

Analiza teoretyczna i opracowanie założeń oraz prognozowanie niepewności i obszaru aplikacyjnego systemu pomiarowego anemometru wiracyjnego

JAN KIELBASA, KONRAD PAPIERZ, ANDRZEJ RACHALSKI

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

Streszczenie

Omówiono metody pomiaru prędkości przepływu gazu anemometrem z drgającym włóknem. Grzane włókno tego anemometru pracujące w systemie stałoprądowym lub stałorzystancyjnym, umieszczone w przepływającym strumieniu prostopadle do przepływu poddawane jest sinusoidalnym drganiom o ustalonej częstotliwości i znanej amplitudzie w płaszczyźnie równoległej do prędkości przepływu. Mierzy się napięcie jakie występuje na grzanym włóknie jako funkcję czasu. Wyznaczenie prędkości przepływu gazu można dokonać dwiema metodami: na podstawie analizy czasowej lub na podstawie analizy częstotliwościowej.

Słowa kluczowe: anemometr wiracyjny, anemometr cieplny, metoda absolutna pomiaru prędkości

1. Wstęp

Czujniki do pomiaru prędkości przepływu płynów, szczególnie gazów muszą zostać wcześniej poddane procesowi wzorcowania. Dla prędkości przepływu, które na rurce spiętrzeniowej dają spadek ciśnienia mierzalny z dostateczną dokładnością wystarczy rurka Pitota (Pitot tube). Dla prędkości mniejszych można stosować metodę fal cieplnych (Walker i Westenberg, 1956; Kielbasa, 1978, 2005; Kielbasa i in., 1978; Rachalski, 2006), która jest metodą bezwzględną. Dobrze jest mieć drugą metodą bezwzględną aby móc je wzajemnie porównać. Często także w pracy laboratoryjnej zachodzi konieczność pomiaru małych prędkości przepływu medium o bardzo wolno zmieniającym się składzie lub powoli zmieniającej temperaturze. Stosowanie w tym przypadku anemometru z grzanym włóknem w jego klasycznej aplikacji prowadzi do znacznych błędów pomiarowych, gdyż straty ciepłe drutu, które są miarą prędkości przepływu zależą również od składu gazu jak i jego temperatury. Także klasyczne równanie Kinga (King, 1914) jest słuszne dla prędkości przepływu (dla powietrza) spełniające warunek

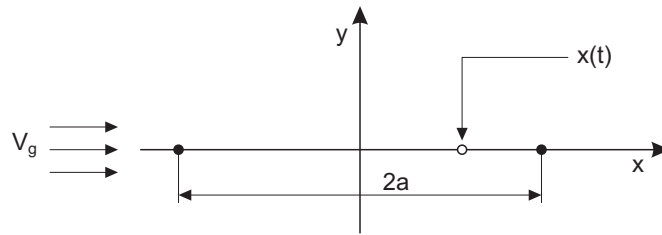
$$vd > 0.0187$$

gdzie d jest średnicą włókna, co dla $d = 5 \mu\text{m}$ daje $v > 37.4 \text{ cm/s}$. Nie pozwoli to na wzorcowanie czujników w zakresie cm/s .

W 1969 roku znana wówczas duńska firma (DISA, 1969 – dzisiaj DANTEC) wprowadziła na rynek nowy przyrząd do pomiaru powolnych przepływów gazu tzw. „Low velocity anemometer” (DISA Information, 1969). W anemometrze tym grzany drut sondy termooanemometrycznej umieszczony jest w przepływie prostopadle do wektora prędkości przepływu gazu, zaś płaszczyzna, w której zachodzą drgania drutu jest do niej równoległa, a amplituda drgań drutu jest na tyle mała, że przepływ można uważać za niezakłócony (Rys. 1).

Położenie sondy (Rys. 1) możemy opisać równaniem

$$x = a \sin(\omega t) \quad (1)$$

Rys. 1. Położenie osi sondy względem środka układu współrzędnych (x, y)

lub

$$x = a \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

gdzie:

- a – amplituda wibracji,
- ω – pulsacja wibracji,
- f – częstotliwość wibracji,
- t – czas.

Prędkość chwilowa $v(t)$ grzanego włókna względem nieruchomego układu współrzędnych (x, y) wyznaczamy różniczkując względem czasu równanie (2)

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = 2\pi fa \cos(2\pi ft) = v_0 \cos(2\pi ft) \quad (3)$$

gdzie

$$v_0 = 2\pi fa \quad (4)$$

jest amplitudą prędkości drgającej sondy.

