

# Bezwzględna metoda pomiaru prędkości przepływu anemometrem z drgającym grzonym włóknem

JAN KIEŁBASA

Strata Mechanics Research Institute, Reymonta 27, 30-059 Kraków, Poland

## Streszczenie

W artykule zaproponowano nową metodę bezwzględnego pomiaru prędkości przepływu gazu. Czujnik termooanemometryczny, w którym grzany drut umieszczony prostopadle do prędkości przepływu drga periodycznie w płaszczyźnie równoległej do wektora prędkości ze znaną częstotliwością i znaną amplitudą  $a$ . Mierzy się sygnał napięciowy  $U(t)$ . Regulując amplitudą  $a$  drgań doprowadza się do takiej sytuacji, że najmniejsza wartość napięcia  $U(t)$  w okresie jest równa napięciu, gdy prędkość przepływu  $v_g$  jest równa zero. Oznacza to, że amplituda prędkości włókna zrównała się z prędkością przepływu. Można także liczyć liczbę miejsc zerowych pochodnej czasowej napięcia w okresie. Gdy ta liczba wynosi dwa i jest przecięcie funkcji  $U(t)$  to  $v_g = v_0$ .

**Słowa kluczowe:** pomiary przepływów, bezwzględna metoda pomiaru przepływu, termooanemometr

## 1. Wstęp

Większość czujników do pomiaru prędkości przepływu, szczególnie gazów musi zostać wcześniej wywzorcowana. 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 & Westenberg, 1956; Kiełbasa, 1978; Kiełbasa et al, 1978; Kiełbasa, 2005; Rachalski, 2006), która jest metodą bezwzględną. Dobrze jest mieć drugą metodę bezwzględną aby móc je wzajemnie porównać. Często także w pracy laboratoryjnej zachodzi konieczność pomiaru małych prędkości przepływu o bardzo wolno zmieniającym się składzie lub powoli zmieniającej temperaturze. Stosowanie w tym przypadku anemometru z grzonym włóknem w jego klasycznej aplikacji prowadzi do znacznych błędów pomiarowych, gdyż straty ciepłe drutu, które są miarą prędkości przepływu zależą tak od składu gazu jak i jego temperatury.

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*. W anemometrze tym grzany drut pracujący jako anemometr stałoprądowy, umieszczony jest prostopadle do prędkości przepływu i jest dodatkowo wprawiany w ruch harmoniczny.

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

$$E = A + Bv^2 \quad (1)$$

gdzie  $E$  oznacza napięcie na grzonym włóknem,  $v$  prędkość opływającego medium,  $A$  i  $B$  stałe uzyskiwane w procesie wzorcowania sondy. Prędkość opływu  $v_w(t)$  wibrującej sondy jest równa

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

gdzie  $v_w(t)$  jest chwilową prędkością opływu grzanego włókna,  $v_g$  prędkością przepływu medium a  $v_0$  amplitudą prędkości wibracji włókna sondy.

Napięcie na grzanym włóknie jest wówczas równe

$$E = A + B[v_g - v_0 \cos(2\pi ft)]^2 \quad (3)$$

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

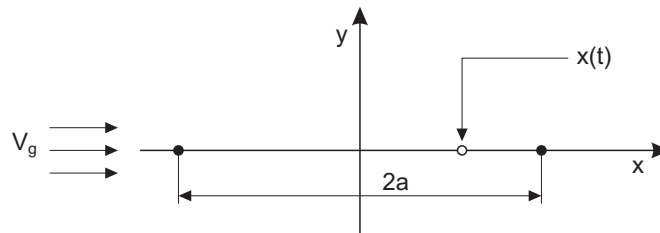
$$E_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (2Bv_0v_g \cos(2\pi ft) - \frac{B}{2}v_0^2 \cos(4\pi ft)) dt = \frac{8B}{\pi} v_0v_g \quad (4)$$

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.

Autor proponuje inny sposób wykorzystania sondy z wibrującym grzanym drutem stosując zupełnie inny algorytm opracowywania sygnału elektrycznego, w wyniku czego można mierzyć prędkości przepływu gazów w szerszych granicach, także w przypadku powolnych zmian temperatury i składu gazu.

## 2. Zarys teorii metody pomiaru

Zakłada się, że 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. Zakłada się dalej, że amplituda drgań drutu jest na tyle mała, że przepływ można uważać za niezakłócony.



