

Optymalizacja konfiguracji przestrzennej układu pomiarowego nadajnik-detektory w metodzie fal cieplnych

ELŻBIETA POLESZCZYK, ANDRZEJ RACHALSKI, MAŁGORZATA ZIĘBA

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

Streszczenie

W pracy przedstawiono badania anemometru z falą cieplną w zakresie bardzo małych prędkości. Zastosowano układ z pojedynczym nadajnikiem i dwoma detektorami fali, w konfiguracji równoległej. Badania przeprowadzono metodą poruszającej się sondy w nieruchomym powietrzu. Na nadajniku fali zastosowano sygnał typu MBS (*Multifrequency Binary Sequences*) oraz prostokątny. Prędkość wyznaczano za pomocą analizy spektralnej sygnału z detektorów fali. Stwierdzono wpływ konfiguracji układu nadajnik-detektor na uzyskiwane wyniki pomiaru prędkości spowodowane zjawiskiem cienia aerodynamicznego.

Słowa kluczowe: termoanemometria, fale cieplne, pomiar prędkości przepływu

Nomenklatura:

- c – ciepło właściwe gazu,
- r_1, r_2 – odległość odpowiednio detektora 1 oraz 2 od nadajnika,
- t – czas,
- x_1, x_2 – współrzędna x odpowiednio detektora 1 oraz 2,
- T – temperatura,
- V_{ref} – prędkość odniesienia,
- Q – intensywność źródła fali,
- ϕ_1, ϕ_2 – faza fali temperaturowej na detektorze 1 oraz 2,
- κ – dyfuzyjność temperaturowa gazu,
- ρ – gęstość gazu,
- V – prędkość przepływu,
- ∇^2 – Laplasjan przekształcenia.

1. Wprowadzenie

Pomiar prędkości gazu za pomocą fal temperaturowych polega na pomiarze czasu przelotu wprowadzonego do przepływu, wzdłuż linii prądu na określonej odległości, zaburzenia temperaturowego. Idea ta została po raz pierwszy przedstawiona przez Kavasznay'ego [1], a następnie Walkera i Westenberga [2], i była dalej rozwijana przez licznych autorów. Obecnie jest szeroko stosowana w praktyce pomiarowej, zwłaszcza, jako podstawa działania przepływomierzy, w tym do pomiarów bardzo małych prędkości. Jest to zakres prędkości, w którym znaczącą rolę w propagacji fali temperaturowej odgrywa zjawisko dyfuzji cieplnej. W tych warunkach sygnał temperaturowy w płynącym gazie nie może już być traktowany jako znacznik unoszony z prędkością równą prędkości przepływu gazu. Konsekwencją powyższego jest konieczność wzorcowania anemometrów i przepływomierzy z falą cieplną pracujących w zakresie bardzo małych prędkości i wzorcowanie musi być przeprowadzone dla każdego rodzaju badanego gazu. Uniemożliwia to

zastosowanie tej metody do przepływów o zmiennym, bądź nieznanym składzie gazu. Dlatego też w ostatnich latach w Pracowni Metrologii przepływu IMG PAN prowadzono prace nad zastosowaniem tej metody do absolutnego pomiaru bardzo małych prędkości przepływu gazu, to jest poniżej 30 cm/s.

2. Zarys teorii

Aby zastosować metodę fal cieplnych do absolutnego pomiaru prędkości zastosowano model zjawiska zaproponowany przez Kielbasę [3]. Wychodząc z równania adwekcji-konwekcji:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \nabla^2 T - \mathbf{V} \cdot \mathbf{grad} T + \frac{1}{\rho c} Q(t) \quad (1)$$

otrzymał on analityczne rozwiązanie dla nieskończenie długiego liniowego nadajnika pobudzonego falą sinusoidalną. Zgodnie z tym rozwiązaniem amplituda fali temperaturowej wynosi:

$$\Theta(x, r, \omega, \kappa, V) = \frac{Q_0}{2\pi\kappa\rho c} \sqrt{\frac{\pi}{Vr}} \left[1 + \frac{16\kappa^2\omega^2}{V^4} \right]^{-1/8} \exp \left[\frac{V}{2\kappa} \left(x - r \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{16\kappa^2\omega^2}{V^4}} \right)} \right) \right] \quad (2)$$

a przesunięcie fazowe względem źródła fali jest dane wzorem:

$$\phi(r, \omega, \kappa, V) = \frac{Vr}{2\kappa} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{16\kappa^2\omega^2}{V^4}} - 1 \right)} + \frac{1}{4} \arctan \frac{4\kappa\omega}{V^2} \quad (3)$$