Wibrujący z prędkością $v(t)$ grzany drut umieszczony jest w gazie płynącym z prędkością v_g , stąd prędkość opływu $v_w(t)$ grzanego drutu jest równa

$$v_w(t) = v_g - v(t) = v_g - v_0 \cos(2\pi ft) \quad (5)$$

gdzie $v_w(t)$ jest chwilową prędkością opływu grzanego włókna, v_g prędkością przepływu medium.

Wykorzystując fakt, że sygnał z czujnika anemometrycznego jest niezależny od zwrotu prędkości przepływu jego charakterystyka napięciowo-prędkościowa może być dla małych prędkości dobrze opisana parabolą

$$U = A + Bv_w^2 \quad (6)$$

gdzie U oznacza napięcie na grzanym włóknie, v_w prędkość opływającego medium, A i B stałe uzyskiwane w procesie wzorcowania sondy.

Wykorzystując (5) i (6) napięcie na grzanym włóknie jest wówczas równe

$$U(t) = A + B[v_g - v_0 \cos(2\pi ft)]^2 \quad (7)$$

Dzięki specjalnej analizie sygnału elektrycznego uzyskiwanego z drgającego grzanego drutu polegającej na odcięciu składowej stałej i całkowaniu modułu z reszty dostaje się

$$U_1 = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\frac{\pi}{2}} |2Bv_0v_g \cos(2\pi ft)| - \left| \frac{B}{2} v_0^2 \cos(2\pi ft) \right| dt \right] = \frac{8B}{\pi} v_0 v_g \quad (8)$$

czyli sygnał, który dla niewielkich prędkości przepływu v_g jest wprost proporcjonalny do tej prędkości. Zakres mierzonych prędkości jest w tym przyrządzie zawarty w granicach od około minus 30 do 30 cm/s,

a sam przyrząd jak każdy anemometr cieplny wymaga wzorcowania i jest wrażliwy na skład medium i jego temperaturę.

Autorzy (Kiełbasa, 2008, 2010; Papierz i Kiełbasa, 2011a i b) proponują inne sposoby wykorzystania sondy z wibrującym grzanym drutem stosując zupełnie inne algorytmy opracowywania sygnału elektrycznego, w wyniku czego można wyznaczyć prędkość i zwrot przepływu gazów w szerszych granicach, także w przypadku powolnych zmian temperatury i składu gazu.

2. Pomiar prędkości na podstawie analizy czasowej

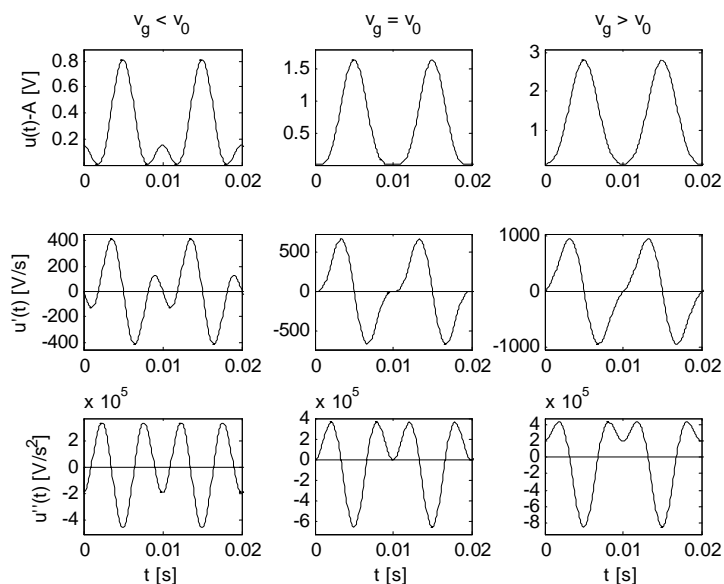
Przedstawiona wzorem (5) tzw. prędkość efektywna może być cały czas dodatnia, przyjmować przez część okresu wartość ujemną, bądź też posiadać w okresie dokładnie jedno miejsce zerowe gdy $v_g = v_0$. Zmieniając amplitudę drgań x_0 sondy bądź częstotliwość f w przypadku zaistnienia ostatniego przypadku (jednego miejsca zerowego w okresie) mamy

$$v_0 = v_g = 2\pi x_0 f \tag{9}$$

Równanie (9) nie zależy od współczynników A i B występujących w równaniu (6) opisującym charakterystykę sondy. Zatem metodę można uznać za absolutną. Cała trudność w tym, by dokładnie określić moment zrównania prędkości przepływu z maksymalną prędkością oscylacji.

