

Analiza statycznych warunków pracy czujnika termooanemometrycznego w układzie stałotemperaturowym w zależności od średnicy włókna pomiarowego

PAWEŁ LIGEZA

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

Streszczenie

Jednym z istotnych zagadnień w wielu obszarach współczesnej nauki i techniki są badania pól prędkości i temperatury w przepływach gazu. Termooanemometria jest jedną z podstawowych metod pomiarowych stosowanych w takich badaniach. Jest to metoda pomiaru prędkości przepływu gazu pośrednio, poprzez pomiar strat ciepłych nagrzanego elementu umieszczonego w badanym przepływie. W metodzie tej istotny jest właściwy i optymalny dobór czujnika pomiarowego do badanego zagadnienia metrologicznego. W pracy przedstawiono i poddano analizie statyczne warunki pracy czujnika termooanemometrycznego w układzie stałotemperaturowym w zależności od średnicy włókna pomiarowego.

Słowa kluczowe: pola prędkość przepływu, termooanemometria, czujnik pomiarowy, średnica włókna, charakterystyki statyczne

1. Wprowadzenie

Termooanemometria jest pośrednią metodą pomiaru prędkości przepływu gazu, poprzez pomiar strat ciepłych grzanego elementu umieszczonego w badanym przepływie. Metoda ta posiada szeroki zakres pomiarowy oraz umożliwia badania przepływów szybkozmiennych. Termooanemometria 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 wyznaczonej przez rozmiarami elementu pomiarowego czujnika termooanemometrycznego. Typowym elementem pomiarowym jest przewodzące włókno o średnicy kilku mikrometrów. Prąd elektryczny nagrzewa element pomiarowy, umożliwiając jednocześnie pomiar jego temperatury. Przeprowadzenie bilansu cieplnego dla elementu pomiarowego pozwala na wyznaczenie mierzonej prędkości przepływu. Najczęściej stosowanym układem zasilania czujnika termooanemometrycznego jest układ stałotemperaturowy [3]. Jest to układ elektroniczny, który zasila czujnik prądem o takiej wartości, aby rezystancja nagrzanego czujnika utrzymywana była na stałym, zadanym poziomie. Efekt ten uzyskuje się dzięki zastosowaniu pętli sprzężenia zwrotnego. Układ stałotemperaturowy posiada szereg korzystnych właściwości metrologicznych, zarówno statycznych jak i dynamicznych. Zależność napięcia wyjściowego od prędkości w całym zakresie pomiarowym jest funkcją rosnącą bez ograniczenia asymptotycznego, nie występuje tu efekt nasycenia. Głównym wyróżnikiem termooanemometru stałotemperaturowego jest możliwość pomiaru fluktuacji prędkości w szerokim spektrum częstotliwości, sięgającym setek kiloherców. 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 [4,5]. Dla poprawności i optymalizacji procesu pomiarowego ważny jest dobór parametrów czujnika i układu termooanemometrycznego do badanego zjawiska przepływowego. W pracy przedstawiono i poddano analizie statyczne warunki pracy czujnika termooanemometrycznego w układzie stałotemperaturowym w zależności od średnicy włókna.

