

Jan KIELBASA

Pracownia Metrologii Przepływów Zakładu Fizyki Przepływów
Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Kraków

MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA FAL CIEPLNYCH W INŻYNIERII ŚRODOWISKA

Streszczenie. W pomiarach prędkości przepływu, a zwłaszcza przy wzorcowaniu czujników, szczególnie do małych prędkości przepływu gazów, wykorzystuje się tzw. metodę znaczników cieplnych. W szczególnym przypadku takimi znacznikami mogą być fale cieplne generowane w strumieniu płynącego gazu przez bardzo cienki drut odpowiednio nagrzewany umieszczony poprzecznie do strumienia. W modelu matematycznym przyjmuje się, że drut jest nieskończenie długi, jego temperatura nie zmienia fizycznych własności gazu, a rozmiary poprzeczne włókna są na tyle małe, że nie zakłócają znacząco pola prędkości. Tym sposobem zagadnienie może być traktowane jako płaskie. W takim przypadku równanie opisujące rozkład temperatury gazu wokół źródła ciepła daje się efektywnie rozwiązać [4], a faza powstającego rozkładu może być opisana zależnością (5).

Wykorzystując zmierzony przyrost fazy $\Delta\varphi$ fali temperaturowej o znanej częstotliwości f na znanej drodze Δx wyznacza się prędkość przepływu wzorem (9).

POSSIBILITIES OF THERMAL WAVES APPLICATION IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Summary. A method of so called thermal indicators is used in flow velocity measurements. It is applied in probes calibration in low flow of gases especially. In special cases a thermal waves generated in gas stream plays a role of such marker. A source of this waves may be a very thin heated wire placed transversal to the stream. Assumptions of the mathematical model are as follows: the wire is infinite in length, wire temperature doesn't impact on gas physical properties and diameter of wire is so small thus flow velocity field is not considerably disturbed by the wire. This way leads to a linear problem. In this case equation of temperature distribution around the heat source has effective solution [4]. A phase of using temperature distribution may be represented by the following asymptotic dependence (5). Knowing thermal wave frequency f and measured its phase increment $\Delta\varphi$, distance Δx , flow velocity is determined by equation (9).

1. Wprowadzenie

Niepewność względną δ_v^* pomiaru za pomocą rurki Pitota - Prandtla prędkości przepływającego gazu (nie zmieniającego swojej gęstości) podaje zależność

$$|\delta_v^*| = \left| \frac{\Delta v}{v} \right| = \left| \frac{\Delta p}{\rho v^2} \right| \quad (1)$$

Jeżeli ciśnienie spiętrzeniowe rurki p wyznaczamy askanią czy mikromanometrem Betza, to

$$p = \rho_0 g h, \quad (2)$$

a stąd przy stałej gęstości ρ_0

$$\Delta p = \rho_0 g \Delta h. \quad (3)$$

Wstawiając (3) do (1) wyznacza się, jaka musi być prędkość przepływu gazu v , aby przy bezwzględnej niepewności pomiaru Δh ciśnienia spiętrzeniowego rurki niepewność względna pomiaru prędkości była równa δ_v^* . Po elementarnych przekształceniach dostaje się zależność

$$v = \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho \delta_v^*}} = \sqrt{\frac{\rho_0 g \Delta h}{\rho \delta_v^*}} = \frac{C}{\sqrt{\delta_v^*}} \quad (4)$$

Na rys. 1 przedstawiono wykres obrazujący zależność (4) dla dwu gazów - powietrza i wodoru, który uzyskano dla następujących danych:

$$\Delta h = 0.01 \text{ mm H}_2\text{O},$$

$$\rho_{\text{powietrza}} = 1.293 \text{ g/dcm}^3,$$

$$\rho_{\text{wodoru}} = 0.0899 \text{ g/dcm}^3,$$

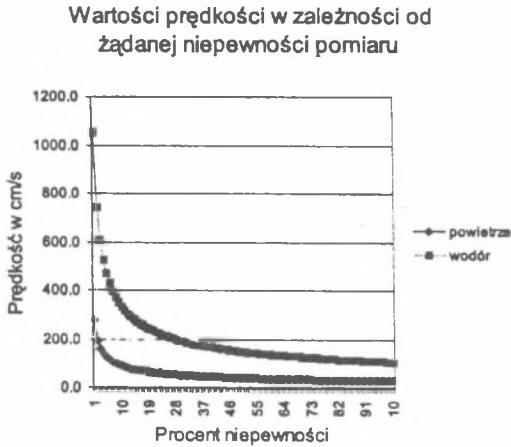
$$g = 981 \text{ cm/sek}^2.$$

Z wykresu widzimy, że przepływy powietrza poniżej 1 m/s będziemy mierzyć rurką Pitota - Prandtla z niepewnością większą niż 10%, a przy wodorze dopiero powyżej 3 m/s uzyska się lepszą wiarygodność pomiaru.