Z powyższego wzoru otrzymujemy wzór na różnicę faz fal temperaturowych na detektorach umieszczonych w odległości r_1 i r_2 od źródła fali:

$$\Delta\phi(r, \omega, \kappa, V) = \phi_2 - \phi_1 = \frac{V(r_2 - r_1)}{2\kappa} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{16\kappa^2\omega^2}{V^4}} - 1 \right)} \quad (4)$$

W równaniu (4) występują dwie niewiadome: prędkość przepływu gazu i dyfuzyjność. Aby te wielkości można było wyznaczyć potrzebne jest drugie równanie. Ponieważ przesunięcie fazowe fali zależy od jej częstotliwości, to dla ciągu N fal o częstotliwościach ω_j otrzymujemy następujący układ równań:

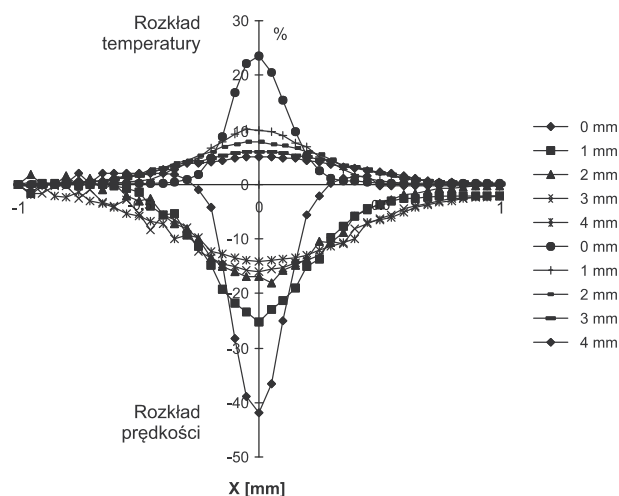
$$\Delta\phi_j(r, \omega_N, \kappa, V) = \phi_2 - \phi_1 = \frac{V(r_2 - r_1)}{2\kappa} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{16\kappa^2\omega_j^2}{V^4}} - 1 \right)}, \quad j = 1, \dots, N \quad (5)$$

gdzie $\Delta\phi_j$ oznacza zmierzone przesunięcie fazowe fali o częstotliwości ω_j . W pomiarze można zastosować kolejne ciągi fal o różnych częstotliwościach, lub co jest bardziej wygodne, zrobić wyznaczyć przesunięcia fazowe składowych harmonicznich fali. Układ równań (5) rozwiązuje się numerycznie, metodą estymacji nieliniowej [4].