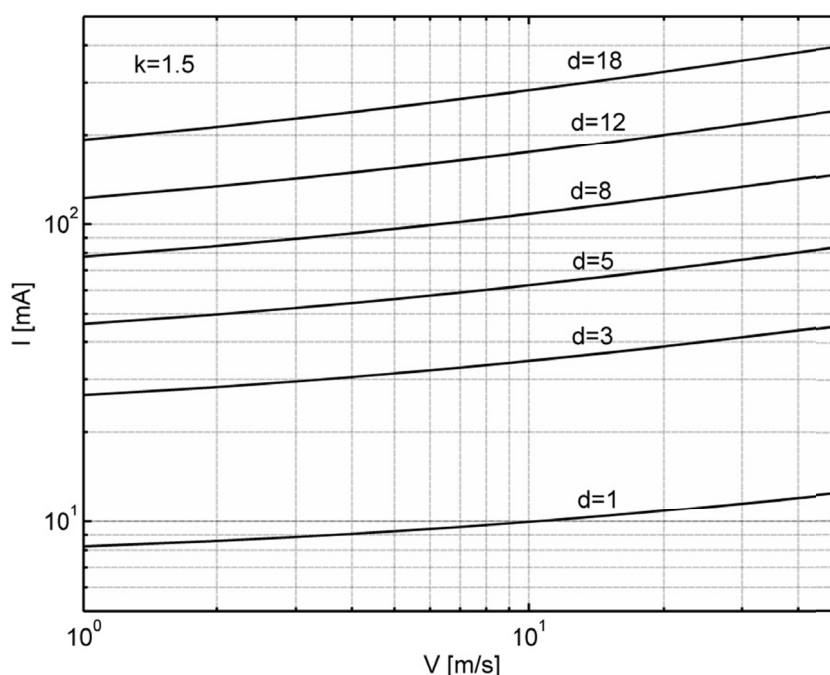
2. Analiza wpływu średnicy włókna pomiarowego na właściwości statyczne termooanemometru stałotemperaturowego

Jednym z podstawowych czynników mających zasadniczy wpływ na właściwości metrologiczne termooanemometru jest dobór średnicy włókna pomiarowego. Dla zobrazowania tego wpływu i wspierania procesu doboru średnicy włókna do wybranego procesu pomiarowego przeprowadzono badania czujników termooanemometrycznych w szerokim zakresie średnicy włókna pomiarowego, od jednego do osiemnastu mikrometrów. Do badań przyjęto jako materiał włókna wolfram. Badania przeprowadzono dla stałotemperaturowego układu zasilania czujnika, przy dwóch współczynnikach nagrzania: $k = 1.5$ i $k = 2.0$ w odniesieniu do rezystancji włókna w temperaturze odniesienia 293K. W praktycznych pomiarach współczynnik nagrzania włókna najczęściej wybiera się w zakresie pomiędzy tymi wartościami [3]. Odpowiada to temperaturze nagrzanego włókna w zakresie od około 450K do 600K. Pomimo bardzo wysokiej temperatury topnienia wolframu jego utlenianie rozpoczyna się już w temperaturze około 673K i intensyfikuje ze wzrostem temperatury, co prowadzi do zniszczenia włókna. Parametry wybranych czujników przedstawiono w tabeli 1.

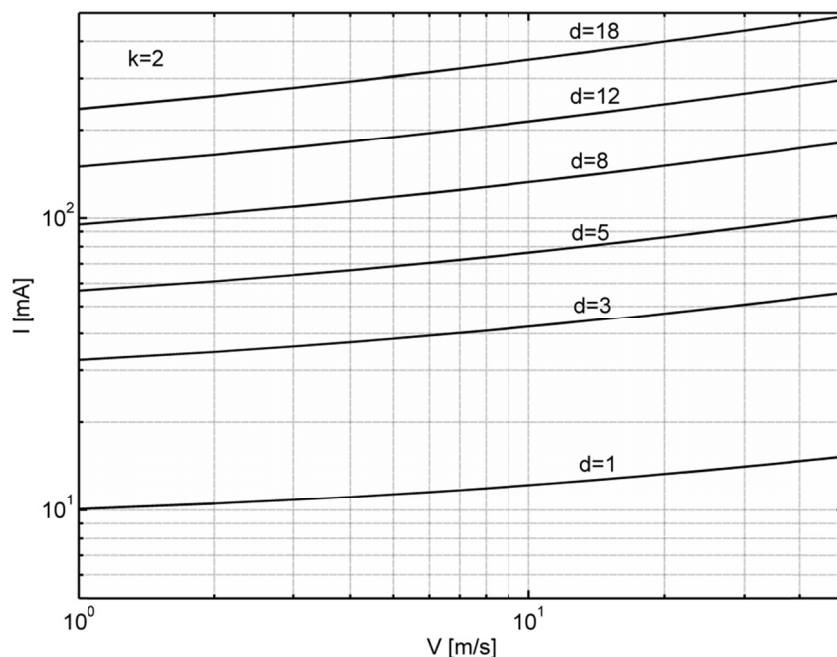
Tab. 1. Parametry badanych czujników

średnica włókna [mm]	1	3	5	8	12	18
długość włókna [mm]	0.07	0.63	1.75	4.49	10.1	22.7
materiał włókna	Wolfram W					
temperatura odniesienia [K]	293					
przybliżona rezystancja włókna [W]	5					
temperaturowy współczynnik rezystancji [1/K]	3.33×10^{-3}					
rezystancja właściwa [Wm]	5.6×10^{-8}					