W ochronie środowiska mamy na ogół do czynienia z niższymi prędkościami. Stąd do wzorcowania przyrządów pomiarowych należy stosować dokładniejsze metody.

Autor od lat do pomiaru powolnych przepływów gazu stosuje tzw. metodę fal cieplnych. W przepływającym strumieniu gazu generuje się wąską strugę o podniesionej temperaturze,

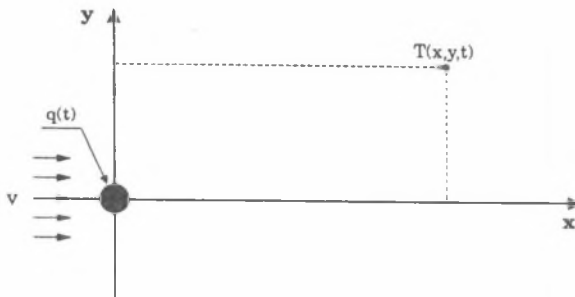
która dodatkowo ma nałożoną periodycznie zmienną składową. Generatorem tej ocieplonej strugi jest bardzo cienkie grzane włókno rozpięte prostopadle do strumienia. Gaz opływający to grzane włókno odbiera od niego ciepło, nagrzewa się i tę temperaturową informację niesie wzdłuż linii prądu.



Rys. 1. Prędkości przepływu powietrza, które są wyznaczone z niepewnością mniejszą od założonej
Fig. 1. Air flow velocities vs percentage measurement error

Schematycznie sytuację przedstawia rys. 2, na którym w początku układu współrzędnych (x,y) umieszczono liniowe źródło ciepła $Q(0,0,t)$. Gaz płynący z prędkością v opływa go, nagrzewa się i w związku z tym temperatura $T(x,y;t)$ jest funkcją współrzędnych i czasu t .

Eksperymentatora interesuje, jakie zależności łączą zmiany temperatury w mierzonym punkcie ze zmianami w źródle.



Rys. 2. Liniowe źródło ciepła opływane przez gaz
Fig. 2. Gas flow around linear heat source

Powstający wokół źródła rozkład temperatury opisuje równanie dyfuzji cieplnej z odpowiednimi warunkami początkowym i brzegowym, przy czym przyjmuje się, że grzane włókno nie zaburza profilu prędkości, a jego temperatura nagrzewając przepływający gaz nie zmienia jego fizycznych własności. Sposób rozwiązywania takiego zagadnienia jest opisany w pracy [1]. Tu przytoczy się asymptotyczne rozwiązanie na rozkład fazy temperatury w punkcie (x,y) w odniesieniu do fazy źródła, które jest dane zależnością

$$\phi(r) = \frac{vr}{2\kappa} \sqrt{\frac{1}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{4\kappa\omega}{v^2} \right)^2} \right)} - \frac{1}{4} \operatorname{arctg} \frac{4\kappa\omega}{v^2}, \quad (5)$$

słuszną przy spełnieniu warunku, że

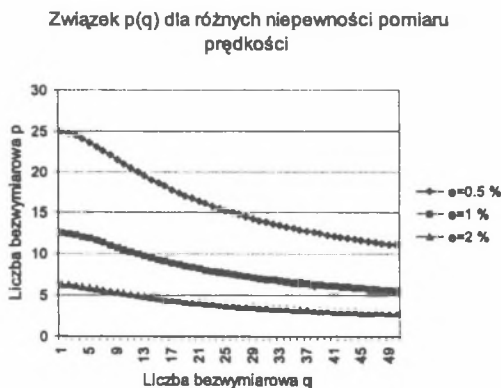
$$\left| 8 \frac{rv}{2\kappa} \sqrt{1 + i \frac{4\kappa\omega}{v^2}} \right| = \frac{4rv}{\kappa} \sqrt{1 + \frac{16\kappa^2\omega^2}{v^4}} \gg 1 \quad (6)$$

Zauważmy, że w ostatnich dwu wzorach występują bezwymiarowe liczby $q = \frac{vr}{2\kappa}$ i

$p = \frac{4\kappa\omega}{v^2}$. Nierówność (6) w nowych zmiennych możemy również zapisać w formie

$$\frac{p}{8\varepsilon^4 \sqrt{1+q^2}} < 1, \quad (7)$$

gdzie ε oznacza dopuszczalną niepewność pomiaru prędkości. Na rys. 3 przedstawiono w jednej ćwiartce wykresy izolinii w układzie (p,q) dla różnych wartości ε .



