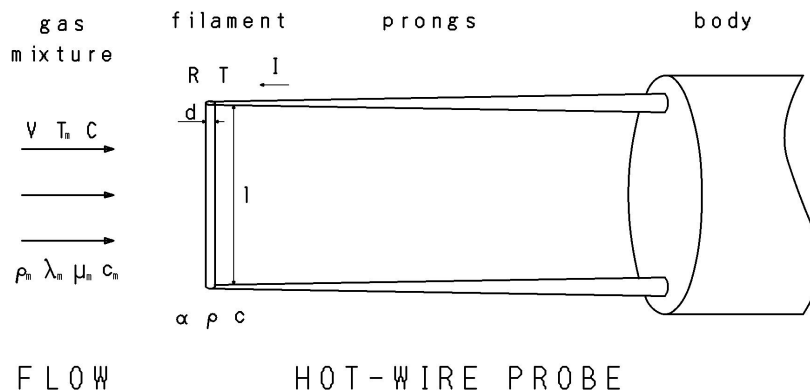
Obszar pomiarowy i stopień inwazyjności metody wyznaczony jest rozmiarami elementu pomiarowego czujnika termoanemometrycznego. Typowym elementem pomiarowym jest przewodzące włókno o średnicy kilku mikrometrów, cienka folia lub termistor. Prąd elektryczny rozgrzewa element pomiarowy, umożliwiając jednocześnie pomiar jego temperatury. Przeprowadzenie bilansu cieplnego dla elementu pomiarowego pozwala na wyznaczenie mierzonej prędkości przepływu. Sygnałem wyjściowym z układu jest napięcie na czujniku lub napięcie proporcjonalne do prądu czujnika. Sygnał wyjściowy jest funkcją mierzonej wielkości, jest jednak zależny również od innych parametrów takich jak temperatura i skład gazu oraz parametry czujnika i układu zasilania [3-5].

Zależność sygnału wyjściowego od prędkości przepływu wyznaczana jest najczęściej na drodze wzorcowania w tunelu aerodynamicznym. Dla danego systemu pomiarowego w ustalonych warunkach wyznacza

się zależność napięcia wyjściowego od zadanej prędkości przepływu. Wzorcowanie najczęściej prowadzone jest w powietrzu, choć w zamkniętych tunelach możliwe jest wzorcowanie w innych gazach. Jeżeli wzorcowanie przeprowadzono w powietrzu, a pomiary dokonywane są w innym gazie, lub skład mierzonego medium jest zmienny, wtedy pomiar prędkości metodą termooanemometryczną jest obarczony błędem. Ocena tego błędu lub jego kompensacja możliwa jest na podstawie modelu matematycznego zjawiska pomiarowego. W pracy poddano teoretycznej analizie zagadnienie wpływu stężenia mieszaniny powietrze-dwutlenek węgla na pomiar prędkości metodą termooanemometryczną oraz przedstawiono rezultaty badań modelowych.

2. Model czujnika dla termooanemometrycznej metody pomiarowej

Budowa czujnika stosowanego w pomiarach termooanemometrycznych umieszczonego w badanym przepływie gazu przedstawiona jest schematycznie na rysunku 1.



Rys. 1. Czujnik termooanemometryczny w badanym przepływie gazu

Elementem czynnym czujnika jest cienki drut (włókno) o średnicy kilku mikrometrów i długości od ułamka do pojedynczych milimetrów, wykonany najczęściej z wolframu lub platyny. Jest on rozpięty na wspornikach stanowiących doprowadzenia elektryczne. Włókno pomiarowe rozgrzewane jest prądem elektrycznym do temperatury istotnie wyższej od temperatury badanego medium. Pomiar temperatury włókna odbywa się poprzez pomiar jego rezystancji. Włókno umieszczone jest w badanym przepływie gazu. Matematyczny model czujnika termooanemometrycznego bazuje na bilansie strumieni ciepła dla włókna czujnika.

