

Pomiar dyfuzyjności cieplnej mieszanin gazów metodą fal cieplnych

ELŻBIETA POLESZCZYK, ANDRZEJ RACHALSKI, MAŁGORZATA ZIĘBA

Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul Reymonta 26, 30-059 Kraków

Streszczenie

W pracy przedstawiona została metoda pomiaru dyfuzyjności cieplnej płynącego gazu przy użyciu metody fal cieplnych. Badania przeprowadzono metodą poruszającej się sondy w nieruchomym gazie, w temperaturze pokojowej, w zakresie prędkości 10-30 cm/s. Przedstawiono wyniki pomiarów dla powietrza oraz mieszaniny dwutlenku węgla z powietrzem w wybranych stężeniach.

Słowa kluczowe: dyfuzyjność cieplna, termoanemometria, metoda fal cieplnych

1. Wprowadzenie

Znajomość dyfuzyjności cieplnej gazów ma duże znaczenie praktyczne. Jednym, ze sposobów wyznaczenia eksperymentalnego tej wielkości jest pomiar ciepła właściwego λ , przewodnictwa cieplnego przy stałym ciśnieniu C_p i gęstości gazu ρ w danej temperaturze oraz ciśnieniu, a następnie wyliczenie dyfuzyjności ze wzoru definicyjnego: $\kappa(T,p) = \lambda(T,p)/(\rho(T,p)C_p(T,p))$. Ponieważ wymaga to przeprowadzenia pomiarów trzech wielkości (dotyczy to zwłaszcza mieszanin gazowych, których dane nie są zamieszczone w tablicach), stosuje się również metody bezpośredniego pomiaru dyfuzyjności. Przeprowadza się je w zamkniętej próbce nieruchomego gazu. Jedną z takich metod pomiaru jest zastosowanie techniki grzanego włókna (*transient-wire method*) [1], która wykorzystuje zjawisko przekazywania ciepła od nagrzanego cienkiego włókna (o średnicy rzędu kilkunastu mikrometrów) do otaczającego go badanego gazu i polega na pomiarze chwilowej temperatury włókna. Inne metody wykorzystują zjawisko ugięcia fali cieplnej [2,3] oraz interferencji fal cieplnych w komorze rezonansowej wypełnionej badanym gazem [4,5]. Oryginalną ideą jest wykorzystanie rezonansu pomiędzy nadajnikiem fali cieplnej a detektorem połączonych w pętli elektrycznego sprzężenia zwrotnego [6,7]. Przedstawione metody są ciągle ulepszone, zwłaszcza w aspekcie powtarzalności i dokładności pomiarów, gdyż rozbieżności wartości otrzymanych przez różnych autorów sięgają nawet kilkunastu procent.

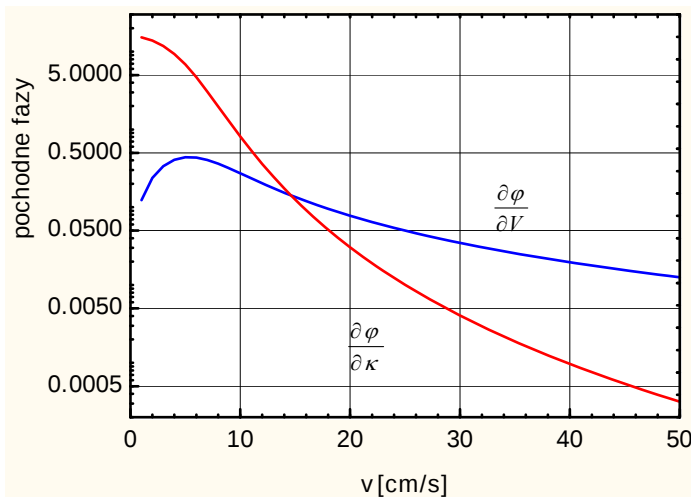
Zagadnienie pomiaru dyfuzyjności temperaturowej w płynącym gazie jest bardziej złożone. Ponieważ dyfuzyjność temperaturową można wyznaczyć wprost przedstawionymi metodami, to pomiar tej wielkości w płynącym gazie może mieć znaczenie praktyczne, w tym sensie, że otrzymujemy obok prędkości przepływu, dodatkową informację o własnościach płynącego gazu. Może to być również wskazówka, że w trakcie pomiaru nastąpiła zmiana składu gazu. Kielbasa [8] zaproponował metodę pomiaru dyfuzyjności cieplnej płynącego gazu w oparciu o przestrzenny rozkład amplitudy fali cieplnej. Interesującym rozwiązaniem jest zastosowanie metody fal cieplnych do równoczesnego pomiaru prędkości przepływu i dyfuzyjności temperaturowej w scalonym przepływomierzu do pomiaru mikroprzepływów [9]. Korzystając z zaproponowanej przez Rachalskiego metody pomiaru prędkości przepływu za pomocą analizy spektralnej fali cieplnej [10] przeprowadzono wstępne pomiary dyfuzyjności powietrza z zastosowaniem sygnału typu MBS (*Multifrequency Binary Sequences*) [11]. W dalszym ciągu przedstawiony zostanie zarys metody oraz uzyskane wyniki pomiarów dla powietrza oraz mieszaniny dwutlenku z powietrzem w kilku stężeniach.