Rys. 3. Izolinie w układzie (p,q) dla różnych wartości ε

Fig. 3. Isolines in (p,q) coordinates for various ε

Wracając do wzoru (6), można stwierdzić, że rozkład fazy $\phi(r)$ jest liniowy i ta zależność jest obciążona niepewnością nie większą niż $100\varepsilon\%$, co poznaje się po wyznaczeniu liczb p i q oraz odczytaniu z wykresu wartości ε .

Ze wzoru (6) można wyznaczyć przyrost fazy $\Delta\phi$, jaki powstaje na drodze $\Delta r = r_2 - r_1$. Mamy

$$\Delta\phi = \frac{v\Delta r}{2\kappa} \sqrt{\frac{1}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{4\kappa\omega}{v^2} \right)^2} \right)} \quad (8)$$

a stąd

$$v = \omega \frac{\Delta r}{\Delta\phi} \sqrt{1 - \frac{4\kappa^2}{\omega^2} \left(\frac{\Delta\phi}{\Delta r} \right)^4} \equiv \omega \frac{\Delta r}{\Delta\phi} \left(1 - \frac{2\kappa^2}{\omega^2} \left(\frac{\Delta\phi}{\Delta r} \right)^4 \right) = \omega \frac{\Delta r}{\Delta\phi} (1 - \gamma). \quad (9)$$

Gdy $\gamma \ll 1$, co łatwo zrealizować dobierając odpowiednio ω , dostaje się

$$v = \omega \frac{\Delta r}{\Delta\phi} = 2\pi f \frac{\Delta r}{\Delta\phi}. \quad (10)$$

W przypadku gdy Δr będzie odcinkiem, na którym przyrost fazy wynosi 2π , to wzór (10) przyjmie wyjątkowo prostą postać

$$v = f\Delta r. \quad (11)$$

Jak eksperymentator ma się przekonać, czy spełnione są warunki prowadzące do zależności (10). Przyjmijmy, że

$$\gamma \ll 1, \quad (12)$$

stąd

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta r} > \sqrt[4]{\gamma \frac{\omega^2}{2\kappa^2}}. \quad (13)$$

Tak więc jeśli eksperymentator stwierdzi, że w jego przypadku pomierzony przyrost fazy $\Delta\phi$ na znanej drodze Δr przy zadanej dopuszczalnej względnej niepewności wyznaczenia prędkości mniejszej od 1% ($\gamma < 0.01$) spełnia warunek (13), to prędkość v jest wyznaczona prawidłowo. Jeżeli nie, to musi odpowiednio zmniejszyć częstość ω .

2. Niepewność wyznaczenia prędkości

Jeśli prawidłowo przeprowadza się pomiar, czyli spełnione są warunki podane zależnościami (6) i (13), to prędkość przepływu wyliczamy ze wzoru (11). Tu mamy dwie wielkości mierzone Δr i $\Delta\phi$. Trzecia wielkość występująca we wzorze, to częstość $\omega = 2\pi f$, którą możemy uznać za nie obciążoną niepewnością.

Bezwzględna niepewność pomiaru Δr niech będzie $\Delta r = 0.005$ mm, zaś niedokładność pomiaru przyrostu fazy $\Delta\phi$ ¹ równa $\delta\phi = 0.5^\circ$. Całkowita niepewność względna pomiaru prędkości będzie równa [2]:

$$\delta_v^* = \left| \frac{\delta v}{v} \times 100\% \right| = \sqrt{\left(\frac{\delta r}{\Delta r} \right)^2 + \left(\frac{\delta\phi}{\Delta\phi} \right)^2} \times 100\%. \quad (14)$$