Charakterystyki statyczne czujników dla zadanych współczynników nagrzania przedstawiono odpowiednio na rysunkach 1 i 2. Przedstawiają one funkcje aproksymujące zależność prądu czujnika od prędkości przepływu powietrza o temperaturze 293 K dla różnych średnic włókna d [μm]. Zakres prędkości przepływu wynosi od 1 m/s do 50 m/s. Charakterystyki ze względu na duży zakres zmienności prędkości i prądu czujnika przedstawiono w układzie logarytmiczno-logarytmicznym.

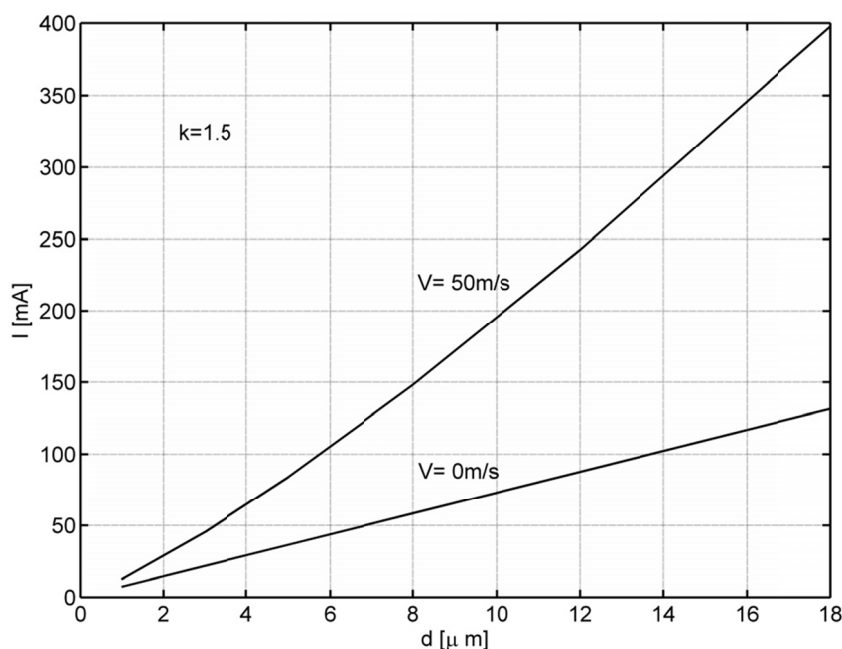


Rys. 1. Stałotemperaturowe charakterystyki statyczne czujników o różnych średnicach włókna d [mm] dla współczynnika nagrzania $k = 1.5$



