

Badania asymetrii rozkładu napięć na dzielonym włóknie termooanemometru w zależności od prędkości przepływu

JAN KIELBASA, ELŻBIETA POLESZCZYK

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

Streszczenie

Praca zawiera badania asymetrii w rozkładzie napięć wzdłuż grzanego włókna czujnika termooanemometrycznego w aspekcie wykorzystania tej asymetrii do określania zwrotu składowej prędkości przepływu medium. Jest to możliwe dzięki wprowadzeniu dodatkowego wspornika, który wyprowadza napięcie ze „środka” włókna. Znak różnicy napięć na obu częściach włókna jest informacją o zwrocie.

Ponieważ podział rezystancji włókna nie jest nigdy idealny wprowadza się współczynnik korekcyjny, który symetryzuje napięcia z obu części włókna. Badania obejmują zależność współczynnika korekcji od ustawienia włókna w przestrzeni, przy czym zawsze prędkość przepływu jest prostopadła do włókna. Znając fluktuacje współczynnika korekcji można wyznaczyć fluktuacje różnicy napięć z obu części włókna.

Słowa kluczowe: anemometria cieplna, czujnik z odczepem, napięcie, współczynnik korekcyjny

1. Wprowadzenie

Anemometr cieplny dostarcza informacji o prędkości strumienia medium opływającego grzane włókno czujnika poprzez pomiar ilości ciepła odprowadzanego z niego przez płynące medium. Mierzy się napięcie lub prąd zasilania elementu, a znając parametry geometryczne i fizyczne czujnika można wyznaczyć strumień mocy przekazywany z grzanego elementu do medium. Jeżeli grzanym elementem jest cienkie włókno, to równanie wiążące moc traconą przez grzany element opływany prostopadle z prędkością medium i jego temperaturą opisuje równanie Kinga w postaci

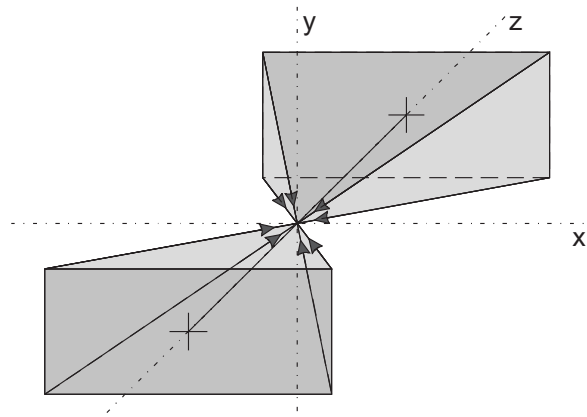
$$I^2 R_w = \frac{U^2}{R_w} = (a + b\sqrt{v})(T_w - T_g) \quad (1)$$

lub bardziej ogólnej

$$I^2 R_w = \frac{U^2}{R_w} = (a + bv^n)(T_w - T_g) \quad (2)$$

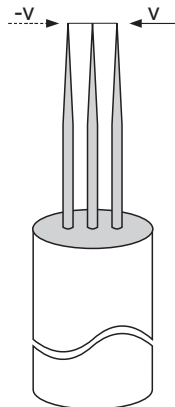
W równaniach tych przyjęte symbole mają następujące znaczenie: I jest natężeniem prądu zasilającego włókno, R_w rezystancją nagrzanego włókna, T_g jest temperaturą napływającego medium, T_w temperaturą nagrzanego włókna, U_w napięciem na grzonym włóknie, a , b i n stałe wyznaczone w procesie wzorcowania czujnika.

Rozwiązując równania (1) lub (2) ze względu na v dostaje się zawsze $|v|$, czyli możliwe są dwie wartości v spełniające równania wyjściowe, v i $-v$. Oznacza to, że nie można jednoznacznie określić zwrotu wektora prędkości medium. Sprawa się bardzo komplikuje, gdy ma się do czynienia z przepływem dwu lub trójwymiarowym. Liczba możliwych rozwiązań jest równa 2^N , gdzie N oznacza wymiarowość zagadnienia. Sytuację ilustruje rys. 1.