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

Położenie sondy (Rys. 1) możemy opisać równaniem

$$x = a \sin(\omega t) \quad (5)$$

lub

$$x = a \sin(2\pi ft) \quad (6)$$

gdzie:

- $\alpha$  – amplituda wibracji,
- $\omega$  – pulsacja wibracji,
- $f$  – częstotliwość wibracji,
- $t$  – czas.

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

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = 2\pi f \cos(2\pi ft) = v_0 \cos(2\pi ft) \quad (7)$$

gdzie

$$v_0 = 2\pi fa \quad (8)$$

jest amplitudą prędkości drgającej sondy.

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

$$v_w(t) = v_g - v(t) = v_g - v_0 \cos(2\pi ft) \quad (9)$$

Niech napięcie  $U(v_w)$  występujące na grzanym włóknie opisuje parzysta od prędkości zależność

$$U(v_w) = A_0 + \Phi(v_w) \quad (10)$$

gdzie:  $A_0$  – stała,  $\Phi(v_w)$  – pewna ciągła i parzysta funkcja prędkości przepływu. W pierwszym przybliżeniu możemy funkcję  $\Phi(v_w)$  aproksymować równaniem

$$\Phi(v_w) = A_1 + Bv_w^2 \quad (11)$$

gdzie  $A_1$  i  $B$  są wielkościami stałymi.

Łącząc (9), (10) i (11) dostaje się

$$U[v_w(t)] = U(t) = C + B[v_g - v_0 \cos(2\pi ft)]^2 \quad (12)$$

gdzie

$$C = A_0 + A_1$$

Napięcie  $U(t)$  przyjmuje najmniejszą w okresie wartość równą  $C$  niezależną od  $v_g$  i  $v_0$  gdy składnik

$$B[v_g - v_0 \cos(2\pi ft)]^2 = 0 \quad (13)$$

czyli gdy

$$v_g = v_0 \quad (14)$$

### 3. Pomiar prędkości $v_g$

Dla zadanej ale nieznannej prędkości  $v_g$  zmieniamy amplitudę  $a$  wibracji grzanego włókna sondy aż w napięciu  $U(t)$  w okresie pojawi się wartość  $C$  równa napięciu z sondy przy braku przepływu i drgań. Wówczas nieznaną prędkość  $v_g$  jest równa

$$v_g = 2\pi fa \quad (15)$$

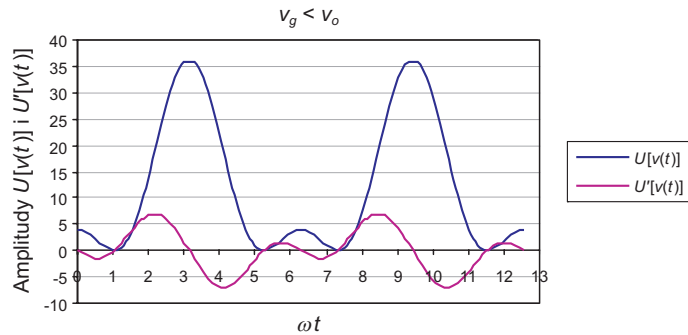
Ze wzorów (14 i 15) widzimy, że zmierzenie nieznannej prędkości  $v_g$  zostało sprowadzone do pomiaru trzech łatwo mierzalnych wielkości a to częstotliwości wibracji  $f$ , amplitudy wibracji  $a$  i napięcia  $U(t)$ , które jest znane z wzorcowania sondy dla amplitudy wibracji równej zeru i zerowego przepływu.

Dokładniejszą metodą będzie śledzenie miejsc zerowych pochodnej czasowej  $\frac{dU[v(t)]}{dt}$ . Mamy bowiem

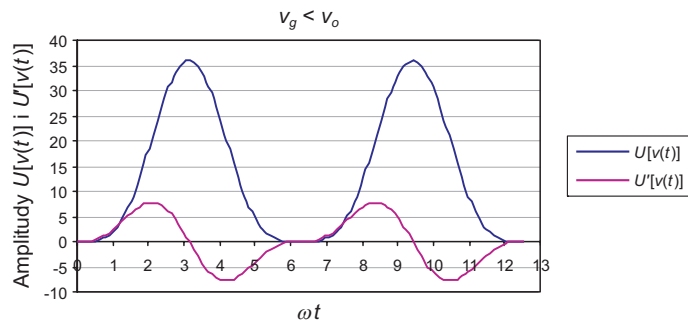
$$\frac{dU[v(t)]}{dt} = 4\pi fB[v_g - v_0 \cos(2\pi ft)]\sin(2\pi ft) = 0 \quad (16)$$