Przykład: $f = 23$ Hz,

$\kappa = 0.18$ cm²/s (powietrze),

$r_2 = 15$ mm,

$r_1 = 5$ mm,

$\Delta\phi = 360^\circ = 2\pi$. Ze wzoru (11) mamy

$$v = 23 / s \times (15 - 5)mm = 23 / s \times 1.0cm = 23cm / s.$$

Warunki poprawności pomiaru

$$q = \frac{4\kappa\omega}{v^2} = \frac{4 \times 0.18 \times 6,28 \times 23}{23^2} = 0.197$$

$$p = \frac{4 \times 23}{2 \times 0.18} = 25.6$$

$$p\sqrt[4]{1+q^2} = 25.6 \times \sqrt[4]{1.197} = 25.6 \times 1.05 = 26.88$$

$$\frac{1}{8p\sqrt[4]{1+q^2}} = \frac{1}{8 \times 26.88} = 0.0047 = 0.47\%$$

¹ W metodzie pomiarowej, którą autor stosuje, przyrost fazy wyznacza się na drodze rozkładu fourierowskiego sygnału napięciowego uzyskiwanego z detektora, przy czym sygnałem referencyjnym jest sygnał cyfrowy sterujący współczynnikiem nagrzania włókna, co opisano niżej.

Warunek wielkości fazy przy niepewności $\Delta\phi/\phi = 1\%$

$$\frac{2 \times 3.14}{1} > \sqrt[4]{0.01 \frac{23^2}{2 \times 0.18^2}} = 3.02$$

jest spełniony. Niepewność pomiaru prędkości wynosi

$$\delta_v^* = \frac{\delta v}{v} \times 100\% = \sqrt{\left(\frac{0.005}{1}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{360}\right)^2} \times 100\% = 1.51\% < 2\%$$

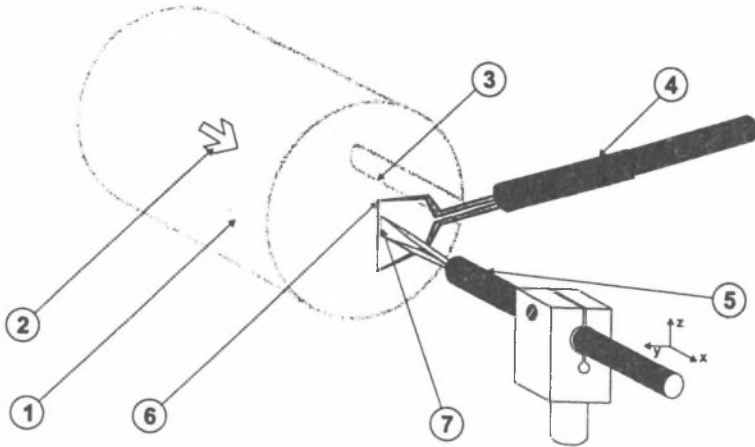
3. Pomiary eksperymentalne

Szkic stanowiska do pomiaru prędkości metodą fal cieplnych przedstawia rys. 4. Generator fali cieplnej był umieszczony w tunelu o średnicy 50 mm, w którym za pomocą kierownic (plastra miodu) i siatek otrzymano wyrównany i płaski profil prędkości w całym przekroju. Prędkość przepływu powietrza można było zmieniać w granicach od 10 cm/s do około 2.5 m/s. Obroty wentylatora zadawano cyfrowo z komputera poprzez przetwornik C/A podający napięcie sterujące do zasilacza wentylatora. W zasilaczu tym stosowano pętlę sprzężenia zwrotnego wykorzystującą napięcie z optycznego przetwornika sprzężonego z wirującą tarczą mającą 180 szczelin na obwodzie. Układ sprzężenia zapewniał stabilność obrotów na poziomie ok. 1 obrotu/min.

Jako elementu wytwarzającego falę cieplną używano grzanego drutu wolframowego o średnicy 5 μm i długości 20 mm rozpiętego pionowo na odpowiednich wspornikach. Drut ten był nagrzewany z bezmostkowego układu anemometru stałotemperaturowego opracowanego przez P. Ligęzę [3], w którym można było zadawać cyfrowo współczynnik nagrzania od wartości 1 (drut zimny) zmieniający się sinusoidalnie. Ten drut generujący ślady termiczny i aerodynamiczny będzie się dalej nazywać nadajnikiem.

Jako sondy pomiarowej (detektora) użyto czujnika termoanemometrycznego z włóknem o średnicy 2.5 μm i długości 5 mm, rozpiętego pionowo na wspornikach takich jak w sondzie nadajnika. Ten drut był zasilany z analogicznego bezmostkowego układu anemometru stałotemperaturowego. Tu wartość współczynnika nagrzania ustawiono na średnim poziomie $N = 1.8$.

