

Rozkład prędkości przepływu w obszarze sondy anemometru z falą cieplną

MAREK GAWOR, JACEK SOBCZYK, WALDEMAR WODZIAK, PAWEŁ LIGĘZA,
ANDRZEJ RACHALSKI, PAWEŁ JAMRÓZ, KATARZYNA SOCHA, JAN PALACZ

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

Streszczenie

W pracy przedstawiono badania pola prędkości wokół trójwłóknowej sondy termoanemometrycznej stosowanej do pomiaru prędkości przepływu metodą fal cieplnych. Porównano wartości prędkości wyznaczone za pomocą metody fal cieplnych ze zmierzonymi metodą PIV. Badania przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym zamkniętym, w zakresie prędkości przepływu powietrza od 15 do 40 cm/s. Do badań zastosowano sondę termoanemometryczną trójwłóknową, o włóknach wzajemnie równoległych, umieszczonych poziomo i zorientowanych prostopadle względem wektora prędkości przepływu. Zgodnie z przewidywaniami zaobserwowano występowanie zjawiska cienia aerodynamicznego w całym obszarze sondy, które sprawia, że zmierzone wartości prędkości są wyraźnie mniejsze od prędkości napływu. Porównano podłużne profile prędkości zmierzone metodą PIV z wartościami wyznaczonymi metodą fal cieplnych. Prędkość przepływu na drodze pomiędzy detektorami fali wyznaczona metodą fal cieplnych jest zbliżona do średniej wartości prędkości wyznaczonej metodą PIV. Natomiast prędkość na drodze od nadajnika fali do pierwszego detektora wyznaczona metodą fal cieplnych jest wyraźnie mniejsza od wartości wyznaczonej metodą PIV. Wynika to z różnicy faz pomiędzy napięciem a prądem na nadajniku fali temperaturowej. Uzyskane na obecnym etapie wyniki nie pozwalają na opracowanie efektywnej metody korekcji wpływu zjawiska cienia aerodynamicznego na wyniki pomiarów falą cieplną.

Słowa kluczowe: pomiar prędkości, fale temperaturowe, PIV

Wprowadzenie

Metoda fal cieplnych znajduje zastosowanie m.in. do pomiaru bardzo małych prędkości przepływu, nawet rzędu kilku cm/s. Jest mało wrażliwa na zmianę parametrów płynącego gazu takich jak temperatura i skład gazu [1]. Jednak pomiar bardzo małych prędkości nakłada na sondę pomiarową pewne szczególne wymagania wynikające z natury propagacji fal cieplnych w płynącym ośrodku.

W zjawisku propagacji fal cieplnych biorą udział dwa sprzężone ze sobą mechanizmy: unoszenie fali cieplnej z płynącym gazem oraz dyfuzja temperaturowa [2]. Wpływ dyfuzji temperaturowej na prędkość fali jest bardziej zauważalny w miarę, jak prędkość przepływu maleje i objawia się szybszym zanikiem fali w miarę oddalania się od źródła oraz dyspersją fali. Powoduje to konieczność uwzględnienia dyfuzji temperaturowej w metodzie pomiaru.

Dyspersja fali sprawia że do pomiaru nie można używać fali o jednej dominującej częstotliwości. Dlatego też trzeba stosować sygnał zawierający kilka harmonicznych fali owystarczająco dużej amplitudzie; np. sygnał prostokątny lub sygnał typu MBS (*multifrequency binary sequence*), tak aby można było skorzystać z podanej teoretycznie zależności dyspersyjnej [3,4]. Biorąc pod uwagę szybkie zanikanie fali w miarę wzrostu odległości od źródła, wskazane jest aby nadajnik fali oraz detektory były umieszczone możliwie blisko siebie. Taka konfiguracja jest niekorzystna aerodynamicznie, z powodu zaburzenia przepływu przez włókna nadajnika fali i detektorów oraz ich wsporniki, co manifestuje się zjawiskiem cienia aerodynamicznego [5].