Równanie (16) w okresie może się zerować dwa razy jeśli ( $v_0 < v_g$ ), cztery razy jeśli ( $v_0 > v_g$ ), natomiast gdy ( $v_0 = v_g$ ) dostaje się dwa miejsca zerowe przy czym jedno jest podwójne dla  $[v_g - v_0 \cos(2\pi ft) = 0]$

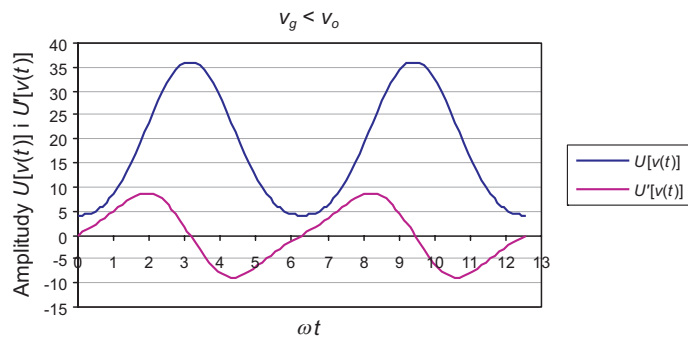
Analizując dalej drugą pochodną czasową napięcia  $\ddot{U}[v(t)]$  stwierdzamy, że dla  $v_g = v_0$  ma wartość równą zero. Oznacza to punkt przegięcia funkcji  $U[v(t)]$ . Te trzy przypadki ilustrują Rys. 2a do 2c.



Rys. 2a.



Rys. 2b.



Rys. 2c.

#### 4. Zakończenie

Z równania (16) widzimy, że zerowanie się pochodnej czasowej napięcia z wibrującej sondy nie zależy od współczynników opisujących charakterystykę prędkościowo-napięciową sondy termooanemometrycznej a jedynie od częstotliwości wibracji  $f$  i amplitudy wibracji  $a$ . Metodę zatem możemy uznać za absolutną czyli bezwzględną.

Pracę wykonano w ramach prac statutowych Instytutu Mechaniki Górotworu pt. „Eksperymentalne i teoretyczne badania przepływów pulsacyjnych w rozgałęzionych naczyniach elastycznych” w 2008 roku.

## Literatura

- Walker R.E., Westenberg A.A. 1956: *Absolute low speed anemometer*. Rev. Sci. Instrum. 27, 10, 848.
- 1969: *DISA Information: Low velocity anemometer*. Nr 7, pp. 32-35 .
- Kiełbasa J. 1978: *Determination of the flow velocity vector by using the method of heat waves*. Bull. Acad. Pol. Sci., Ser. Sci. Techn. Vol.26, Nr 4, pp. 173-179.
- Kiełbasa 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.
- Kiełbasa J., 2005: *Measurements of steady flow velocity using the thermal wave method*. Archives of Mining Sciences. 50, 2, pp. 191-208.
- Rachalski A., 2006: *High-precision anemometer with thermal wave*. Rev. Sci. Instrum., 77.

### Absolute method for the measurement of flow velocity with anemometer with vibrating hot wire

#### Abstract

In the article is proposed a new method of absolute measurements of gas flow velocity. The hot-wire probe, in which a hot wire is placed perpendicularly to the flow velocity, vibrates periodically in the plane parallel to the vector of speed with known frequency  $f$  and known amplitude  $a$ . Voltage  $U(t)$  is measured. Regulating amplitude  $a$  of vibrations leads to such a situation that the smallest voltage value  $U(t)$  in the period is equal to the voltage when the flow velocity  $v_g$  is equal to zero. This means that the amplitude of the speed of the wire equalled the flow velocity. One may also count the number of zeros of a function of time derivative of the voltage in the period. If this number amounts to two and there is an inflection of function  $\dot{U}(t)$  then  $v_g = v_0$ .

**Keywords:** flow measurement, absolute method, hot-wire

Recenzent: Prof. dr hab. inż. *Stanisław Gumuła*, Akademia Górniczo-Hutnicza