

Barbara KNOBLOCH
Zbigniew POPIDŁEK

Institut Ogrzewnictwa, Wentylacji i Ochrony Powietrza
Politechniki Śląskiej

SPOSÓB POMIARU SKŁADOWYCH WEKTORA PRĘDKOŚCI ŚREDNIEJ I WIELKOŚCI TURBULENTNYCH W PRZEPŁYWACH SILNIE BURZLIWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono zmodyfikowany sposób pomiaru składowych wektora prędkości średniej, wartości skutecznych fluktuacji prędkości i makroskali długości w przepływach silnie burzliwych przy pomocy anemometru z gorącym drutem.

Dzięki zastosowaniu cyfrowej rejestracji i przetwarzania wyników, pierwszy raz szerzej wykorzystano praktycznie opracowany wcześniej sposób pomiaru sygnału z pojedynczego anemometru w trzech położeniach włókna czujnika względem kierunku przepływu.

1. WPROWADZENIE

Często w badaniach w zakresie wentylacji zachodzi potrzeba dokładnego pomiaru składowych wektora prędkości średniej i wielkości turbulentnych w przepływach silnie burzliwych. Z sytuacją taką spotkano się przy pracach nad eksperymentalnym uzupełnieniem i sprawdzeniem modelu matematycznego ruchu powietrza w pomieszczeniu wentylowanym [1]. W celu określenia warunków brzegowych w strudze nawiewanej, zapewniających realne fizyczne rozwiązanie modelu dla całego pomieszczenia, okazało się niezbędne zmierzenie wartości składowych wektora prędkości średniej, wartości skutecznych fluktuacji prędkości i makroskali długości w strefie rozwoju tejże strugi. Natomiast dla fizycznego sprawdzenia wyników rozwiązania numerycznego zaszła potrzeba pomiaru niektórych z tych wielkości w przepływach wtórnych.

Badania te przeprowadzane były w warunkach modelowych, a badane przepływy obok silnej burzliwości charakteryzowały się niewielkimi wartościami prędkości średniej.

Na dobór metodyki pomiaru wpływ musiał mieć również fakt, iż ze względu na zastosowany sposób rozwiązania modelu, związany z niedoskonałością maszyn cyfrowych, rozpatrywany był przepływ płaski. Stwierdzono, że w takim zwłaszcza przypadku struga nawiewana ulegała silnemu odkształceniu już w początkowej strefie swojego biegu.

Biorąc to wszystko pod uwagę, zdecydowano się na przeprowadzenie pomiaru składowych wektora prędkości średniej i pozostałych parametrów za pomocą anemometru z gorącym drutem.

Przeprowadzona analiza wykazała jednak, iż pomiary w jednym położeniu włókna czujnika anemometru nie dostarczały wystarczających danych do właściwej interpretacji sygnału oraz dla określenia wartości składowej wektora prędkości średniej. Sygnał z anemometru przy ustawieniu włókna czujnika prostopadle do płaszczyzny przepływu średniego był interpretowany jako prędkość efektywna, związana z właściwościami kierunkowymi anemometru:

$$w_{ef} = \left((\overline{w_x} + w'_x)^2 + k_1 (\overline{w_z} + w'_z)^2 + k_2 w_y'^2 \right)^{1/2} \quad (1)$$

Zatem po jego uśrednieniu otrzymano średnią prędkość również efektywną $\overline{w_{ef}}$.

Ten sposób pomiaru mógł być wykorzystywany do dokładnego określenia składowej wektora prędkości średniej jedynie w przypadku przepływu osiowego o słabej burzliwości [2]. W przeciwnym przypadku uciekać się trzeba było do innych, bardziej skomplikowanych metod pomiarowych.

Istniała tutaj możliwość zastosowania czujników wyposażonych w kilka włókien. Byłby to jednak sposób bardzo kosztowny i ze względu na wzajemne oddziaływania cieplne włókien, zniekształcenie właściwości kierunkowych przez obecność wielu wsporników podtrzymujących włókna, nie polecany do pomiarów w przepływach silnie burzliwych o małych prędkościach.