Włókno nagrzewane jest przepływającym przez nie prądem, zgodnie z prawem Joule'a-Lenza. Wymiana ciepła pomiędzy włóknem a przepływem następuje na drodze konwekcji, a dynamika procesu związana jest z magazynowaniem ciepła we włóknem. W uproszczonym modelu czujnika przyjmijmy, że odprowadzanie ciepła przez wsporniki włókna jest zaniebawane. Takie założenie jest uprawnione przy dostatecznie dużym stosunku długości włókna do jego średnicy. Można wtedy przyjąć, że w jednorodnym przepływie rozkład temperatury wzdłuż włókna jest jednorodny. W rozważanym modelu nie uwzględniamy również wymiany ciepła na drodze promieniowania. Należy jednak pamiętać, że czynnik ten może wpływać na pomiar przy bardzo wysokich temperaturach włókna, w obecności silnych źródeł promieniowania oraz w pomiarach rozrzedzonych gazów. Przyjęte powyżej założenia prowadzą do bilansu strumieni ciepła dla włókna pomiarowego w postaci:

$$I^2 R - Nu \lambda_m l \pi (T - T_m) - \frac{\rho c d^2 l \pi}{4} \frac{dT}{dt} = 0 \quad (1)$$

gdzie:

- I – prąd płynący przez włókno,
- R – rezystancja nagrzanego włókna,
- T – temperatura nagrzanego włókna,
- T_m – temperatura medium,
- ρ – gęstość materiału włókna,
- c – ciepło właściwe materiału włókna,
- d – średnica włókna,

l – długość włókna,
 λ_m – współczynnik przewodzenia ciepła medium,
 Nu – liczba Nusselta.

Dla konwekcyjnej wymiany ciepła pomiędzy włóknem a medium wielkość liczby Nusselta przyjmijmy zgodnie z [3] w postaci:

$$Nu = 0.42 Pr^{0.2} + 0.57 Pr^{0.33} Re^{0.5} \quad (2)$$

Liczba Prandtla we wzorze (2) opisana jest zależnością:

$$Pr = \frac{\mu_m c_m}{\lambda_m} \quad (3)$$

a liczba Reynoldsa związkem:

$$Re = \frac{V d \rho_m}{\mu_m} \quad (4)$$

gdzie:

μ_m – współczynnik lepkości dynamicznej medium,
 c_m – ciepło właściwe medium przy stałym ciśnieniu,
 ρ_m – gęstość medium,
 V – prędkość przepływu medium.

Przyjmijmy linową zależność rezystancji włókna od jego temperatury:

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)], \quad R_m = R_0 [1 + \alpha(T_m - T_0)] \quad (5)$$

gdzie:

R_m – rezystancja włókna w temperaturze medium,
 α – temperaturowy współczynnik rezystancji włókna w temperaturze odniesienia,
 R_0 – rezystancja włókna w temperaturze odniesienia.

Wtedy temperatury w równaniu (1) możemy wyrazić w postaci rezystancji, a więc wielkości mierzalnych bezpośrednio na drodze pomiaru elektrycznego. Po uwzględnieniu w (1) związków (2), (3), (4), (5) otrzymujemy model czujnika termooanemometrycznego w postaci:

$$I^2 = \frac{\lambda_m l \pi}{R_0 \alpha} \left(0.42 \left(\frac{\mu_m c_m}{\lambda_m} \right)^{0.2} + 0.57 \left(\frac{\mu_m c_m}{\lambda_m} \right)^{0.33} \left(\frac{d \rho_m}{\mu_m} \right)^{0.5} V^{0.5} \right) \left(1 - \frac{R_m}{R} \right) + \frac{\rho c d^2 l \pi}{4 R_0 \alpha} \frac{1}{R} \frac{dR}{dt} \quad (6)$$

Równanie (6) określa zależność pomiędzy prądem czujnika, rezystancją nagrzanego czujnika, rezystancją czujnika w temperaturze medium, prędkością przepływu medium, oraz fizycznymi parametrami włókna i medium. Wykorzystanie tego równania do modelowania pomiarów termooanemometrycznych wymaga określenia układu elektrycznego zasilania czujnika. W układzie stałotemperaturowym (stałorezystancyjnym) rezystancja nagrzanego czujnika utrzymywana jest w stanie ustalonym na zadanym poziomie. Wtedy wartość prądu czujnika jest wyjściowym sygnałem pomiarowym, zależnym od prędkości przepływu, temperatury i rodzaju medium. W układzie stałoprądowym sygnałem wyjściowym jest rezystancja czujnika mierzona poprzez pomiar napięcia. Równanie (6) ze względu na zmienną R jest równaniem różniczkowym, opisującym dynamikę procesu.