3. Kryteria wyboru przestrzennej konfiguracji układu nadajnik-detektory

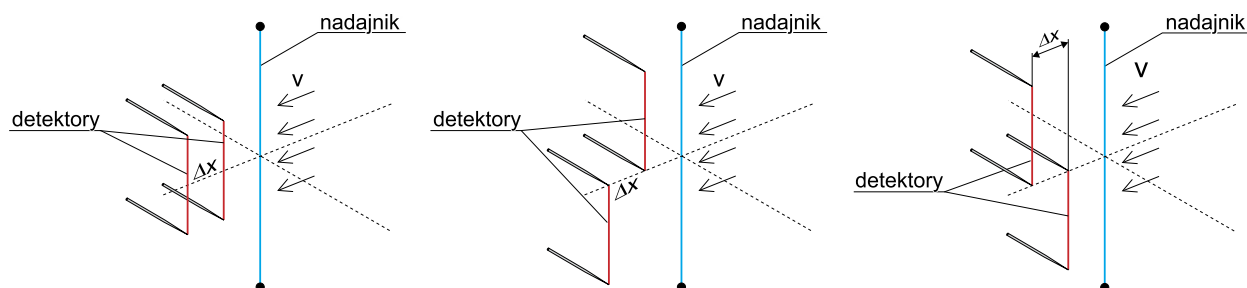
Problem doboru odpowiedniej konfiguracji nadajnika oraz detektorów, jest jednym z kluczowych zagadnień, którego rozwiązanie wpływa na jakość przeprowadzanych pomiarów, a co za tym idzie uzyskanych wyników. Po pierwsze, zastosowana konfiguracja musi być zgodna z założeniami teoretycznego modelu, do którego mają zostać odniesione uzyskane wyniki pomiarów. Ponieważ przedstawione rozwiązanie analityczne dotyczy liniowego nieskończenie długiego i cienkiego nadajnika fali, umieszczonego prostopadle względem wektora prędkości, zastosowano układ z pionowym nadajnikiem znacznie dłuższym w stosunku do detektorów. Kolejnym z warunków doboru konfiguracji jest, możliwa do uzyskania w danej konfiguracji, amplituda sygnału na detektorach. Musi być ona możliwie wysoka, tak, aby można było zmierzyć

przesunięcia fazowe wyższych harmonicznych sygnału z pożądaną dokładnością. Z analizy równania (2) wynika, że poprzeczny rozkład amplitudy fali jest krzywą Gaussa symetryczną względem nadajnika fali; potwierdzone zostało to również eksperymentalnie [5].



Rys. 1. Poprzeczny rozkład temperatury i prędkości za grzanym włóknem dla różnych odległości od włókna. Zmiana prędkości i temperatury wyrażona w procentach względem wartości dla gazu napływającego na włókno [4]

Rysunek 1 przedstawia procentową zmianę temperatury gazu za grzanym włóknem odniesioną do temperatury napływającego gazu. Jak widać obszar gdzie sygnał fali ma wystarczającą amplitudę rozciąga się w granicach ± 0.5 mm od płaszczyzny wyznaczonej przez wektor prędkości przepływu i włókno nadajnika. Z tego punktu widzenia najkorzystniejsze jest położenie współpłaszczyznowe nadajnika i detektorów. Dlatego też w badaniach zastosowano konfiguracje sondy przedstawioną na Rys. 2.



Rys. 2. Konfiguracja przestrzenna układu nadajnik-detektor

Istotnym parametrem, który wpływa, na jakość sygnału jest odległość pomiędzy nadajnikiem a każdym z detektorów, a także wzajemna odległość pomiędzy detektorami. Z analizy równania (2) wynika, że amplituda fali maleje ze wzrostem odległości od źródła, więc odległość ta powinna być możliwie niewielka. Z drugiej strony, im większa jest odległość między detektorami tym większe jest przesunięcie fazowe fali pomiędzy detektorami. Dlatego też te odległości ustala się na podstawie eksperymentu.

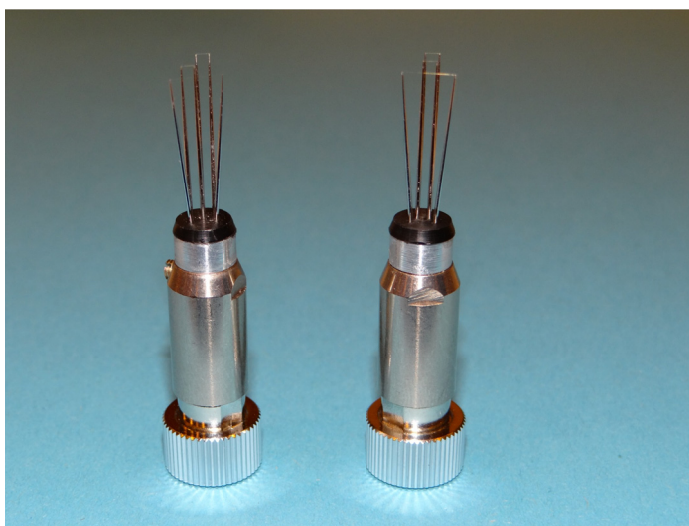
Zjawiskiem, które należy wziąć pod uwagę jest występowanie tzw. cienia prędkości za opływającym włóknem. Polega ono na zmniejszeniu się prędkości za opływającą przeszkodą. Ponieważ zastosowany model propagacji fal cieplnych opiera się na zasadzie zachowania energii cieplnej gazu, to nie uwzględnia on zjawisk aerodynamicznych, a więc zakłada stałe pole prędkości w obszarze sondy pomiarowej. Dlatego też należy tak dobrać konfigurację sondy, aby zminimalizować cień prędkości. Rysunek (1) przedstawia zmierzone prędkości za grzanym włóknem termooptometycznym o średnicy 10 mm [5]. Jak widać w bezpośredniej bliskości włókna prędkość jest mniejsza o 40% od prędkości napływu, w odległości 4 mm zmniejsza się do 15%. Jak można przypuszczać, największy cień prędkości pojawi się w konfiguracji przedstawionej na Rys. 2a, gdyż w obszarze pomiędzy pierwszym a drugim detektorem nakładają się cienie prędkości od nadajnika fali i pierwszego detektora. Jak widać na Rys.1 poprzeczny rozkład śladu temperaturowego za