W przepływach takich mogą być zastosowane metody pomiarowe oparte na pomiarze sygnału z pojedynczego anemometru z gorącym drutem w kilku położeniach włókna czujnika względem kierunku przepływu średniego, które eliminują wymienione poprzednio niedogodności.

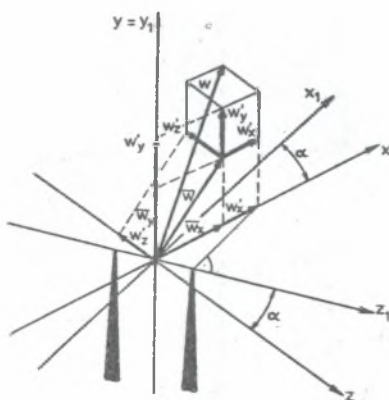
2. POMIAR SKŁADOWYCH WEKTORA PRĘDKOŚCI ŚREDNIEJ

Do pomiarów w stacjonarnych przepływach płaskich, gdy znana była płaszczyzna, w której leżał wektor, a nieznanym był jego kierunek, nadawał się dobrze sposób pomiaru składowych wektora prędkości średniej w przepływach silnie burzliwych opracowany w Instytucie Ogrzewnictwa, Wentylacji i Ochrony Powietrza Politechniki Śląskiej. Sposób ten został rozwinięty teoretycznie i sprawdzony dla prostych przypadków przepływów [2]. Nie był jednak dotychczas praktycznie szerzej stosowany ze względu na konieczność dość skomplikowanego przetwarzania wyników, co okazało się trudne do realizacji bez wykorzystania techniki komputerowej.

Sposób ten przewidywał bowiem wykonanie pomiaru wartości średniokwadratowych prędkości efektywnych dla trzech położeni czujnika: prostopadle do

płaszczyzny wektora prędkości średniej i pod kątem $\alpha = +45^\circ$ i $\alpha = -45^\circ$ do niej (rys. 1). Wykazano, że:

$$\overline{w_x^2} + \overline{w_x'^2} - \overline{w_z^2} = \frac{2\overline{w_{ef}^2}(\alpha=0^\circ) - \overline{w_{ef}^2}(\alpha=45^\circ) - \overline{w_{ef}^2}(\alpha=-45^\circ)}{1 - k_1^2} \quad (2)$$



Rys. 1. Składowa wektora prędkości chwilowej, gdy włókno tworzy kąt α z osią układu współrzędnych

Fig. 1. Instantaneous velocity vector component at the angle α between the fibre and the coordinate system axis

Gdy występowała lokalna izotropowość przepływu, a zatem:

$$\overline{w_x'^2} = \overline{w_z^2}$$

to składową prędkości średniej obliczyć można było ze wzoru:

$$\overline{w_x} = (1 - k_1^2)^{-1/2} \left[\overline{2w_{ef}^2}(\alpha=0^\circ) - \overline{w_{ef}^2}(\alpha=45^\circ) - \overline{w_{ef}^2}(\alpha=-45^\circ) \right]^{1/2} \quad (3)$$

Gdy nie mogło być przyjęte założenie izotropowości, to popełniony przy stosowaniu tego wzoru błąd wynosił:

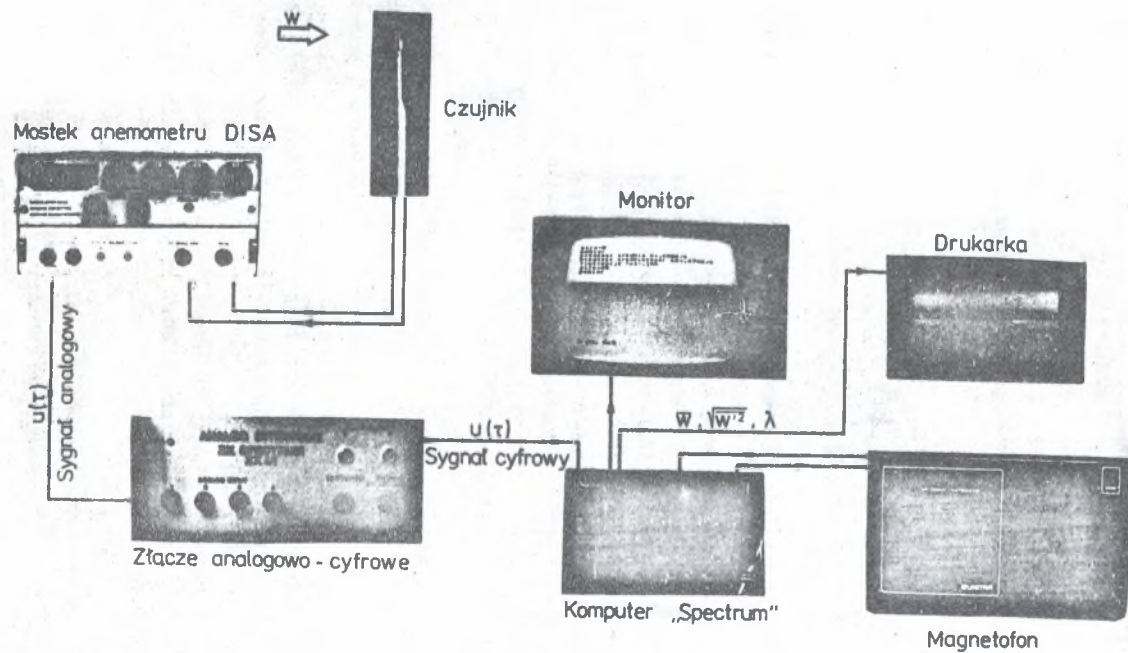
$$\delta = 0,5 \left(\frac{\sqrt{\overline{w_x'^2}}}{\overline{w_x}} \right)^2 - \left(\frac{\sqrt{\overline{w_z^2}}}{\overline{w_x}} \right)^2 \quad (4)$$

Opracowano praktyczny sposób realizacji takiego pomiaru w modelu pomieszczenia wentylowanego. Skonstruowano układy obrotu czujnika anemometru dla pomiaru składowej osiowej i poprzecznej prędkości, które umożliwiały wymagane ustawienie włókna czujnika prostopadle do płaszczyzny przepływu i pod kątem 45° i -45° .

Rejestracji chwilowych wartości napięć na mostku anemometru, odpowiadających wartościom chwilowym prędkości, dokonano za pomocą złącza analogiczno-cyfrowego sprzężonego z komputerem "Spektrum" (rys. 2).

W celu przetworzenia zarejestrowanych wyników posłużono się programem komputerowym, którego zadaniem było:

- obliczenie wartości chwilowych prędkości efektywnych w_{ef} oraz ich kwadratu w_{ef}^2 na podstawie charakterystyki anemometru $w_{ef} = f(U)$ zapisanej w postaci wielomianowej, a wprowadzonej do programu jako tabela,



Rys. 2. Schemat blokowy układu do pomiaru prędkości średniej oraz wielkości turbulentnych
 Fig. 2. Block diagram of the system for mean velocity and turbulent parameters measurement

- wyznaczenie średnich $\overline{w_{ef}}$ i średniokwadratowych $\overline{w_{ef}^2}$ wartości prędkości efektywnej dla trzech położenia włókna czujnika w przyjętym czasie uśredniania,
- dobór odpowiedniej wartości współczynnika kierunkowego k_1 w zależności od średniej wartości efektywnej przy prostopadłym ustawieniu czujnika,
- obliczenie wartości składowej prędkości średniej ze wzoru (3).

Po przeprowadzeniu wstępnej serii pomiarowej stwierdzono potrzebę modyfikacji zastosowanej metody, zwłaszcza z powodu niespełniania się w realnych warunkach rozpatrywanego przepływu założenia o lokalnej izotropowości turbulencji, co powodowało zbyt znaczny błąd pomiaru.