Model czujnika w postaci (6) pozwala na wyznaczenie i wzajemne porównanie teoretycznych charakterystyk czujnika dla pomiarów termooanemometrycznych przy różnych rodzajach i stężeniach medium.

3. Badania modelowe statycznych charakterystyk termooanemometrycznych

Na podstawie zależności (6) wyznaczono statyczne charakterystyki termooanemometryczne dla różnych stężeń mieszaniny powietrze – dwutlenek węgla. Przyjęto stałotemperaturowy sposób zasilania czujnika przy stałym współczynniku nagrzania względem temperatury medium $R/R_m = 1,8$. Zgodnie z (6) utrzymanie stałego współczynnika nagrzania włókna względem temperatury medium redukuje wpływ temperatury na charakterystyki termooanemometryczne [3]. Do obliczeń przyjęto parametry czujnika z włóknem wolframowym o średnicy $d = 5 \mu\text{m}$ i długości $l = 1,5 \text{ mm}$. Rezystancja takiego czujnika w temperaturze 293 K wynosi około 6Ω , a temperaturowy współczynnik rezystancji $\alpha = 0,0033 \text{ 1/K}$

Parametry fizyczne powietrza dla trzech różnych temperatur przedstawione są w tabeli 1, natomiast dla dwutlenku węgla w tabeli 2. Ponadto przyjęto, że w mieszaninie powietrze-dwutlenek węgla parametry gazu są liniową funkcją stężenia CO_2 . Funkcja ta przebiega od wartości parametru dla powietrza przy stężeniu dwutlenku węgla $C = 0\%$, do wartości parametru dla dwutlenku węgla przy stężeniu $C = 100\%$.

Tab. 1. Parametry fizyczne powietrza w trzech różnych temperaturach

AIR T_m [K]	ρ_m [kg/m^3]	λ_m [$\text{W}/(\text{m K})$]	μ_m [s Pa]	c_m [$\text{J}/(\text{kg K})$]
273	1.293	23.73×10^{-3}	17.19×10^{-6}	1.004×10^3
293	1.205	25.12×10^{-3}	18.02×10^{-6}	1.005×10^3
373	0.933	30.70×10^{-3}	21.24×10^{-6}	1.010×10^3

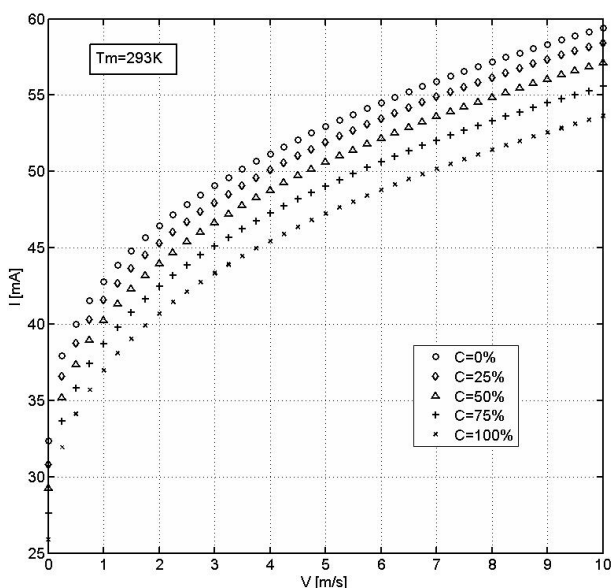
Tab. 2. Parametry fizyczne dwutlenku węgla w trzech różnych temperaturach

CO_2 T_m [K]	ρ_m [kg/m^3]	λ_m [$\text{W}/(\text{m K})$]	μ_m [s Pa]	c_m [$\text{J}/(\text{kg K})$]
273	1.977	14.24×10^{-3}	13.82×10^{-6}	0.815×10^3
293	1.842	15.91×10^{-3}	14.63×10^{-6}	0.835×10^3
373	1.539	20.93×10^{-3}	18.45×10^{-6}	0.914×10^3