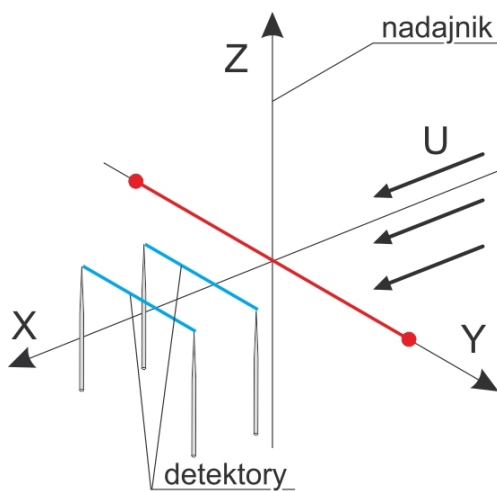
Dlatego istnieje potrzeba zbadania zaburzeń pola prędkości w obszarze sondy i odniesienia otrzymanych wyników do wartości prędkości wyznaczonych za pomocą metody fal cieplnych. Do badania pola prędkości w obszarze sondy zastosowano metodę PIV (*particle image velocimetry*).

Opis badań

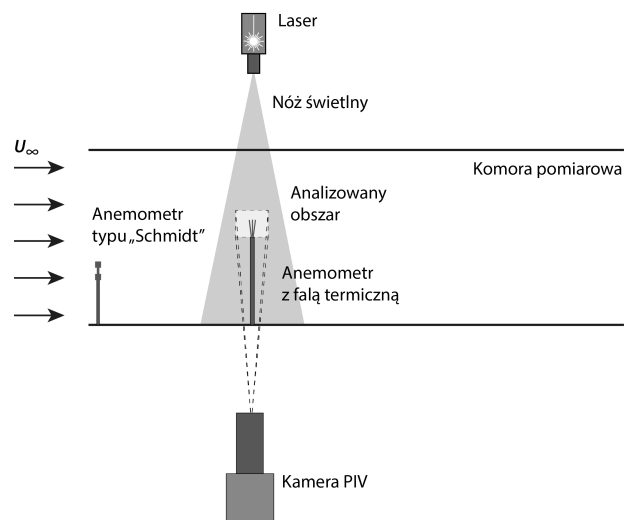
Badana sonda, jak przedstawiono na Rys. 1 składała się z trzech równoległych włókien wykonanych z drutu wolframowego o średnicy 8 μm (nadajnik) i 5 μm (detektory), położonych poziomo, wzajemnie równoległe i prostopadłe do wektora prędkości. Odległość pomiędzy nadajnikiem fali a pierwszym detektorem wynosiła 3.73 mm, a pomiędzy detektorami 3.9 mm. Układ sondy był zasilany za pomocą cyfrowego anemometru-termometru CCC2002 sterowanego komputerem [7]. Do wytwarzania fali zastosowano sygnał prostokątny o częstotliwości 0,26, 0,55 i 1,27 Hz. Współczynnik nagrzania nadajnika fali przyjmował naprzemiennie wartości 1,0 i 1,8. Sygnały z nadajnika fali i detektorów rozkładano na składowe harmoniczne, a następnie obliczano przesunięcie fazowe pomiędzy odpowiednimi składowymi. Przesunięcia fazowe i -tej harmonicznej spełnia poniższą zależność [2]:

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

gdzie U – prędkość gazu, x – odległość pomiędzy włóknami, ω_i – częstość kołowa i -tej harmonicznej fali temperaturowej, κ – dyfuzyjność temperaturowa gazu. W rezultacie, dla zmierzonych wartości przesunięcia fazowego $\Delta\varphi_i$ otrzymujemy układ równań z dwoma niewiadomymi wielkościami: prędkością przepływu U oraz dyfuzyjnością temperaturową gazu κ . Układ powyższy rozwiązujemy numerycznie, wyznaczając niewiadomą wielkość U [6].