Rys. 1. Różna liczba rozwiązań w zależności od wymiarowości zagadnienia

Zagadnienie to można ujednoznaczyć wyposażając czujnik w możliwość wykrywania zwrotu prędkości przepływu. W literaturze można znaleźć kilka rozwiązań anemometrów cieplnych pozwalających wykryć kierunek i zwrot prędkości przepływu. Są to metody wykorzystujące sondy zawierające trzy lub dwa włókna. Włókna są do siebie równoległe, a linia prądu powinna leżeć w płaszczyźnie, którą wyznaczają włókna. Metody te przedstawiono w pracach [1] i [2]. Rozwiązanie, jakie proponują autorzy, to wprowadzenie do czujnika dodatkowej elektrody wyprowadzającej napięcie ze środka włókna (rys. 2).



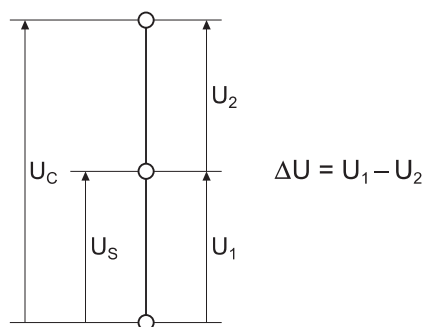
Rys. 2. Szkic sondy do wykrywania zwrotu prędkości przepływu

Elementarne rozważania prowadzą do następującego stwierdzenia: jeżeli w opływie włókna zaistnieje osiowa składowa prędkości przepływu, to zawsze spowoduje ona asymetrię w rozkładzie temperatury wzdłuż włókna, a co za tym idzie asymetrię rozkładu rezystancji wzdłuż włókna i w konsekwencji różnicę napięć na obu częściach włókna. Znak tej różnicy będzie informacją o zwrocie prędkości przepływu medium w wybranym układzie współrzędnych.

2. Praktyczna realizacja czujnika do wykrywania zwrotu

Na trzech współpłaszczyznowych wspornikach, które są odległe od siebie o ok. 3.0 mm rozpięto włókno wolframowe o średnicy 8 μm . Całkowita długość włókna to ok. 6.0 mm. Włókno jest zgrzane do trzech wsporników. Dwa skrajne służą do zasilania czujnika, środkowe do pomiaru napięcia „na środku” czujnika. Każdorazowo mierzono napięcie na całym włóknie U_c i napięcie „na środku” U_s . Czujnik włączony jest w system anemometru stałorezystancyjnego. Rezystancję „na zimno” R_g mierzono przed każdą serią pomiarów.

Na rys. 3 pokazano schematycznie jakie wielkości mierzono. Tak więc napięcie U_1 jest napięciem na czujniku między punktami 1-2 i jest równe U_s . Napięcie U_2 na pozostałym odcinku czujnika jest równe $U_c - U_s$.



Rys. 3. Rozkład mierzonych napięć

Zatem napięcie różnicowe ΔU jest równe

$$\Delta U = U_2 - U_1 = (U_c - U_s) - U_s = U_c - 2U_s \quad (3)$$

Z równania (3) można wyciągnąć wniosek, że jeśli napływ na włókno jest prostopadły (włókno ułożone poziomo, by wyeliminować wpływ konwekcji naturalnej) i U_s wyprowadzone jest dokładnie ze środka włókna, to ΔU winno być równe zeru niezależnie od prędkości przepływu. Jednakże w trakcie wykonywania czujnika powstają pewne niedokładności i długości obu części włókna nie są takie same, czy też rezystancje zgrzein i miejsc lutowania nie są równe, co prowadzi do nierównomiernego podziału rezystancji włókna. Można wówczas wprowadzić współczynnik korekcyjny k , który pozwoli na symetryzację napięcia na obu częściach włókna. Jeśli założy się, że napięcie $U_2 = U_c - U_s$ jest k_1 razy większe od napięcia U_1 to ΔU będzie wówczas równe