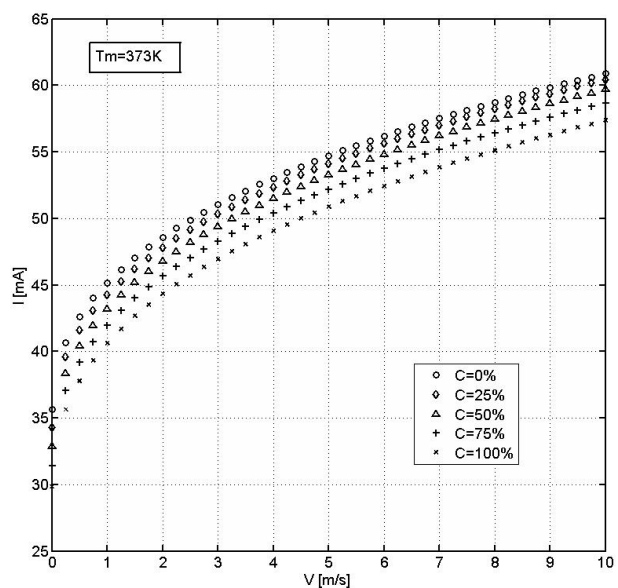
Dla przyjętych parametrów na podstawie modelu (6) wyznaczono charakterystyki termooanemometryczne dla pięciu stężeń mieszaniny gazów przy dwóch temperaturach medium. Charakterystyki stanowią zależność prądu czujnika I od prędkości przepływu V . Przyjęto zakres zmian prędkości od 0 do 10 m/s.

Na rysunku 2 przedstawiono statyczne charakterystyki termooanemometryczne dla pięciu stężeń mieszaniny gazów w temperaturze $T_m = 293 \text{ K}$.

Natomiast rysunek 3 przedstawia statyczne charakterystyki termooanemometryczne dla pięciu stężeń mieszaniny gazów w temperaturze $T_m = 373 \text{ K}$.



Rys. 2. Charakterystyki termooanemometryczne dla różnych stężeń mieszaniny gazów w temperaturze $T_m = 293 \text{ K}$



Rys. 3. Charakterystyki termooanemometryczne dla różnych stężeń mieszaniny gazów w temperaturze $T_m = 373 \text{ K}$

Na rysunkach 2 i 3 widoczna jest istotna zależność charakterystyk termooanemometrycznych od stężenia mieszaniny gazów. Prąd czujnika maleje ze wzrostem stężenia dwutlenku węgla, przy czym zmiana ta jest większa w niższej temperaturze gazu $T_m = 293$ K niż w temperaturze wyższej $T_m = 373$ K.

Jeżeli pomiary dokonywane są w mieszaninie powietrze – dwutlenek węgla o stężeniu procentowym CO_2 równym C , a termooanemometr wywzorcowany był w powietrzu przy $C_0 = 0\%$, to pomiary takie będą obarczone błędem. Dla oceny ilościowej tego błędu wprowadźmy parametr:

$$\varepsilon = \frac{\delta_V}{\delta_C} = \frac{v - V}{C - C_0} \quad (7)$$

gdzie:

δ_V – błąd względny pomiaru prędkości mieszaniny gazów o stężeniu C termooanemometrem wywzorcowanym w powietrzu,

δ_C – różnica stężeń mieszaniny gazów pomiędzy pomiarem a wzorcowaniem,

V – prędkość rzeczywista,

v – prędkość mierzona.

Parametr ε (7) określa wpływ zmiany stężenia mieszaniny gazów na błąd względny pomiaru prędkości. W tabeli 3 zebrano obliczone średnie wartości tego parametru dla trzech różnych prędkości i dwóch temperatur.

Tab. 3. Obliczone średnie wartości parametru ε

ε [%/%]	$V = 1$ m/s	$V = 3$ m/s	$V = 10$ m/s
$T_m = 293$ K	-0.85	-0.63	-0.45
$T_m = 373$ K	-0.75	-0.50	-0.32

Z danych zawartych w tabeli 3 wynika, że wzrost stężenia CO_2 w mieszaninie z powietrzem powoduje spadek prędkości wskazywanej przez termooanemometr wywzorcowany w czystym powietrzu. Zmiana wartości błędu względnego pomiaru prędkości jest rzędu 0,5% przy zmianie stężenia o 1%. Przy niewielkich zmianach stężenia CO_2 , takich jak naturalne zmiany w powietrzu, błąd ten nie stanowi istotnego czynnika w niepewności pomiaru. Natomiast w przypadku zmian stężenia CO_2 powyżej kilku procent wpływ ten zaczyna być istotny.