2.1. Ocena zakresu zastosowań

W metodzie analizy czasowej oprócz dokładnego pomiaru amplitudy a oscylacji włókna sondy i częstotliwości f drgań istotne jest uchwycenie momentu zrównania prędkości. Prosta droga wyznaczenia tego momentu jest obserwacja drugiej pochodnej i doprowadzenie do sytuacji gdy ma ona cztery miejsca zerowe w okresie. Sytuację tę ilustruje Rys. 2, gdzie mamy przedstawione przebiegi czasowe napięcia i jego pochodnych.



Rys. 2. Przebiegi czasowe sygnału napięcia i jego pochodnych

W kolumnie I mamy przedstawiony sygnał napięciowy z drgającej sondy (po odjęciu składowej stałej) uzyskiwany gdy prędkość $v_g < v_0$. Drugi rysunek w tej kolumnie przedstawia przebieg pierwszej pochodnej sygnału napięciowego, a trzeci rysunek przebieg drugiej pochodnej czasowej.

Łatwo zauważyć, że przebiegi te charakteryzują się czterema przejściami przez zero w okresie.

Druga kolumna przedstawia sytuację w przypadku gdy $v_g = v_0$. Wyraźnie widać, że wszystkie trzy przebiegi mają miejsce zerowe w tym samym punkcie w tym środkowy przebieg ma miejsce podwójne.

Trzecia kolumna przedstawia sytuację, gdy $v_g > v_0$. Tu we wszystkich trzech przebiegach mamy tylko dwa miejsca zerowe w okresie. Zatem liczba miejsc zerowych w okresie informuje czy mamy prędkość v_g mniejszą, równą czy większą od v_0 .

Przedstawiona metoda opiera się na zależności (6) opisującej napięcie w funkcji prędkości. Przybliżenie takie można zastosować jedynie dla małych prędkości (Walker i Westenberg, 1956), dla większych obowiązuje znany wzór Kinga. Metoda nadaje się jednakże do pomiaru zarówno małych, jak i większych prędkości – nie mieszczących się w podanym ograniczeniu. Wynika to z faktu iż jeżeli doprowadzimy do zrównania prędkości gazu z maksymalną prędkością oscylacji, to w momencie pomiaru sygnału prędkość efektywna gazu względem włókna jest zawsze bardzo bliska zeru. Tak więc zastosowanie przybliżenia (6) jest uprawnione.

3. Pomiar prędkości na podstawie analizy częstotliwościowej

Drugą metodą pomiaru prędkości gazu wykorzystująca sondę drgającym włóknem jest wykorzystanie analizy częstotliwościowej zmierzonego sygnału napięciowego. Wykorzystując równanie (7) uzyskuje się

$$u[v(t)] = A + Bv_g^2 + \frac{Bv_0^2}{2} - 2Bv_g v_0 \cos(2\pi ft) + \frac{Bv_0^2}{2} \cos(4\pi ft) \quad (10)$$

W równaniu (10) występują pierwsza i druga harmoniczna w fazie przeciwnej o amplitudach

$$h_1 = 2Bv_g v_0 \quad \text{oraz} \quad h_2 = \frac{Bv_0^2}{2} \quad (11)$$

Z (11) biorąc stosunek h_1 do h_2 wyznacza się

$$v_g = \frac{v_0 h_1}{4h_2} = \frac{\pi f x_0 h_1}{2h_2} \quad (12)$$

Podobnie jak dla metody bazującej na analizie czasowej konieczny jest pomiar amplitudy i częstotliwości drgań sondy, a ponadto wartości pierwszej i drugiej harmonicznej. Podejście to cechuje jednak mniejsza wrażliwość na zakłócenia pojawiające się w sygnale. W metodzie częstotliwościowej mierzone są amplitudy harmonicznych, a więc wpływ zakłóceń na pomiar będzie mniejszy, niż w przypadku analizy sygnału czasowego. Ponadto nie ma konieczności wykrycia momentu gdy $v_g = v_0$. Pomiar może być dokonany w dowolnym momencie. Oczywiście im większe będzie wartość obu harmonicznych w stosunku do szumu, tym mniejszym błędem będzie obarczony pomiar.