Powrót do obliczeń składowej wektora prędkości średniej według wzoru wyjściowego (2) wiązał się z koniecznością jednoczesnego pomiaru wartości skutecznych fluktuacji podłużnych i poprzecznych.

Obliczenia tych wartości dla fluktuacji podłużnych oparto na pomiarze chwilowych prędkości dla prostopadłego ustawienia włókna czujnika i na wzorze:

$$\sqrt{w'_{ef}{}^2} = \sqrt{w_{ef}^2(0^\circ) - [\overline{w(0^\circ)}]^2} \quad (5)$$

Natomiast potrzebną również wartość $\overline{w_z'^2}$ dla fluktuacji poprzecznych otrzymano drogą oszacowania przy założeniu prostopadłości wektora prędkości do włókna czujnika zgodnie ze sposobem podanym w [2]. Przeprowadzone próby wykazały bowiem, iż pomiar dokładny byłby bardzo skomplikowany i praktycznie niemożliwy do realizacji.

Wykorzystano do określenia fluktuacji poprzecznych zależność:

$$\overline{w_z'^2} = \left[\overline{w_{ef}'^2}(45^\circ) + \overline{w_{ef}'^2}(-45^\circ) - \overline{w_{ef}'^2}(0^\circ)(1 + k_1)^2 \right] \frac{1 + k_1^2}{(1 - k_1^2)^2} \quad (6)$$

Dokonane pomiary wariancji fluktuacji potwierdziły przypuszczenie o nieizotropowości turbulencji i umożliwiły korektę wyników pomiarów. Posłużyły również do obliczenia intensywności turbulencji przepływu.

Modyfikacja metody pomiarowej polegała też na zmianie sposobu określania współczynnika kierunkowego k_1 .

Przebieg charakterystyki $k_1 = f(\overline{w_{ef}})$ ustalono na specjalnie przygotowanym stanowisku badawczym w przepływie laminarnym, w którym spełniona była zależność: $\overline{w_{ef}} = \overline{w_x}$.

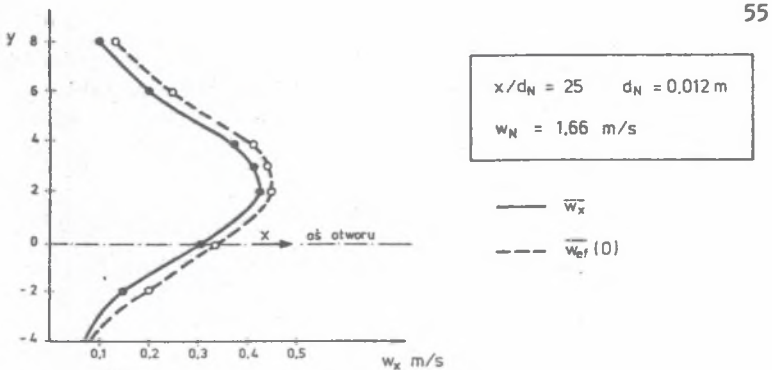
Wartości współczynnika k_1 wyznaczono wobec tego z zależności wynikającej z równania (3):

$$k_1 = \left[1 - \frac{\overline{w_{ef}^2}(0^\circ) - \overline{w_{ef}^2}(45^\circ) - \overline{w_{ef}^2}(-45^\circ)}{\overline{w_{ef}^2}} \right]^{1/2} \quad (7)$$

a charakterystykę aproksymowano dwumianem kwadratowym.

W ramach modyfikacji sposobu dokonano również doboru optymalnego czasu uśredniania prędkości na podstawie zaobserwowanej powtarzalności wyników pomiarów prędkości średniej z odchyleniami w granicach uzasadnionych turbulencją przepływu, a oszacowanych drogą obliczenia błędu estymatora prędkości [3].