Rys. 1. Sonda trójwłóknowa i jej orientacja w badanym przepływie

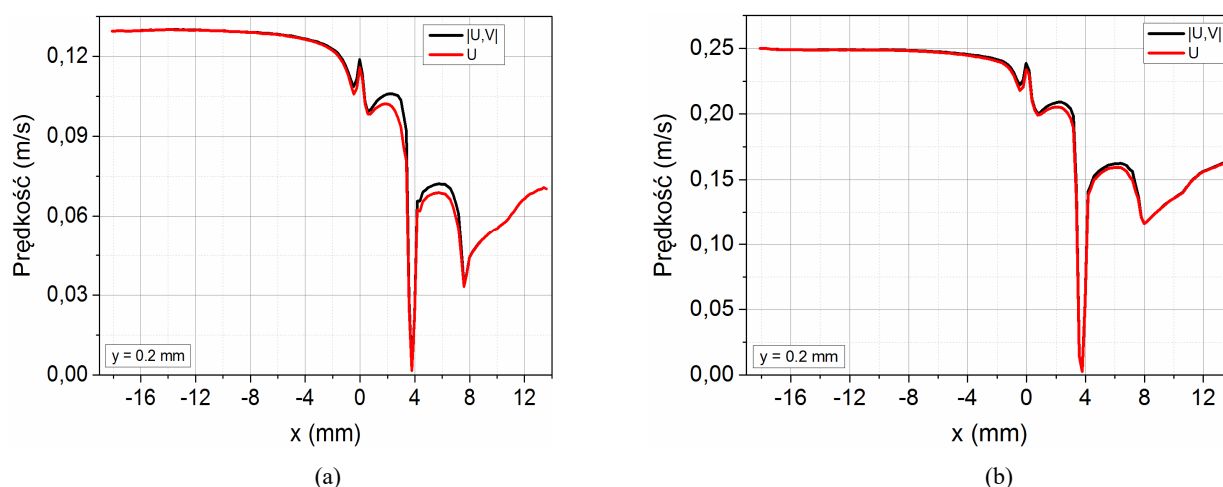


Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego

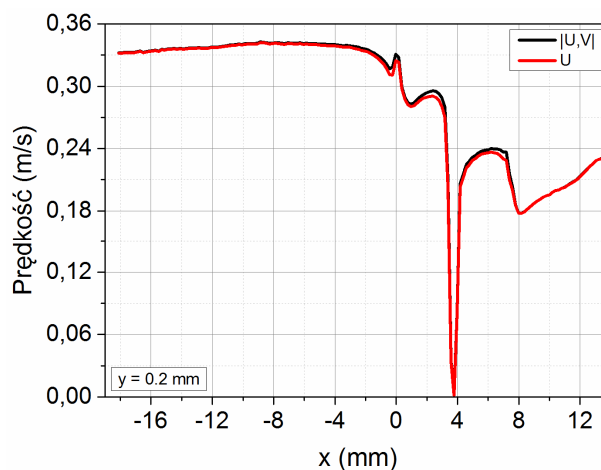
Pomiary przeprowadzono tunelu aerodynamicznym zamkniętym, dla prędkości napływu U_∞ równej 13, 25 i 33 cm/s. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na Rys. 2. Dla każdej zadanej prędkości napływu przeprowadzono dwie serie pomiarów: w atmosferze bez posiewu – prędkość napływu mierzono za pomocą termooanemometru typu „Schmidt”, oraz z posiewem – prędkość napływu mierzono równocześnie za pomocą termooanemometru typu „Schmidt”, i metodą PIV. Równocześnie, w każdej serii pomiarowej przeprowadzano pomiar prędkości metodą fal cieplnych.