2. Podstawy teoretyczne metody

U podstaw zastosowanej metody leży rozwiązanie równania różniczkowego propagacji fali cieplnej w danym medium. Zgodnie z przedstawionym rozwiązaniem [12] zależność różnicy przesunięć fazowych fali cieplnej o częstości kołowej ω_i rejestrowanej na detektorach odległych o Δx w gazie płynącym z prędkością V ma postać:

$$\Delta\phi_i(\omega_i) = \frac{V\Delta x}{2\kappa} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{16\kappa^2\omega_i^2}{V^4}} - 1 \right)} \quad (1)$$

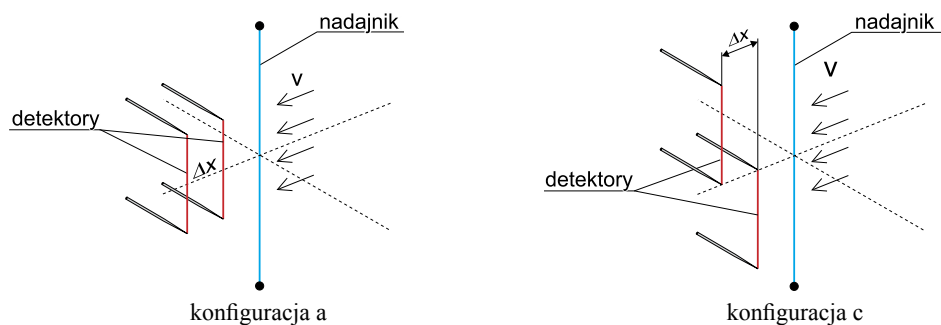
Zgodnie z metodą przedstawioną uprzednio [10,11], aby wyznaczyć prędkość przepływu gazu, oraz jego dyfuzyjność należy dokonać dekompozycji sygnału na detektorach fali na składowe harmoniczne, a następnie wyznaczyć przesunięcia fazowe poszczególnych harmonicznych. Otrzymany układ równań (1) z dwiema niewiadomymi, to jest prędkością gazu V i dyfuzyjnością cieplną κ na ogół nie da się rozwiązać analitycznie, gdyż z powodu niedokładności pomiaru przesunięcia fazowego może być on sprzeczny. Dlatego rozwiązuje się go metodą estymacji nieliniowej. Wymaga to użycia, co najmniej kilku składowych harmonicznych sygnału. Analiza równania (1) pokazuje, że czułość przesunięcia fazowego na zmianę dyfuzyjności maleje, gdy prędkość przepływu rośnie. Fizycznie odpowiada to sytuacji, gdy dominującym zjawiskiem przenoszenia fali cieplnej jest unoszenie konwekcyjne, a dyfuzję temperaturową można pominąć. Na Rys. 1 przedstawiono obliczoną zależność wartości bezwzględnej pochodnej wyrażenia (1) po prędkości i po dyfuzyjności, dla powietrza w funkcji prędkości przepływu. Do obliczeń przyjęto wartości zbliżone do stosowanych w pomiarach: częstotliwość fali 1 Hz, odległość między detektorami 5 mm, dyfuzyjność 0.2 cm²/s. Jak widać, powyżej 20 cm/s czułość przesunięcia fazowego na zmiany dyfuzyjności jest znacznie mniejsza niż na zmiany prędkości. Ponieważ w metodzie estymacji nieliniowej stosujemy metody gradientowe, to przy pewnej niedokładności pomiaru fazy, funkcja celu może osiągać minimum dla wartości dyfuzyjności bardzo odbiegającej od spodziewanej. Nadmienić trzeba, że wartość prędkości przepływu wyznaczona tą metodą jest poprawna w całym zakresie prędkości. Z powyższych rozważań wynika, metoda ta może być zastosowana do pomiaru dyfuzyjności tylko do bardzo małych prędkości przepływu.