$$\Delta U = U_2 - U_1 = (U_c - k_1 U_s) - U_s = U_c - (k_1 + 1)U_s \quad (4)$$

Zakładając, że $\Delta U = 0$, gdy przepływ jest prostopadły do włókna to dostajemy

$$k_1 = \frac{U_c - U_s}{U_s} \quad (5)$$

Można także założyć, że U_1 jest k_2 razy większe od U_2 i wówczas mamy

$$\Delta U = U_2 - U_1 = (U_c - U_s)k_2 - U_s = 0 \quad (6)$$

a stąd

$$k_2 = \frac{U_s}{U_c - U_s} \quad (7)$$

Z równań (6) i (7) dostaje się, że $k_1 k_2 = 1$, co jest oczywiste.

3. Badania eksperymentalne

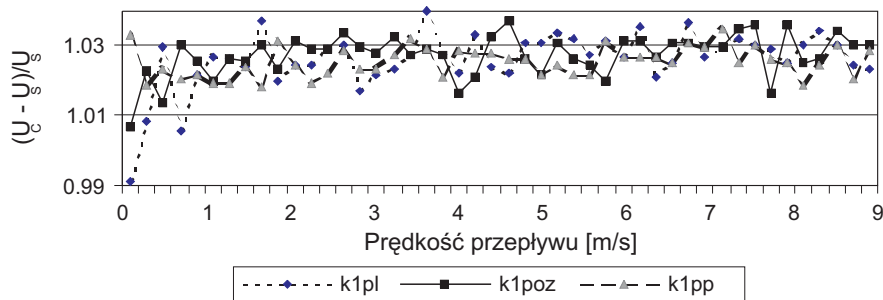
Badano sondę przedstawioną na rys. 2, która wykonana była z włókna wolframowego o średnicy 8 μm . Jej długość wynosiła ok. 6.0 mm. Rezystancja tej sondy „na zimno” wynosiła 9.14 Ω . Sonda pracowała w układzie anemometru stałorezystancyjnego. Mierzono napięcia U_c i U_s , jako funkcje prędkości przepływu powietrza, przy współczynnikach nagrzania 1.6, 1.7, 1.8, 1.9 i 2.0.

Sonda umieszczona była poziomo w osi tunelu aerodynamicznego, na jego wylocie a włókno sondy w pierwszej serii pomiarowej było poziome i prostopadłe do osi tunelu (czyli do prędkości przepływu powietrza), a następnie obracano sondę o 90° w prawo lub lewo. Celem tych pomiarów było zbadanie: jaka jest asymetria sondy i czy zależy ona od położenia sondy oraz czy współczynnik korekcyjny wprowadzony wzorami (4) lub (6) pozostaje stały, czy też zależy od prędkości lub współczynnika nagrzania włókna.

Wyniki pomiarów przedstawia tab. 3, gdzie zestawiono wartości napięć U_c i U_s dla trzech położen grzanego włókna: położenia pionowego, gdy krótsza część jest na dole (k_{1pl}), położenia poziomego (k_{1poz})

i położenia pionowego z krótszą częścią u góry (k_{1pp}). W każdym przypadku prędkość przepływu była prostopadła do grzanego włókna. Dalsze trzy kolumny zawierają współczynniki korekcji dla kolejnych ustawień włókna.

Na rys. 4 przedstawiono fluktuacje współczynnika korekcji w zależności od prędkości przepływu powietrza dla trzech ustawień grzanego włókna. Można zauważyć, że fluktuacje te mieszczą się w granicach 0.99 do 1.04. Odchylenia te powstają prawdopodobnie na skutek fluktuacji prędkości związanej z wyhamowaniem strumienia na ostrzach wsporników.



Rys. 4. Fluktuacje współczynnika korekcji k_1 od prędkości w zależności od położenia grzanego włókna

Średnie wartości współczynnika korekcyjnego k_1 dla prędkości zmieniających się od zera do 9 m/s w zależności od położenia przestrzennego grzanego włókna dla współczynnika nagrzania $N = 1.6$ podaje tab. 1.