Analiza wyników

Na rysunku 3 i 4 przedstawiono podłużne profile prędkości w płaszczyźnie włókien sondy. Kierunek przepływu jest zorientowany od lewej do prawej strony wykresów. Wielkość U oznacza składową podłużną (prostopadłą do włókien sondy), natomiast V składową poprzeczną wektora prędkości. Jak widać z wykresów wartości składowej poprzecznej są niewielkie w porównaniu do składowej podłużnej prędkości i można przyjąć, że kierunek przepływu jest zgodny z osią OX. Współrzędna $x = 0$ odpowiada położeniu nadajnika fali, pierwszy detektor jest usytuowany punkcie o współrzędnej $x = 3,73$ mm, współrzędna drugiego detektora wynosi $x = 7,63$ mm. Zgodnie z oczekiwaniami, występuje zjawisko aerodynamicznego cienia prędkości za opływającym włóknem. Widoczny jest spadek prędkości przed nadajnikiem fali, oraz kolejne zmniejszenie prędkości za nadajnikiem fali i za pierwszym detektorem. W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów prędkości metodą fal temperaturowych dla różnych wartości prędkości napływu. Prędkość U_{f2-1}



Rys. 3. Poziome profile prędkości dla prędkości napływu $U_\infty = 13$ cm/s (a), 25 cm/s (b)



Rys. 4. Poziome profile prędkości dla prędkości napływu $U_\infty = 33$ cm/s

Tab. 1. Porównanie prędkości przepływu zmierzonej metodą fal cieplnych pomiędzy detektorami fali U_{f2-1} , nadajnikiem a pierwszym detektorem U_{f1-ND} oraz nadajnikiem a drugim detektorem U_{f2-ND} z prędkością napływu U_∞

Schmidt	PIV	U_{f2-1} [cm/s]	U_{f1-ND} [cm/s]	U_{f2-ND} [cm/s]
15,3	13,0	8,30	7,9	8,1
27,1	25,0	19,1	18,5	18,8
37,9	33,0	27,7	24,1	25,5

wyznaczona z przesunięcia fazy fali temperaturowej pomiędzy pierwszym a drugim detektorem jest nieznacznie większa od uśrednionej wartości wyznaczonej metodą PIV w tym obszarze. Natomiast prędkość U_{f1-ND} pomiędzy nadajnikiem fali a pierwszym detektorem jest mniejsza od prędkości wyznaczonej metodą PIV dla tego obszaru, lecz również jest mniejsza od prędkości U_{f2-1} w obszarze między detektorami fali. Stoi to w sprzeczności z wynikami wcześniejszych badań śladu aerodynamicznego za grzanym włóknem, przeprowadzonych za pomocą termoanemometru z kompensacją temperatury [5]. Również przedstawione powyżej wyniki pomiaru prędkości otrzymane metodą PIV pokazują, że prędkość w obszarze pomiędzy nadajnikiem fali a pierwszym detektorem jest większa od prędkości pomiędzy detektorami fali. Świadczy to o tym, że wyznaczenie prędkości przepływu metodą fal temperaturowych oparte na pomiarze przesunięcia fazowego na drodze pomiędzy nadajnikiem fali a detektorem nie jest poprawne. Jedną z przyczyn takiego wyniku może być fakt nieuwzględnienia stałej czasowej nadajnika fali. Dokonując pomiaru przesunięcia fazowego pomiędzy nadajnikiem a detektorem porównujemy sygnały napięciowe. Jednak miarą temperatury nadajnika jest nie napięcie, lecz jego oporność. Nadajnik wraz opływającym go gazem posiada pewną bezwładność cieplną która powoduje występowanie opóźnienia przebiegu temperatury na nadajniku fali w stosunku do napięcia. W konsekwencji rzeczywisty przyrost fazy na drodze od nadajnika do detektora jest mniejszy od zmierzonego, a więc wyznaczona prędkość jest mniejsza od rzeczywistej. Problem ten nie występuje w sytuacji, gdy mierzymy przesunięcie fazowe pomiędzy detektorami fali. Ponieważ detektory są identyczne i pracują w stałoprądowym układzie pomiaru temperatury, to ich stałe czasowe mają praktycznie jednakową wartość i przy wyznaczaniu przesunięcia fazowego wzajemnie się znoszą. W tabeli 2 przedstawiono wzajemne stosunki zmierzonych prędkości przepływu metodą fali temperaturowej oraz ich stosunek do prędkości napływu. W przedstawionych danych trudno doszukać się prawidłowości, które pozwalałyby znaleźć efektywną metodę kompensacji wpływu zjawiska cienia aerodynamicznego na pomiar prędkości przepływu. Jedną z przyczyn jest to, że badania przeprowadzono tylko dla trzech wartości prędkości napływu, a więc ilość danych jest zbyt mała.