Sonda pomiarowa detektora uchwycona ramieniem koordynatometru (x , y) miała możliwość poruszania się w płaszczyźnie poziomej w granicach dla współrzędnej podłużnej x , w tym przypadku w kierunku prędkości przepływu, w granicach od zera do 150 mm, a w kierunku poprzecznym y w granicach od zera do 100 mm. Dokładność ustawienia w obu kierunkach wynosiła 1 mikrometr.



Rys. 4. Rejon pomiaru i ustawienie wzajemne sond pomiarowych. 1 - rura tunelu, 2 - kierunek przepływu powietrza, 3 - szczelina na sondę nadajnika, 4 - obsadka nadajnika, 5 - obsadka detektora, 6 - włókno nadajnika (powiększone), 7 - włókno detektora (powiększone)

Fig. 4. A measured area and orientation of probes. 1 - tunnel tube, 2 - direction of air flow, 3 - gap for transmitter probe, 4 - mounting of transmitter, 5 - mounting of receiver, 6 - transmitter wire (enlarged), 7 - receiver wire (enlarged)

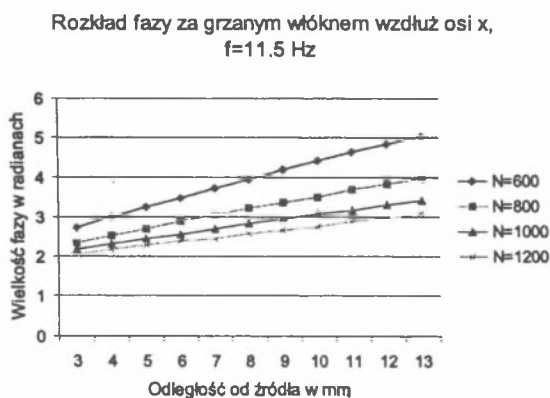
Rejon pomiaru i ustawienie sond pomiarowych w przestrzeni ilustruje rys. 4. Sonda pomiarowa (nieruchoma) 4 jest uchwycona ramieniem do łoża koordynatometru. Przesuwana sonda pomiarowa 5 jest umocowana na ruchomym stoliku koordynatometru. Po wstępnym wzajemnym ustawieniu sond łożo jest dosuwane do wylotu tunelu tak, aby wspornik nadajnika znalazł się w szczelinie rury tunelu. Szczelina jest zamykana odpowiednim kształtownikiem i uszczelniana. Całe łożo jest śrubami łączone z obudową tunelu, aby uniemożliwić przesunięcie łoża, a więc i sond pomiarowych względem tunelu.

Układ współrzędnych, w którym dokonywano pomiarów, był następujący: w środku kartezjańskiego układu znajdował się grzany drut (nadajnik), oś x skierowana była zgodnie z kierunkiem prędkości, zaś oś y była prostopadła, przy czym układ był lewoskrętny. Detektorem można penetrować obszar $0 \leq x \leq 50$ mm i $-1 \leq y \leq +1$ mm.

Przed przystąpieniem do pomiarów starannie ustawiono sondy tak, by włókna były pionowe, równoległe do siebie i były możliwie bliskie.

4. Wybrane wyniki pomiarowe

Poniżej na rys.5 przedstawiono rozkłady fazy za okresowo grzany włóknem. Częstotliwość fali cieplnej wynosiła 11.5 Hz. Włókno nadajnika było ogrzane do temperatury 200° C, a amplituda modulacji wynosiła ok. 30° C. Pomiar fazy rozpoczynano od odległości 3 mm od nadajnika, by spełnić wymóg (6).



Rys. 5. Rozkład fazy wzdłuż osi x za grzany włóknem dla różnych obrotów wentylatora
Fig. 5. Phase distribution within x axis behind hot-wire for various fan rotation

Wyliczone z tych rozkładów fazy prędkości przepływu powietrza, niepewności tych prędkości i niepewności względne zestawione są w tabeli 1. Widzimy, że względne niepewności są w granicach 1.5%. Należy tu jeszcze zwrócić uwagę na dodatkowy czynnik zwiększający niepewność pomiaru. Włókno detektora temperatury znajduje się nie tylko w śladzie cieplnym nadajnika ale również w śladzie aerodynamicznym, w którym następuje lokalny spadek prędkości. Według badań autora spadek prędkości rzędu 1% obserwuje się jeszcze w odległości rzędu 10 mm od nadajnika (2000 średnic włókna) [4].