grzanym włóknem (a więc i amplitudy fali) pokrywa się z cieniem prędkości, dlatego zjawiska tego nie da się wyeliminować całkowicie. W celu zmniejszenia cienia prędkości w obszarze pomiędzy detektorami fali, detektory zostały przesunięte wzdłuż osi pionowej tak, aby detektor drugi nie znajdował się w cieniu pierwszego (Rys. 2b i 2c.).

4. Uzyskane wyniki

W badaniach zastosowano czujniki w układzie przestrzennym przedstawionym Rys. 2, widok czujników pokazano na Rys. 3. Włókna wykonano z drutu wolframowego: nadajnik o średnicy 8 μm , długości 6 mm detektory o średnicy 3 μm , długości 1.5 mm. Odległość między nadajnikiem a pierwszym detektorem wynosiła 3 mm, między detektorami 3.7 mm. Badania przeprowadzono w zamkniętej komorze pomiarowej przedstawionej na Rys. 4, w której zastosowano układ do przesuwania sondy z zadaną prędkością [6]. Do generacji i detekcji fali cieplnej użyto cyfrowego termometru-anemometru CCC2002 [7]. Nadajnik fali pracował w układzie termooanemometru stałotemperaturowego, a detektory fali w układzie termometru rezystancyjnego. Sygnały z anemometru były przesyłane do przetwornika A/C i dalej do komputera gdzie były poddawane dalszemu przetwarzaniu. W badaniach zastosowano metodę analizy spektralnej sygnałów pochodzących z detektorów fali. Polega ona na rozkładzie sygnału na detektorach na składowe harmoniczne za pomocą dyskretnej transformaty Fouriera, a następnie policzeniu różnicy faz fali cieplnej poszczególnych harmonicznych [4]. Na nadajniku generowano został sygnał typu *Multifrequency Binary Sequences* (MBS) o częstotliwości 1 Hz [8,9] oraz prostokątny o częstotliwości 4 Hz. Prędkość wyznaczano metodą estymacji nieliniowej dopasowując zmierzone przesunięcia fazowe składowych harmonicznych sygnału do zależności (5).