Korzyści wynikające z zastosowania przedstawionego zmodyfikowanego sposobu dla poprawy dokładności pomiarów składowej prędkości średniej w odniesieniu do pomiaru efektywnej prędkości przy kącie ustawienia czujnika $\alpha = 0^\circ$ pokazano dla przekroju poprzecznego strugi nawiewanej na rys. 3. Pomiarów tych dokonano w pomieszczeniu modelowym, którego opis wraz ze schematem zawarto w referacie [4]. Z porównania tego wyniku, iż są to różnice niewielkie, niemniej jednak dla małych wartości prędkości mają znaczenie istotne.



Rys. 3. Wyniki pomiaru składowej osiowej wektora prędkości średniej powietrza w strudze nawiewanej

Fig. 3. Results of measurement of the axial component of the air mean velocity vector in the supply stream

3. POMIAR MAKROSKALI DŁUGOŚCI

Obok pomiaru składowych wektora prędkości średniej i intensywności turbulencji opracowano opartą również na cyfrowym przetwarzaniu wyników metodę pomiaru makroskali długości, która znalazła jednak zastosowanie jedynie dla strug nawiewanych.

Makroskalę długości Λ wyrażono zgodnie z hipotezą Taylora [5] jako iloczyn makroskali czasu t_c i prędkości średniej:

$$\Lambda = \bar{w} t_c = \bar{w} \int_0^{\infty} \varphi_w(t_p) dt_p \quad (8)$$

Funkcją podcałkową był współczynnik autokorelacji fluktuacji prędkości unormowany przez podzielenie funkcji autokorelacji przez wariancję:

$$\varphi_w(t_p) = \frac{R_w(t_p)}{w'^2} \quad (9)$$

Funkcję autokorelacji wyrażono natomiast równaniem:

$$R_w(t_p) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t_r} \int_{-t_p/2}^{+t_p/2} w'(t)w'(t - t_p) dt \quad (10)$$

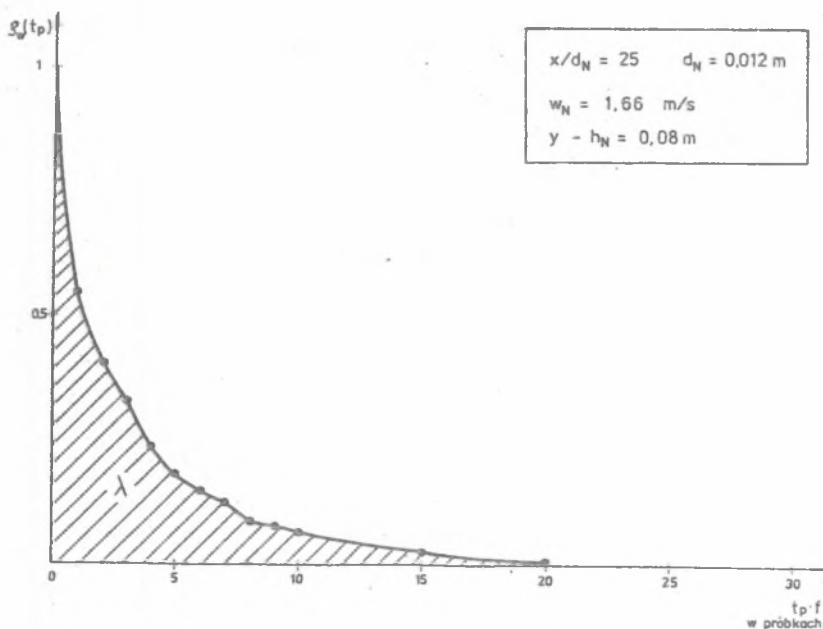
W celu wyznaczenia makroskali długości wykorzystano rejestrację wartości chwilowych napięć anemometru i odpowiadających im prędkości chwilowych przez komputer "Spektrum" sprzężony przez złącze analogowo-cyfrowe z anemometrem.