Tabela 1

Przykład wyników pomiarowych

Obroty wentylatora N [1/min]	Wyliczona prędkość przepływu powietrza [cm/s]	Niepewność pomiaru prędkości [cm/s]	Niepewność względna pomiaru prędkości δ_v [%]
600	31.40	0.46	1.46
800	44.53	0.60	1.35
1000	58.41	0.88	1.51
1200	71.24	0.71	1.00

5. Uwagi końcowe

Proponowany sposób pomiaru jest stosunkowo prosty. Można go jeszcze uprościć stosując sondę pomiarową z trzema włóknami - nadajnikiem i dwoma detektorami. Sonda taka pokrywa zakres pomiarowy od 10 cm/s do 4 m/s. W Instytucie Mechaniki Górotworu opracowano kartę komputerową zawierającą cały układ zasilająco-odczytujący. Do karty dołączony jest program obsługi. Na monitorze podawana jest informacja o wartości prędkości, niepewności pomiaru, wielkości amplitudy temperatur w miejscu detektorów i o różnicy fazy między detektorami. Mierzone wartości prędkości i parametry pomiaru są zapisywane na dysku.

Przedstawiona metoda pomiaru i inne informacje mogą być przydatne w laboratoriach zajmujących się ochroną środowiska zwłaszcza tam, gdzie zachodzi konieczność pomiaru powolnych przepływów. Metoda może znaleźć zastosowanie do wzorcowania innych anemometrów w zakresie małych prędkości przepływu.

Praca niniejsza powstała w ramach działalności statutowej Instytutu Mechaniki Górotworu PAN przy realizacji tematu T-08 „Metrologia przepływów”.

LITERATURA

1. Kielbasa J.: Pomiar wolnych przepływów. Mat. XXVIII Konf. Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów T. 1. Częstochowa 23-25 września 1996. s. 292-299, 1996.
2. Polska norma PN-82 M-42368: Pomiary przepływu płynu. Zasady obliczania niepewności wyników pomiarów pośrednich, 1982.

3. Ligęza P.: Sterowany cyfrowo bezmostkowy układ stałotemperaturowy, Mat. IV Konferencji „Czujniki optyczne i elektroniczne COE'96”, s. 247-250, 1996.
4. Kiełbasa J.: Measuring the velocity and temperature wake. „Arch. Min. Scs.”, Vol.44, No.1, s. 71-84, 1999.

Recenzent: Dr hab.inż. Zbigniew Popiołek
Prof. Politechniki Śląskiej

Abstract

A method of so called thermal indicators is used in flow velocity measurements. It is applied in probes calibration in low flow of gases especially. In special cases a thermal waves generated in gas stream plays a role of such marker. A source of this waves may be a very thin heated wire placed transversal to the stream. Assumptions of the mathematical model are as follows: the wire is infinite in length, wire temperature doesn't impact on gas physical properties and diameter of wire is so small thus flow velocity field is not considerably disturbed by the wire. This way leads to a planar problem. In this case equation of temperature distribution around the heat source has effective solution [4]. A phase of using temperature distribution may be represented by the following asymptotic dependence:

$$\phi(r) = \frac{rv}{2\kappa} \sqrt{\frac{1}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{4\kappa\omega}{v^2} \right)^2} \right)} - \frac{1}{4} \arctg \frac{4\kappa\omega}{v^2},$$

which is valid under condition (6):

$$\left| 8 \frac{rv}{2\kappa} \sqrt{1 + i \frac{4\kappa\omega}{v^2}} \right| = \frac{4rv}{\kappa} \sqrt{1 + \frac{16\kappa^2\omega^2}{v^4}} \gg 1.$$

The flow velocity is calculated by means of (10) using measured increment of temperature wave phase $\Delta\phi$ on known distance Δx

$$v = \omega \frac{\Delta r}{\Delta\phi} = 2\pi f \frac{\Delta r}{\Delta\phi}.$$

In such a case if Δr is distance within the phase increment is 2π (10) has a simply form:

$$v = f\Delta r.$$

The total relative error of velocity measurement is given by (14), [2]:

$$\delta_v^* = \left| \frac{\delta v}{v} \times 100\% \right| = \sqrt{\left(\frac{\delta r}{\Delta r} \right)^2 + \left(\frac{\delta \phi}{\Delta \phi} \right)^2} \times 100\%.$$

where δr is absolute error of distance measurement, $\delta \phi$ is absolute error of phase increment measurement.

Het measurement of frequency has been assumed to be exact. In typical causes a total relative error of velocity measurement is less than 2%.