3.1. Zakres stosowania

W przeciwieństwie do wcześniej omawianej metody opierającej się na analizie czasowego przebiegu, która wymagała pomiaru sygnału tylko w jednym charakterystycznym punkcie, metoda pomiaru prędkości wykorzystująca analizę częstotliwościową z oczywistych względów – stosowana jest transformata Fouriera – wymaga ciągłej akwizycji przynajmniej kilku okresów sygnału. Jednocześnie opiera się na zależności (6), uprawnionej jedynie dla niewielkich prędkości. Podczas pomiaru prędkość efektywna cały czas musi więc być mniejsza od podanej granicy. Jest to ograniczenie tej metody. Jednocześnie jej zaletą jest możliwość pomiaru bardzo małych prędkości, brak konieczności regulacji amplitudy drgań oraz krótszy czas pomiaru w porównaniu do metody z zastosowaniem analizy przebiegu czasowego.

4. Podsumowanie

W artykule zostały przedstawione dwie metody pomiaru prędkości przepływu gazu przy pomocy termoanemometru z drgającym grzanym włóknem. Przeprowadzone wstępne pomiary potwierdziły występowanie oczekiwanych zmian kształtu sygnału, jednocześnie ujawniając konieczność zastosowania bardziej dokładnego modelu czujnika (np. w oparciu o równanie bilansu cieplnego) nad czym trwają prace. Należy tu podkreślić, że od lipca br. mgr inż. Konrad Papierz przestał pracować w Instytucie Mechaniki Górotworu PAN.

Praca została wykonana w roku 2011 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- DISA Information, 1969: *Low velocity anemometer*. Nr 7, pp. 32-35.
- Kielbasa J., 1976: *Fale cieplne w metrologii powolnych przepływów*. Zeszyty naukowe AGH. Seria Górnictwo. Z. 72.
- Kielbasa J., 2005: *Measurements of steady flow velocity using the thermal wave method*. Arch. Min. Sci., Vol. 50, No 2, p. 191-208.
- Kielbasa J., 2008. *Bezwzględna metoda pomiaru prędkości przepływu z anemometrem z drgającym grzanym włóknem*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Tom 10, Nr 1-4, 2008.
- Kielbasa J., 2010. *Measurement of gas flow velocity: Anemometer with a vibrating hot wire*. Review of Scientific Instruments, Vol. 81, 015101-015101-4.
- Kielbasa J., Rysz J., Piwowarczyk J., Smolarski A.Z., Stasicki B., 1978: *Heat waves in the metrology of flows*. Proc. of the FLOMEKO 1978 IMEKO-conference of Flow Measurement of Fluid – Groningen, pp. 403-407.
- King L.V., 1914: *On the convection of heat cylinders in a stream of fluid: Determination of the convection constants of a small tungsten (platinum) wires with applications to hot-wire anemometry*. Phil. Trans. Roy. Soc., London, A-214, 373-432.
- Papierz K., Kielbasa J., 2011a. *Methods of velocity measurement by the anemometer with a vibrating hot-wire*. Arch. Min. Sci., Vol. 56, No 1, p. 93-118.
- Papierz K., Kielbasa J., 2011b. *Metody pomiaru prędkości przepływu powietrza anemometrem z drgającym grzanym włóknem*. VIII Konferencja Naukowo-techniczna „Podstawowe Problemy Metrologii 2011”. Krynica 12-15 czerwca 2011 r.
- Rachalski A., 2006: *High-precision anemometer with thermal wave*. Rev. Sci. Instrum., 77.
- Walker R.E., Westenberg A.A., 1956: *Absolute Low Speed Anemometer*. Rev. Sci. Instrum. 27, 10, 844-848.

Providing theoretical analysis, outlining assumptions, and forecasting uncertainties and the application scope for a vibrational anemometer measuring system

Abstract

The article discusses the methods of measuring gas flow velocity with a vibrating-fiber anemometer. The anemometer's heated fiber, working in a constant current or constant resistance system and placed in a flowing stream perpendicularly to the flow, is subjected to sinusoidal vibrations of a fixed frequency and known amplitude in the surface parallel to the flow velocity. The voltage on the heated fiber is measured as a function of time. Gas flow velocity can be determined by means of two methods: on the basis of temporal analysis, or on the basis of frequency analysis.

Keywords: vibrational anemometer, thermoanemometer, absolute method for velocity measurement