Do dalszego przetwarzania wyników opracowano program, którego zadaniem było:

- obliczenie wartości średnich, średniokwadratowych oraz wariancji fluktuacji prędkości przy prostopadłym ustawieniu czujnika do płaszczyzny wektora prędkości,
- rejestracja chwilowych wartości fluktuacji prędkości,
- obliczenie współczynnika autokorelacji dla kolejno przyjmowanych wartości opóźnień t_p :

$$\varphi_w(t_p) = \frac{\overline{w'(t)w'(t + t_p)}}{w'^2} \quad (11)$$

- określenie makroskali czasu t_c przez scałkowanie zależności współczynnika autokorelacji od opóźnienia, którą pokazano na rys. 4 dla przykładowego punktu w strudze nawiewanej.



Rys. 4. Wykres współczynnika autokorelacji w strudze nawiewanej
 Fig. 4. Plot of the autocorrelation coefficient in the supply stream

4. PODSUMOWANIE

Przedstawienie zastosowanych metod miało na celu wskazanie na możliwość wykorzystania nowoczesnych technik cyfrowego przetwarzania wyników w badanych przepływach wentylacyjnych. Dzięki tym metodom stało się możliwe bez specjalnie skomplikowanego oprzyrządowania wykonanie trudnych lub nawet wcześniej niemożliwych do realizacji pomiarów, poprawiających dokładność poznania wielkości, charakteryzujących przepływ turbulentny.

LITERATURA

- [1] Knobloch B.: Eksperymentalny dobór parametrów strugi nawiewanej dla modelowania matematycznego ruchu powietrza wentylacyjnego. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 1987.
- [2] Mierziński S., Popiołek Z.: Anemometria i jej zastosowanie w badaniach modelowych procesów odpylenia i wentylacji. Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wydawnictwo Wrocław 1980.

- [3] Popiołek Z.: Badania i modelowanie strug konwekcyjnych z uwagi na kształtowanie procesu wentylacji. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej - Inżynieria Środowiska Nr 28. Gliwice 1987.
- [4] Knobloch B., Mierzwiński S.: Eksperymentalny dobór warunków brzegowych przy modelowaniu rozdziału powietrza wentylacyjnego. III Seminarium "Zastosowanie Mechaniki Płynów w Ochronie Środowiska". Wisła 1988.
- [5] Elsner J.: Turbulencja przepływów. PWN, Warszawa 1987.

SPIS OZNACZEŃ I INDEKSÓW

Oznaczenia

- k_1, k_2 - współczynniki kierunkowe anemometru,
 R_w - funkcja autokorelacji,
 t - czas,
 t_c - makroskala czasu,
 t_p - opóźnienie czasowe,
 U - napięcie anemometru,
 \bar{w} - średnia prędkość powietrza,
 α - kąt pomiędzy włóknem anemometru a osią układu współrzędnych,
 δ - błąd względny pomiaru,
 λ - makroskala długości,
 ρ_w - współczynnik autokorelacji.

Indeksy

dolne:

- ef - dotyczy wartości efektywnej,
 x, y, z - dotyczy składowych wektora,

górne:

- dotyczy fluktuacji prędkości.

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ КОМПОНЕНТ ВЕКТОРА СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ И ТУРБУЛЕНТНЫХ ПАРАМЕТРОВ В ВЫСОКО ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЯХ

Р е з ю м е

В статье представлено модифицированный способ измерения компонент вектора средней скорости, стандартного отклонения флуктуации скорости и масштаба длины в высоко турбулентных течениях при помощи анемометра с горячим дротом. Благодаря применению цифровой реестрации и преобразования ре-

результатов, первый раз более широко использовано практически обработанный раньше способ измерения сигнала в нескольких положениях волокна оптиметра к отношению к направлению течения.

MEASUREMENT OF MEAN VELOCITY VECTOR COMPONENTS AND TURBULENT
PARAMETERS IN HIGHLY TURBULENT FLOWS

S u m m a r y

The paper presents a modified method of measurement of mean velocity vector components, RMS values of velocity fluctuation and length macro-scale in highly turbulent flows by means of a hot wire anemometer.

Owing to digital recording and processing of the results it was possible to apply practically for the first time in a more extensive way the method of measurement of single anemometer signal in several sensor fibre positions in relation to the flow direction.