Tab. 1. Średni współczynnik korekcji w zależności od ustawienia włókna dla $N = 1.6$

Wielkość	k_{1pl}	k_{1poz}	k_{1pp}
k_{1sr}	1.0261	1.0273	1.0254
Δk	0.00838	0.00617	0.00429
$\Delta k/k_{1sr}$	0.816%	0.600%	0.419%

Średnia wartość współczynnika korekcji k_1 dla tych trzech położenia włókna jest równa 1.02627. Ponieważ docelowo czujnik ma służyć do określania zwrotu przepływu przez pomiar skorygowanego napięcia różnicowego ΔU , dlatego jest ważnym: jaka może powstać różnica współczynnika korekcji tylko na skutek różnego ustawienia w przestrzeni. Tu mamy tylko obrót względem osi czujnika a włókno cały czas pozostaje prostopadłe do wektora prędkości. Maksymalna różnica we współczynniku korekcji wynosi tu 0.00073 co stanowi 0.003%.

Analogiczne pomiary i obliczenia przeprowadzono dla współczynników nagrzania włókna równych 1.7, 1.8, 1.9 i 2.0. Średnie wartości współczynnika korekcji k_1 dla poziomego ustawienia włókna podaje tab. 2. Średnia wartość współczynnika korekcji k_1 przy poziomym ustawieniu grzanego włókna dla współczynników nagrzania zmieniających się od wartości 1.6 do 2.0 jest równa 1.0310 z odchyleniem standardowym równym 0.0047, co stanowi 0.455%. Ten rozrzut jest porównywalny z powstającym przy zmianie prędkości. Można więc przyjąć, że średni współczynnik korekcyjny k_1 jest stały z dokładnością ok. 1%. Jednakże współczynnik k_1 jako funkcja prędkości zmienia się w szerszym zakresie, co uwidacznia tab. 3, szczególnie jest to widoczne dla zerowej prędkości.

Tab. 2. Wyniki pomiarów współczynnika korekcji w zależności od współczynnika nagrzania włókna dla ustawienia poziomego włókna

N	k_{sr}	$\Delta k_{sr}/k_{sr}$	$\Delta k_{sr}/k_{sr}$ [%]
1.6	1.0273	0.0061	0.600
1.7	1.0298	0.00442	0.429
1.8	1.0319	0.00405	0.392
1.9	1.0323	0.00491	0.476
2.0	1.0334	0.00411	0.398

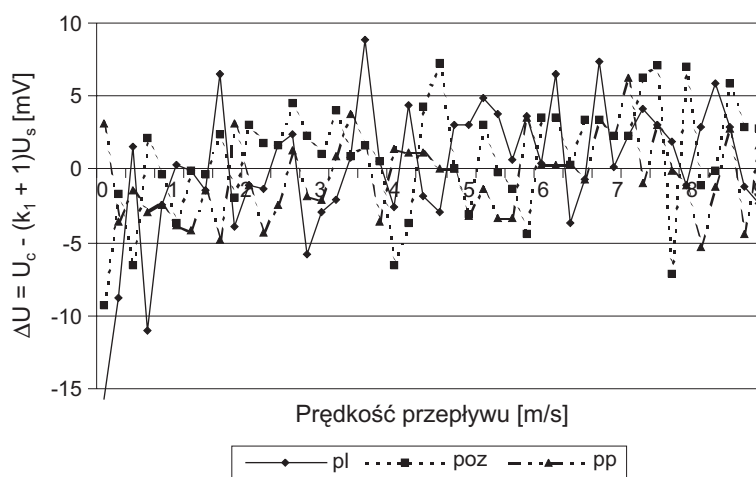
Z danych w tab. 2 widzimy, że współczynnik korekcji k_{1sr} lekko narasta ze wzrostem współczynnika nagrzania. Musi się to wiązać ze zmianą rozkładu temperatury na obu częściach włókna. Natomiast przy ustalonym współczynniku nagrzania odchylenie standardowe średniej współczynnika korekcji nie przekracza 0.82%.