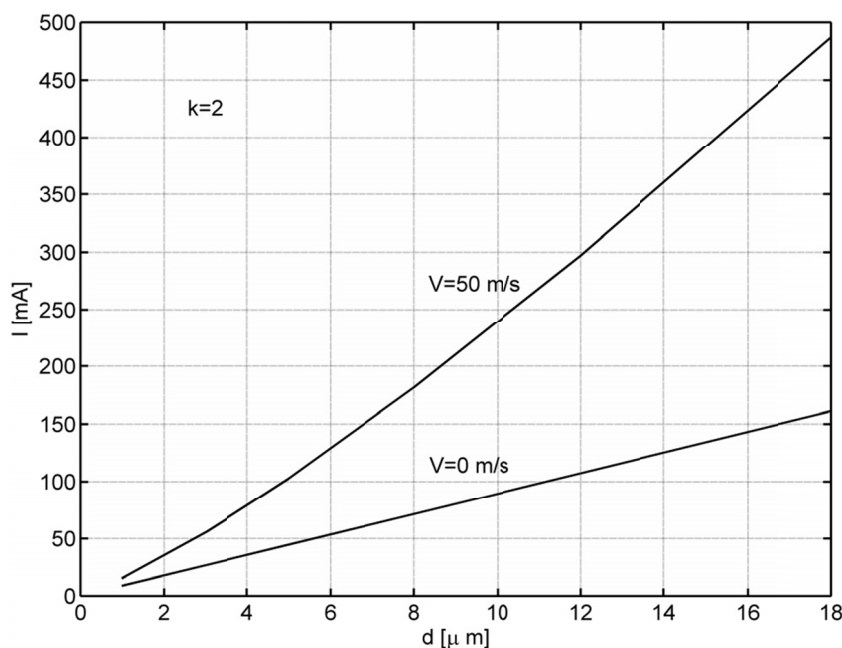
Rys. 2. Stałotemperaturowe charakterystyki statyczne czujników o różnych średnicach włókna d [mm] dla współczynnika nagrzania $k = 2.0$

Przedstawione krzywe pozwalają na oszacowanie wymaganego w układzie stałotemperaturowym prądu czujnika o wybranej średnicy, koniecznego do utrzymania zadanego współczynnika nagrzania w badanym zakresie prędkości. Na podstawie uzyskanych danych wyznaczono zależność prądu czujnika od średnicy włókna pomiarowego dla wybranych skrajnych prędkości 0 m/s i 50 m/s. Przebieg tych prądów dla współczynnika nagrzania $k = 1.5$ przedstawiono na rysunku 3, a dla współczynnika nagrzania $k = 2.0$ przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 3. Zależność prądu czujnika termooanemometrycznego w układzie stałotemperaturowym od średnicy włókna dla dwóch skrajnych prędkości 0 m/s i 50 m/s przy współczynniku nagrzania $k = 1.5$

Na przedstawionych na rysunkach 3 i 4 wykresach można zaobserwować interesujący fakt, że przy ustalonej temperaturze włókna i zerowej prędkości, zależność prądu od średnicy włókna jest praktycznie liniowa. Dla cienkich drutów w takich warunkach, strumień ciepła odbieranego przez medium na jednostkę



Rys. 4. Zależność prądu czujnika termooanemometrycznego w układzie stałotemperaturowym od średnicy włókna dla dwóch skrajnych prędkości 0 m/s i 50 m/s przy współczynniku nagrzania $k = 2.0$

długości włókna, nie jest istotnie zależny od średnicy drutu. Natomiast strumień ciepła Joula-Lentza nagrzewającego włókno, na jednostkę jego długości, jest proporcjonalny do kwadratu prądu czujnika i rezystancji jednostkowego odcinka włókna. Dla danego materiału włókna, rezystancja jego jednostkowego odcinka jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu średnicy. W stanie ustalonym, przy równości obu strumieni, prąd ogrzewający włókno do zadanej temperatury jest więc proporcjonalny do średnicy włókna. Natomiast dla prędkości przepływu większych od zera nachylenie wykresu prądu czujnika rośnie w funkcji średnicy włókna. Związane to jest z faktem, że strumień ciepła odbieranego przez medium jest zależny od liczby Reynoldsa, która stanowi funkcję prędkości przepływu, ale także średnicy włókna [4,5]. Na podstawie wykresów przedstawionych na rysunkach 3 i 4 można wyznaczyć zakres wymaganego prądu czujnika termooanemometrycznego pracującego w układzie stałotemperaturowym dla wybranej średnicy włókna w przedstawionym zakresie prędkości przepływu.