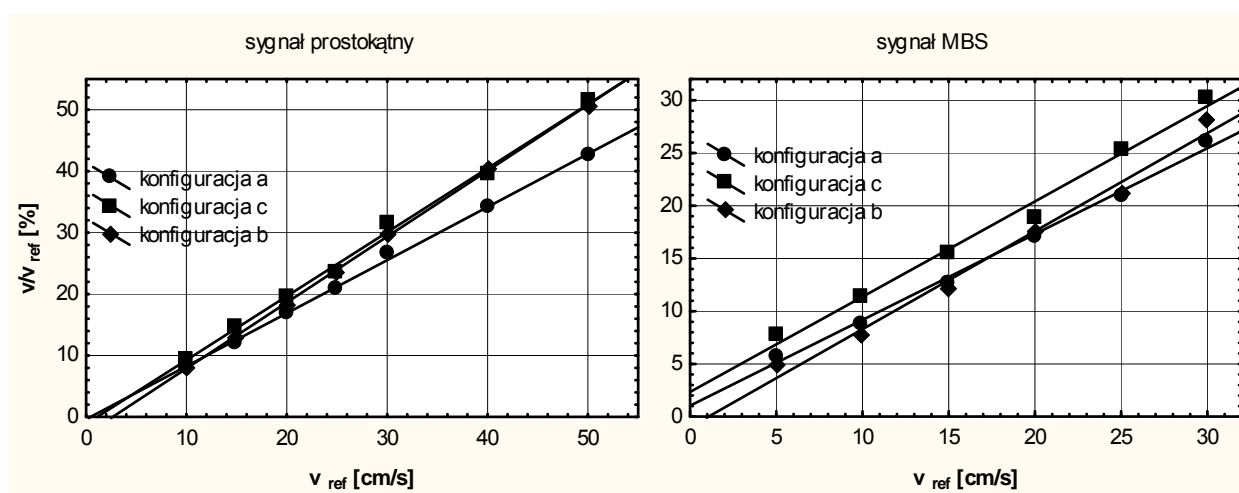
Jak widać na Rys. 5 w przypadku sygnału prostokątnego zmierzone wartości prędkości przepływu gazu przy zastosowaniu konfiguracji „b” i „c” pokrywają się z prędkością przesuwu sondy. Można przyjąć, że w tych konfiguracjach zjawisko cienia zostało praktycznie wyeliminowane, mimo iż odległości pomiędzy włóknami nadajnika i detektorów są rzędu 3 mm a z Rys. 1 wynikałoby, że cień prędkości ciągle powinien wpływać na zmierzoną wartość prędkości. Wydaje się, że wytłumaczyć to można mniejszą średnicą zastosowanych włókien. Dla konfiguracji „a”, najbardziej niekorzystnej, biorąc pod uwagę zjawisko cienia prędkości, wyznaczone wartości są wyraźnie mniejsze. Wyniki dla sygnału typu MBS nie są tak oczywiste, choć nadal zauważalna jest tendencja, że prędkość obliczona na podstawie wyników pomiarów w konfiguracji „c” jest najbardziej zbliżona do prędkości odniesienia. Rozbieżność wyników uzyskanych dla sygnału prostokątnego oraz sygnału typu MBS wynikać może z różnych częstotliwości generowanej fali temperaturowej. W przypadku sygnału prostokątnego częstotliwość podstawowa wynosiła 4 Hz, zaś dla sygnału MBS 1 Hz. Ze względu na cztery razy krótszy czas pomiaru sygnału prostokątnego jest on mniej podatny w różnego typu zakłócenia, które mogą pojawić się w trakcie przesuwu sondy i szczególnie mogą zaznaczać się, gdy czas pomiaru wydłuża się. Rysunek 6 przedstawia stosunek zmierzonych prędkości do prędkości odniesienia. Zarówno dla sygnału typu MBS jak i prostokątnego najlepsze wyniki otrzymujemy dla konfiguracji „c”.