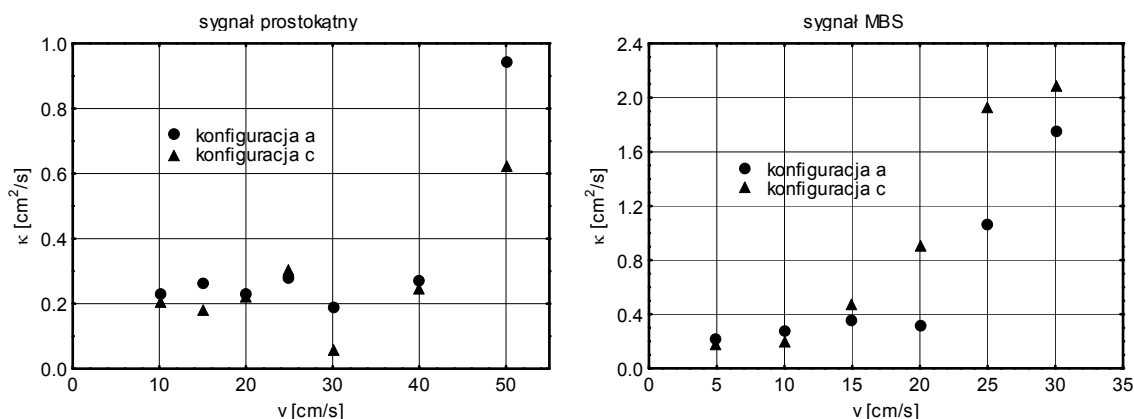
Rys. 1. Zależność pochodnej przesunięcia fazowego po prędkości oraz dyfuzyjności: $\Delta x = 5$ mm, $f = 1$ Hz, $\kappa = 0.2$ cm²/s

3. Opis i wyniki pomiarów

Pomiary dyfuzyjności cieplnej powietrza przeprowadzono metodą poruszającej się sondy w nieruchomym gazie, w temperaturze pokojowej. Opis stanowiska pomiarowego, budowę czujników oraz szczegółowe dane dotyczące przeprowadzonych pomiarów przedstawiono w pracach [13,14]. Zastosowano dwie konfiguracje przestrzenne układu nadajnik-detektor przedstawione na Rys. 2. Na nadajniku fali generowano sygnał prostokątny oraz typu MBS, o częstotliwościach podstawowych odpowiednio 4 oraz 1 Hz. Do wyznaczenia przesunięcia fazowego zastosowano metodę analizy spektralnej sygnałów na de-



Rys. 2. Zastosowane konfiguracje przestrzenne układu nadajnik-detektor



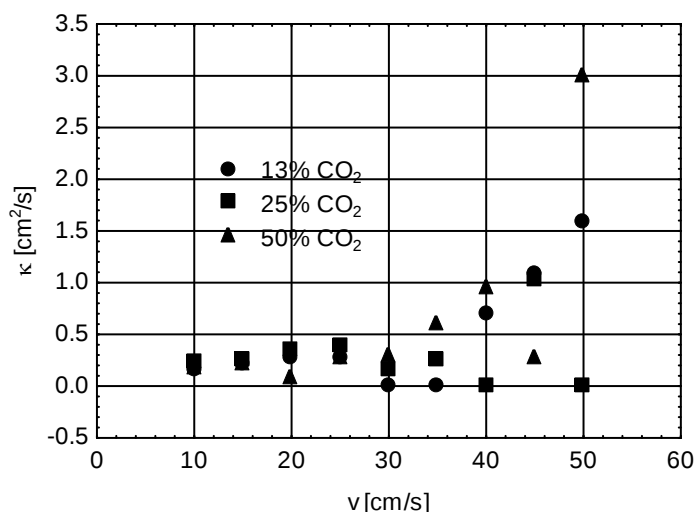
Rys. 3. Wyniki pomiaru dyfuzyjności temperaturowej powietrza w funkcji prędkości przepływu