Analogiczne pomiary i obliczenia przeprowadzono dla pionowego ustawienia włókna (czujnik obrócono o 90°). Wyniki są porównywalne.

Znając średni współczynnik korekcyjny k_1 można przeliczyć jakie byłyby napięcia różnicowe ΔU . Ze wzoru (4) mamy

$$\Delta U = U_c - (k_{sr} + 1)U_s \quad (8)$$

Na rys. 5. przedstawiono wyliczone ze wzoru (8) napięcia różnicowe dla trzech ustawień grzanego włókna sondy, wynikające tylko z różnej prędkości przepływu. Łatwo zauważyć, że zmienność tego napięcia mieści się w granicach 8 mV, ale zdecydowana większość mieści się w zakresie 5 mV. Stąd widać, że dopiero napięcia różnicowe powyżej tych granic może być miarą zwrotu przepływu.



Rys. 5. Fluktuacje napięcia różnicowego ΔU w zależności od prędkości przepływu powietrza

Tab. 3. Pomiary U_c i U_s , dla trzech położenia włókna oraz współczynniki korekcji k_1 w zależności od prędkości powietrza dla współczynnika nagrzania włókna $N = 1.6$

v [m/s]	U_c [V]	U_s [V]	U_c [V]	U_s [V]	U_c [V]	U_s [V]	k_{1d} [1]	k_{1poz} [1]	k_{1g} [1]
0	0.886	0.445	0.937	0.467	0.919	0.452	0.9910	1.0064	1.0332
0.2	0.974	0.485	0.981	0.485	0.963	0.477	1.0082	1.0227	1.0189
0.4	1.035	0.510	1.035	0.514	1.032	0.510	1.0294	1.0136	1.0235
0.6	1.075	0.536	1.072	0.528	1.075	0.532	1.0056	1.0303	1.0207
0.8	1.112	0.550	1.108	0.547	1.112	0.550	1.0218	1.0256	1.0218
1.0	1.137	0.561	1.133	0.561	1.141	0.565	1.0267	1.0196	1.0195
1.2	1.159	0.572	1.159	0.572	1.163	0.576	1.0262	1.0262	1.0191
1.4	1.188	0.587	1.181	0.583	1.188	0.587	1.0239	1.0257	1.0239
1.6	1.202	0.590	1.206	0.594	1.213	0.601	1.0373	1.0303	1.1830
1.8	1.228	0.608	1.224	0.605	1.221	0.601	1.0197	1.0231	1.0316
2.0	1.239	0.612	1.235	0.608	1.239	0.612	1.0245	1.0313	1.0245
2.2	1.253	0.619	1.250	0.616	1.250	0.619	1.0242	1.2920	1.0194
2.4	1.264	0.623	1.264	0.623	1.268	0.627	1.0289	1.0289	1.0223
2.6	1.279	0.630	1.275	0.627	1.286	0.634	1.0302	1.0335	1.0284
2.8	1.293	0.641	1.293	0.637	1.297	0.641	1.0172	1.0298	1.0234
3.0	1.304	0.645	1.308	0.645	1.311	0.648	1.0217	1.0279	1.0231
3.2	1.311	0.648	1.311	0.645	1.322	0.652	1.0231	1.0326	1.0276
3.4	1.330	0.656	1.322	0.652	1.333	0.656	1.0274	1.0276	1.0320
3.6	1.330	0.652	1.337	0.659	1.337	0.659	1.0399	1.0288	1.0288
3.8	1.344	0.663	1.344	0.663	1.348	0.667	1.0271	1.0271	1.0210