4. Konkluzje

W artykule przedstawiono wstępne wyniki badań modelowych wpływu stężenia dwutlenku węgla w powietrzu na pomiary prędkości metodą termooanemometryczną. Na podstawie modelu czujnika termooanemometrycznego wyznaczono teoretyczne charakterystyki termooanemometru dla różnych stężeń CO_2 w dwóch temperaturach medium. Uzyskane charakterystyki pozwalają na ilościową ocenę błędu pomiarowego w przypadku, gdy pomiary dokonywane są w mieszaninie gazów, a wzorcowanie czujnika przeprowadzone było w czystym powietrzu. Dla małej zawartości CO_2 , poniżej 1-2%, błąd pomiarowy nie jest znaczący w bilansie niepewności pomiaru metodą termooanemometryczną. Przy wyższych stężeniach wpływ zawartości CO_2 na pomiar zaczyna być istotny i należy go uwzględnić. Przykładowo w spirometrii, gdzie zawartość dwutlenku węgla w wydychanym powietrzu jest na poziomie 5%, a przy wysiłku jeszcze większa, w metodzie termooanemometrycznej czynnik ten powinno się brać pod uwagę [6]. Podobnie w pomiarach procesu wentylacji w hodowli [7]. W przypadku badania procesów spalania [8], gdzie głównym produktem jest CO_2 , w pomiarach wentylacyjnych w stanach zagrożenia, awaryjnych czy pożarowych [9], oraz w wielu procesach technologicznych uwzględnienie wpływu stężenia dwutlenku węgla na pomiary termooanemometryczne jest niezbędnym warunkiem poprawności pomiaru. Pomiar taki wymaga odpowiedniej procedury korekcyjnej lub metody kompensacji błędów.

Literatura

- [1] Lomas C.G.: *Fundamentals of hot wire anemometry*; Cambridge University Press, Cambridge, 1986.
- [2] Bruun H.H.: *Hot-wire Anemometry. Principles and Signal Analysis*; University Press, Oxford, 1995.
- [3] Ligęza P.: *Układy termoanemometryczne – struktura, modelowanie, przyrządy i systemy pomiarowe*; Wydawnictwa AGH, Kraków, 2001.
- [4] Ligęza P.: *Simultaneous velocity and temperature measurements in transient gas flows (book)*; IMG PAN, Kraków, 2009.
- [5] Ligęza P.: *Compendium of two-state hot-wire anemometer measurement method (book)*; IMG PAN, Kraków, 2012.
- [6] Plakk P., Liik P., Kingisepp P.H.: *Hot-wire anemometer for spirometry*; Medical and Biological Engineering and Computing, 36, 1, 17-21, 1998.
- [7] Zagorska V., Ilsters A.: *Possibilities of Heat Exchanger Use in Pigsty Ventilation Systems*; International Scientific Conference Biosystems Engineering, 2010.
- [8] Olczyk A.: *Investigation of the specific mass flow rate distribution in pipes supplied with a pulsating flow*; International Journal of Heat and Fluid Flow, 30, 4, 637-646, 2009.
- [9] Dziurzyński W., Pałka T.: *Wyznaczanie dróg ucieczkowych w razie pożaru w kopalni podziemnej – nowe możliwości systemu VentGraph*; Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, 1-2, 16, 3-16, 2014.

Model tests of the effect of the concentration of a mixture of air – carbon dioxide on the hot – wire method for gas velocity measurement**Abstract**

Research of the fields of velocity and temperature in gas flows are an important issue of metrology in many areas of modern science and technology. One of the measuring methods used in these studies is hot – wire anemometry. It is a method of measuring the velocity of gas flow by measuring heat loss of heated element placed in the gas flow. This method is the indirect method in which the output signal is a function not only of the measured velocity, but depends also on other parameters. The most important are the temperature and gas composition, and the parameters of the probe and electronic anemometer circuit. In this work the issue of the impact of the concentration of a mixture of air – carbon dioxide on the velocity measurement method has been theoretically analyzed. The results of model tests and analysis have been also presented.

Keywords: flow velocity, gas mixture, hot – wire anemometer, modeling