tektorach fali. Układ równań (1) rozwiązywano metodą Levenberga-Marquardta. Na Rys. 3 przedstawiono wyniki pomiaru dyfuzyjności temperaturowej powietrza otrzymane przy użyciu sygnału prostokątnego oraz sygnału MBS. Jak widać, dla najmniejszych prędkości otrzymujemy zbliżone wartości, niezależnie od konfiguracji czujnika i dla obu rodzajów sygnału. Charakterystyczny jest wzrost wyznaczonych wartości, który dla sygnału prostokątnego pojawia się przy prędkości powyżej 40 cm/s, dla sygnału MBS już przy 15 cm/s. Świadczy to o tym, że zastosowany, bardzo uproszczony model propagacji fal temperaturowych w płynącym gazie nie jest kompletny. Rys. 4 przedstawia wyniki pomiarów dyfuzyjności dla różnych stężeń dwutlenku węgla w mieszaninie z powietrzem. Zauważamy podobne przebiegi jak w przypadku powietrza. Szczegółowe dane zamieszczono w Tabeli 1. Zgodnie z różnymi źródłami literaturowymi dyfuzyjność cieplna suchego powietrza wynosi od 0.19 do 0.228 cm²/s [1]. Otrzymane wartości dla prędkości przepływu 5 i 10 cm/s mieszczą się (z jednym wyjątkiem) w tych granicach. Dyfuzyjność temperaturowa dwutlenku węgla w temperaturze pokojowej wynosi ok. 0.1 cm²/s [15], a więc jest 2 razy mniejsza niż dyfuzyjność powietrza. Należy oczekiwać, że zmierzona wartość dyfuzyjności mieszaniny powinna zawierać się w tym przedziale i maleć ze wzrostem stężenia dwutlenku węgla. Analizując otrzymane wyniki dla prędkości przepływu 10 i 15 cm/s, widać duży rozrzut otrzymanych wartości. Spowodowane jest to niedokładnością pomiaru, która wynikać może z zaburzeń prędkości i temperatury w obszarze sondy pomiarowej, jak również z fluktuacji stężenia dwutlenku węgla.

Tab. 1. Zmierzone wartości dyfuzyjności temperaturowej powietrza i mieszaniny dwutlenku węgla z powietrzem

Prędkość przesuwu [cm/s]	powietrze				13% CO ₂	25% CO ₂	50% CO ₂
	prostokąt		MBS		prostokąt		
	konfiguracja				konfiguracja		
	a	c	a	c	a	a	a
1	2	3	4	5	6	7	8
5			0.216	0.189			
10	0.231	0.205	0.268	0.191	0.154	0.233	0.179
15	0.261	0.179	0.366	0.480	0.222	0.255	0.208
20	0.228	0.220	0.314	0.911	0.281	0.351	0.088

1	2	3	4	5	6	7	8
25	0.277	0.307	1.072	1.940	0.280	0.389	0.269
30	0.190	0.058	1.075	2.092	0.001	0.157	0.289
35					0.001	0.254	0.607
40	0.274	0.245			0.696	0.001	0.941
45					1.091	1.036	0.282
50	0.945	0.621			1.590	0.001	3.00



Rys. 4. Wyniki pomiaru dyfuzyjności temperaturowej dla różnych stężeń mieszaniny powietrza i CO₂

4. Podsumowanie

Uzyskane rezultaty wskazują na możliwość równoczesnego pomiaru prędkości przepływu i dyfuzyjności gazu zaproponowaną metodą, dla prędkości przepływu rzędu 10 cm/s. Dla większych prędkości przepływu otrzymane wyniki pomiaru dyfuzyjności (pomijając rozrzut wywołany niedokładnością) wykazują silną tendencję do wzrostu ze wzrostem prędkości. Wskazuje to, że zastosowany model teoretyczny nie jest całkiem poprawny. Dlatego niezbędne jest przeprowadzenie dalszych badań w celu wyjaśnienia przyczyn występujących rozbieżności oraz właściwej modyfikacji modelu teoretycznego.