Tab. 2. Stosunek prędkości przepływu zmierzonej metodą fal cieplnych do prędkości napływu

U_{f2-1}/U_{∞}	U_{f1-ND}/U_{∞}	U_{f2-ND}/U_{∞}	U_{f1-ND}/U_{f2-ND}	U_{f2-ND}/U_{f2-1}
64,1%	60,4%	62,5%	94,2%	97,6%
76,4%	72,6%	74,6%	95,0%	97,6%
84,0%	72,9%	77,2%	86,8%	92,0%

Podsumowanie

Pole prędkości wokół trójwłóknowej sondy termoanemometrycznej ma złożoną postać. Obszar „czynny metrologicznie”, tj. w sąsiedztwie włókien sondy i ich wsporników znajduje się pod wpływem oddziaływania aerodynamicznego pozostałych części sondy. Stwierdzono występowanie zjawiska cienia aerodynamicznego w tym obszarze, przy czym największy spadek prędkości zachodzi pomiędzy detektorami fali. Porównanie zmierzonych metodą PIV podłużnych profili prędkości pomiędzy nadajnikiem fali a detektorami wskazuje na występowanie dodatkowego zjawiska, nie związanego z cieniem aerodynamicznym – zmniejszenia prędkości propagacji fali temperaturowej. Zjawisko to może być związane z występowaniem różnicy faz pomiędzy napięciem a prądem na nadajniku fali temperaturowej.

Uzyskane na obecnym etapie wyniki nie pozwalają na opracowanie efektywnej metody korekcji wpływu cienia aerodynamicznego na wyniki pomiarów metodą fal cieplnych.

Praca została wykonana w roku 2019 w ramach prac statutowych realizowanych w Instytucie Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

Literatura

- Rachalski A., Poleszczyk E., Zięba M.: *Use of the thermal wave method for measuring the flow velocity of air and carbon dioxide mixture*. Measurement **95**, 210-215 (2017).
- Kiełbasa J.: *Fale cieplne w metrologii powolnych przepływów*. Wyd. AGH, Kraków, 1975.

- 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.
- 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), 172-174 (2014).
- Kiełbasa J.: *Pomiar śladów aerodynamicznych i cieplnych*. Archives of Mining Science **44** (1), 71-84 (1999).
- Rachalski A.: *Absolute measurement of low gas flow by means of the spectral analysis of the thermal wave*. Rev Sci Instrum. **84** (2), 025105 (2013).
- Ligęza P.: *Four-point non-bridge constant-temperature anemometer circuit*. Experiments in Fluids **29** (5), 505-507 (2000).

Flow velocity distribution in the probe area of the anemometer with thermal wave

Summary

The paper presents tests of the velocity field around the triple thin wire probe used to measure the flow velocity with the thermal waves method. Velocity values determined using the thermal wave method were compared to those achieved with the PIV method. The tests were carried out in a closed circuit wind tunnel, in the range of air flow velocity ranging from 15 to 40 cm/s. A three thin wire probes with mutually parallel wires, horizontally placed and oriented perpendicularly to the flow velocity vector was used for the tests. As expected, the velocity wake phenomenon was observed throughout the probe area, which means that the measured velocity values are clearly lower than the inflow velocity. The longitudinal velocity profiles measured with the PIV method were compared to the values determined with the thermal wave method. The value of flow velocity on the distance between the wave detectors determined with the thermal wave method is similar to the average velocity value determined with the PIV method. However, the velocity within the area between the wave emitter and the first detector determined with the thermal wave method is clearly lower than the value determined with the PIV method. This is due to the phase lag between voltage and current at the wave transmitter. The results obtained at this stage do not allow for the development of an effective method of correcting the effect of the wake on the results of thermal wave measurements.

Keywords: flow velocity measurement, thermal waves, PIV