3. Konkluzje

Kluczowym kryterium przy doborze średnicy włókna termooanemometrycznego czujnika pomiarowego jest wymagane częstotliwościowe pasmo przenoszonych fluktuacji. Dla uzyskania wysokiej częstotliwości granicznej termooanemometru konieczna jest minimalizacja średnicy włókna. Zagadnienie to jest przedmiotem wielu prac [6-12]. W tym artykule przedstawiono i poddano analizie statyczne warunki pracy czujnika termooanemometrycznego w układzie stałotemperaturowym w zależności od średnicy włókna. Na podstawie przeprowadzonych badań oszacowano wartości wymaganego w układzie stałotemperaturowym prądu czujnika o wybranej średnicy, koniecznego do utrzymania zadanej wartości współczynnika nagrzania w badanym zakresie prędkości. Przy wyborze średnicy włókna pomiarowego poza pasmem przenoszenia należy uwzględnić dodatkowe kryteria:

- zakres prądu czujnika dostępny w stałotemperaturowym systemie pomiarowym,
- stopień inwazyjności aerodynamicznej i termicznej włókna na badane zjawisko,
- nachylenie charakterystyki statycznej i zakres sygnału wyjściowego,
- stosunek sygnału użytecznego do szumu,
- trwałość mechaniczną i termiczną włókna czujnika,
- podatność na zanieczyszczenia i inne czynniki wpływające na zmianę charakterystyki,
- rozmiary geometryczne włókna czujnika (długość) i wsporników,
- możliwości i wymagania technologiczne,
- inne elementy oddziaływania instrumentu pomiarowego na badane zjawisko.

Wybór średnicy włókna czujnika jest niejednokrotnie kompromisem pomiędzy przeciwstawnymi wymaganiami. Artykuł ten ma za zadanie w połączeniu z innymi publikacjami i dostępną wiedzą wspomagać optymalny dobór średnicy włókna pomiarowego w praktycznych zagadnieniach metrologicznych.

Praca finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na projekt badawczy 2017/25/B/ST8/00212: „Nowatorska metoda badania wysoko-amplitudowych, szybkozmiennych przepływów pulsacyjnych – modelowanie, optymalizacja i weryfikacja eksperymentalna”.

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] Ligeza P.: *Układy termooanemometryczne – struktura, modelowanie, przyrządy i systemy pomiarowe*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2001.
- [4] Ligeza P.: *Simultaneous velocity and temperature measurements in transient gas flows*. (book); IMG PAN, Kraków, 2009.
- [5] Ligeza P.: *Compendium of two-state hot-wire anemometer measurement method*.(book); IMG PAN, Kraków, 2012.
- [6] Elsner J.W.: *Turbulencja przepływów*. PWN, Warszawa, 1987.
- [7] Li D.J.: *Dynamic response of constant temperature hot-wire system in turbulence velocity measurements*. Meas. Sci. Technol. 2004, 15, 1835-1847.
- [8] Li D.J.: *The effect of electronic components on the cut-off frequency of the hot-wire system*. Meas. Sci. Technol. 2005, 16, 766-774.
- [9] Li D.J.: *Dynamic response of constant temperature hot-wire system under various perturbations*. Meas. Sci. Technol. 2006, 17, 2665-2675.
- [10] Ligeza P.: *Constant-bandwidth constant-temperature hot-wire anemometer*. Review of Scientific Instruments, vol. 78, 2007.
- [11] Ligeza P.: *Construction and experimental testing of the constant-bandwidth constant-temperature anemometer*. Review of Scientific Instruments, vol. 79, 2008.
- [12] Ligeza P.: *An investigation of a constant-bandwidth hot-wire anemometer*. Flow Measurement and Instrumentation, vol. 20, 2009.

Analysis of static operating conditions of a hot-wire anemometric sensor in a constant-temperature system depending on the filament diameter

Abstract

One of the important issues in many areas of modern science and technology are studies of velocity and temperature fields in gas flows. Hot-wire anemometry is one of the basic measurement methods used in such studies. It is a method of measuring the gas flow velocity indirectly, by measuring the heat losses of a heated element placed in the tested flow. In this method, the correct and optimal selection of a measuring sensor for the tested metrological issue is of very important. The work presents and analyzes the static operating conditions of a hot-wire anemometric sensor in a constant-temperature system depending on the filament diameter.

Keywords: flow velocity field, hot-wire anemometry, measuring sensor, filament diameter, static characteristics