Podziękowania

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2012/07/B/ST8/03041: „Badania przestrzennej propagacji oraz optymalizacja metod generacji, detekcji i analizy fal temperaturowych w aspekcie bezwzględnego pomiaru prędkości przepływu i dyfuzyjności cieplnej gazów”.

Literatura

- [1] Shen J., Mandelis A., Ashe T.: *Pyroelectric Thermal-Wave Resonant Cavity: A Precision Thermal Diffusivity Sensor for Gases and Vapors*. International Journal of Thermophysics, Vol. 19, No 2, 1998.
- [2] Rohling J.H., Shen J., Wang C., Zhou J. Gu C.E.: *Application of the Diffraction Theory for Photothermal Deflection to Measurements of Thermophysical and Mass-diffusion Properties of Gases*. Eur. Phys. J. Special Topics 153, 99-101, 2008.
- [3] Bertolotti M., Liakhov G.L., Li Voti R., Paoloni S., Sibilia C.: *Thermal Wave Resonator: In Situ Investigation by Photothermal Deflection Technique*. International Journal of Thermophysics, Vol. 19, No 2, 1998.
- [4] Sun L., Venart J.E.S., Prasad R.C.: *The Thermal Conductivity, Thermal Diffusivity and Heat Capacity of Gaseous Argon*. International Journal of Thermophysics, Vol23, No2, 2002.
- [5] Wang C., Mandelis A.: *Measurement of Thermal Diffusivity of Air Using Photopyroelectric Interferometry*. Review of Scientific Instruments, Vol70, No5, 1999.

- [6] Kielbasa J., Rysz j., Smolarski A.Z., Stasicki B.: *Bezwzględny pomiar współczynnika przewodnictwa temperaturowego gazów metoda oscylacyjną*. V Krajowa Konferencja Metrologii i Budowy Aparatury Pomiarowej, Poznań, 1972.
- [7] Kielbasa J., Rysz j., Smolarski A.Z., Stasicki B.: *The oscillatory anemometer*. Proceedings of the DISA Conference held at the University of Leicester, vol. I, 1972, 65-68.
- [8] Kielbasa J.: *Wyznaczanie współczynnika dyfuzji cieplnej κ z rozkładu amplitudy fali cieplnej*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, tom 15, nr 3-4, 2013.
- [9] van Kuijik J., Lammerinck T.S.J., de Bree H.-E., Elwenspoek M., Fluitman J.H.J.: *Multi-parameter detection in fluid flows*. Sensors and Actuators A 46-47 (1995) 369-372.
- [10] Rachalski A.: *Absolute measurement of low gas flow by means of the spectral analysis of the thermal wave*. Review of Scientific Instruments 84 (2): 025105, 2013.
- [11] Kęsek D., Rachalski A.: *Wykorzystanie sygnału typu MBS do pomiaru prędkości przepływu i dyfuzyjności temperaturowej powietrza w anemometrze z falą cieplną*. Przegląd Elektrotechniczny, 90 8/2014.
- [12] Kielbasa J.: *Fale cieplne w metrologii powolnych przepływów*. Wydawnictwo AGH, Kraków 1976.
- [13] Bujalski M.: *Stanowisko pomiarowe z modulem liniowym o napędzie serwokrokowym do badania metod pomiaru prędkości przepływu powietrza*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN; Tom 16 Nr 3-4: 43-46; 2014.
- [14] Poleszczyk E., Rachalski A., Zięba M.: *Optymalizacja konfiguracji przestrzennej układu pomiarowego nadajnik-detektor w metodzie fal cieplnych*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN; Tom 18 Nr 1: 49-54; 2016
- [15] Rażniević K.: *Tablice cieplne z wykresami*, WNT Warszawa 1964.

The measurement of thermal diffusivity of gas mixtures using thermal wave method

Abstract

In the paper the method of gases thermal diffusivity measurement using thermal wave method is presented. Method with moving probe in still air was used in the research, which were carried under room temperature, in the range of velocities from 10 to 30 cm/s. Results for air as well as air and carbon dioxide mixture in various concentrations are presented.

Keywords: thermal diffusivity, thermoanemometry, thermal waves method