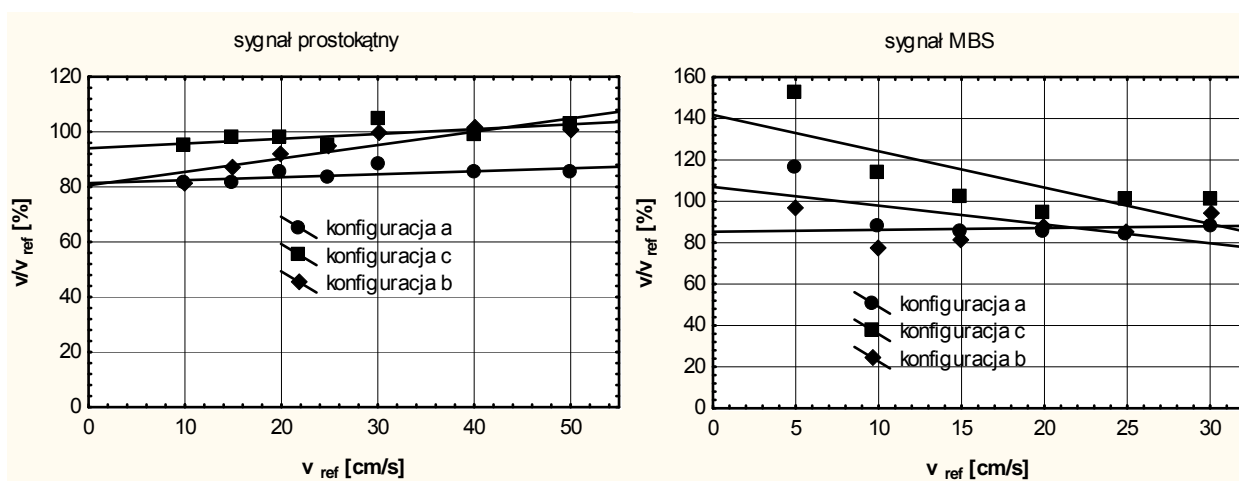
Rys. 3. Czujniki używane w badaniach



Rys. 4. Układ pomiarowy



Rys. 5. Pomiar prędkości przepływu w różnych konfiguracjach układu nadajnik-detektor



Rys. 6. Stosunek zmierzonej prędkości przepływu gazu do prędkości odniesienia

5. Wnioski

Przedstawione wyniki pokazują możliwość eliminacji zjawiska cienia aerodynamicznego w układzie sondy pomiarowej. Wyjaśnienia wymaga niepełna zgodność otrzymanych wyników z wartościami odniesienia dla sygnałów MBS, szczególnie widoczna w dolnym zakresie prędkości.

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] Kovaszny L.S.G., *Hot-wire investigation of the wake behind cylinders at low Reynolds numbers*, Proc. Roy. Soc. A 198 (1949) 174-190.
- [2] Walker R.E., Westenberg A.A., *Absolute Low Speed Anemometer*, Rev. Sci. Instrum. 27, (1956) 844-848.
- [3] Kielbasa J., Piwowarczyk J., Rysz J., Smolarski A.Z., Stasicki B., *Heat Waves In Flow Metrology*, [in:] H.H. Dijkstra, E.A. Spencer (Eds.), *Flow Measurement of Fluids*, North Holland, Amsterdam, 1978, pp. 403-407.
- [4] Rachalski A., *Absolute measurement of low gas flow by means of the spectral analysis of the thermal wave*, Rev Sci Instrum. 84 (2013) 025105.
- [5] Kielbasa J., *Pomiar śladów aerodynamicznych i cieplnych*, Archiwum Górnictwa 44, (1999) 71-84.
- [6] Bujalski M., *Stanowisko pomiarowe z modulem liniowym o napędzie serwokrokowym do badania metod pomiaru prędkości przepływu powietrza*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN 16, Nr 3-4, (2014) 43-46.
- [7] Ligęza P., *Four-point non-bridge constant-temperature anemometer circuit*, Exp. Fluids 29, (2000) 505-507.
- [8] Kęsek D., Rachalski A., *Wykorzystanie sygnału typu MBS do pomiaru prędkości przepływu i dyfuzyjności temperaturowej powietrza w anemometrze z falą cieplną*, Przegląd Elektrotechniczny 90, (2014) 172-174.
- [9] Bujalski M., Rachalski A., Ligęza P., Poleszczyk E., *The Use of Multifrequency Binary Sequences MBS Signal in the Anemometer with Thermal Wave*, Proceedings of the 10th International Conference on Measurement, Smolenice, Slovakia 2015, pp. 297-300.

Optimization of Spatial Transmitter – Detector Configuration in Thermal Wave Method

Abstract

The paper presents studies of anemometer with thermal wave in the range of low velocities. Configuration with the single transmitter and two wave detectors was used. The study was carried by the method of moving probe in still air. Rectangular and MBS signal was applied on the transmitter. Velocity was determined by the spectral analysis of the signals from wave detectors. The influence of transmitter-detectors configuration on obtained results, caused by aerodynamic shadow phenomenon, was observed.

Keywords: thermal anemometry, configuration, thermal waves, flow velocity measurement