4.0	1.355	0.670	1.351	0.670	1.359	0.670	1.0224	1.0164	1.2840
4.2	1.362	0.670	1.362	0.674	1.373	0.677	1.0328	1.0208	1.0281
4.4	1.370	0.677	1.370	0.674	1.373	0.677	1.0236	1.0326	1.0281
4.6	1.377	0.681	1.373	0.674	1.380	0.681	1.0220	1.0371	1.0264
4.8	1.391	0.685	1.380	0.681	1.388	0.685	1.0307	1.0264	1.0263
5.0	1.391	0.685	1.391	0.688	1.399	0.692	1.0307	1.0218	1.0217
5.2	1.399	0.688	1.391	0.685	1.409	0.696	1.0334	1.0307	1.0244
5.4	1.406	0.692	1.402	0.692	1.413	0.699	1.0318	1.0260	1.0215
5.6	1.417	0.699	1.409	0.696	1.413	0.699	1.0272	1.0244	1.0215
5.8	1.420	0.699	1.420	0.703	1.428	0.703	1.0315	1.0199	1.0313
6.0	1.431	0.706	1.428	0.703	1.439	0.710	1.0269	1.0313	1.0268
6.2	1.431	0.703	1.428	0.703	1.439	0.710	1.0356	1.0313	1.0268
6.4	1.435	0.710	1.439	0.710	1.439	0.710	1.0211	1.0268	1.0268
6.6	1.446	0.714	1.442	0.710	1.446	0.714	1.0252	1.0310	1.0252
6.8	1.446	0.710	1.442	0.710	1.442	0.710	1.0366	1.0310	1.0310
7.0	1.453	0.717	1.449	0.714	1.449	0.714	1.0265	1.0294	1.0294
7.2	1.449	0.714	1.449	0.714	1.453	0.714	1.0294	1.0294	1.0350
7.4	1.457	0.717	1.453	0.714	1.460	0.721	1.0321	1.0350	1.0250
7.6	1.464	0.721	1.460	0.717	1.464	0.721	1.0305	1.0363	1.0305
7.8	1.471	0.725	1.468	0.728	1.475	0.728	1.0290	1.0165	1.0261
8.0	1.468	0.725	1.468	0.721	1.468	0.725	1.0248	1.0361	1.0248
8.2	1.478	0.728	1.468	0.725	1.486	0.736	1.0302	1.0248	1.0190
8.4	1.475	0.725	1.475	0.728	1.482	0.732	1.0345	1.0261	1.0246
8.6	1.478	0.728	1.475	0.725	1.486	0.732	1.0302	1.0345	1.0301
8.8	1.482	0.732	1.478	0.728	1.493	0.739	1.0246	1.0302	1.0203
9.0	1.489	0.736	1.486	0.732	1.493	0.736	1.0231	1.0301	1.0285

Artykuł ten powstał na bazie danych uzyskanych w trakcie realizacji projektu badawczego: Badania asymetrii rozkładu rezystancji opływanego włókna termooanemometru w aspekcie możliwości określania zwrotu prędkości przepływu, nr. 3 T10 C 002 28.

Literatura

- [1] Kielbasa J., (2003): *Anemometr wykrywający zwrot prędkości przepływu*.
- [2] Kielbasa J., Ligęza P., Palacz J., Poleszczyk E., Rachalski A., (2001): *Termooanemometryczna metoda wyznaczania wektora prędkości – wyznaczenie zwrotu metodą różnicową*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, t. 3, nr 2, s. 81-88.

Some investigations of non-symmetric distribution of voltage along the hot-wire in relation to flow velocity

Abstract

The current paper presents some investigations of non-symmetric distribution of voltage along the hot-wire. The additional support that is welded to the center of the wire enables to measure the voltage arising at this point. The sign of the voltage subtract of both parts of the wire indicates the direction of the flow. Since the additional support doesn't divide the wire into equal parts, in order to both resistances become equal, the correction coefficient of resistance of the parts is introduced. The dependence of this coefficient on spatial orientation of the wire was studied. From the fluctuations of the coefficient value the fluctuations of the voltage subtract can be calculated.

Keywords: hot-wire anemometry, probe with an additional support, correction coefficient

Recenzował: doc. dr hab. inż. *Paweł Ligęza*, Instytut Mechaniki Górotworu PAN