

Skuteczność korekcji temperaturowej w termooanemometrycznych systemach pomiarowych

PAWEŁ JAMRÓZ, KATARZYNA SOCHA

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

Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę wpływu zmiany temperatury przepływającego powietrza wokół termooanemometrycznego włókna pomiarowego na charakterystykę statyczną sondy pomiarowej. W tym celu wykonano szereg badań eksperymentalnych z zastosowaniem opracowanego w Pracowni Metrologii Przepływów IMG PAN czterokanałowego modułu termooanemometrycznego CCC 2002, wykorzystywanego do badań laboratoryjnych w zakresie mechaniki płynów. Badania przeprowadzone zostały w zamkniętym tunelu aerodynamicznym, a wyniki odniesione do wskazań wzorca w postaci statycznej rurki Pitota. Na podstawie wykonanych badań określono skuteczność przeprowadzanej korekcji temperaturowej.

Słowa kluczowe: termooanemometr, korekcja temperaturowa

1. Wstęp

W Instytucie Mechaniki Górotworu PAN opracowywane są coraz doskonalsze konstrukcje termooanemometrycznych układów pomiarowych dedykowanych dla konkretnych zastosowań (Rachalski, 2014; Ligęza i in., 2012). Wykorzystywane są one do badań nad różnego rodzaju typami zjawisk występujących w przepływach. Na podstawie wyników z takich pomiarów wyciągane są między innymi wnioski związane z właściwościami przepływów w procesie przewietrzania wyrobisk kopalnianych (Skotniczny i in., 2014). Wyjście z takimi przyrządami poza laboratorium oznacza wykonywanie pomiarów w warunkach, których kontrolowanie i dokładne poznanie z reguły nie jest możliwe. W celu umożliwienia oceny wiarygodności uzyskiwanych wyników pomiarowych konieczne stało się poznanie wpływu zmiennych warunków, w których wykonywane są pomiary na charakterystyki statyczne stosowanych termooanemometrów. Jednym z głównych czynników środowiskowych posiadających wpływ na charakterystykę statyczną termooanemometrów jest zmiana temperatury przepływającego powietrza wokół włókna pomiarowego, w stosunku do temperatury powietrza, w którym wykonywane było wzorcowanie. Związane z tym prace naukowe wskazują na metody korekcji tych zmian dla konkretnych rozwiązań termooanemometrycznych, które wykorzystywane są również w systemach pomiarowych projektowanych w IMG PAN. Opracowanie budżetów niepewności pomiarów, dla takich systemów wymaga określenia poziomu skuteczności przeprowadzenia takiej korekcji i stanowi temat niniejszego opracowania.

2. Wzorcowanie jednowłóknowych systemów termooanemometrycznych

W klasycznym ujęciu wzorcowanie jest procesem mającym na celu ustalenie relacji pomiędzy wartościami wielkości mierzonej wskazanymi przez przyrząd pomiarowy, a odpowiednimi wartościami wielkości fizycznych, realizowanymi przez wzorzec jednostki miary. W przypadku wzorcowania przyrządów anemometrycznych polega to na ustaleniu relacji pomiędzy poprawnie mierzoną prędkością przez system wzorcowy v_r , a prędkością wskazywaną przez wzorcowany przyrząd pomiarowy v_e . Dla wykorzystywanych w Pracowni Metrologii Przepływów termooanemometrów włóknowych proces wzorcowania jest bardziej

złożony, gdyż w jego trakcie wyznaczane są również parametry cyfrowego linearyzatora, pozwalającego na ustalenie relacji pomiędzy napięciem wyjściowym termooanemometru (sygnałem pomiarowym), a wartościami wskazywanymi przez wzorzec pomiarowy. Proces wzorcowania przyrządu połączony jest zatem z jego adiustacją, w wyniku której otrzymywane są parametry A , B , n w wyniku poszukiwania minimum funkcji (1).

$$\left[\left[(U^2 - A)B \right]^n - v_r \right]^2 = \min \quad (1)$$

gdzie: U – napięciowy sygnał pomiarowy z przetwornika termooanemometrycznego.

Wzór ten stanowi przekształcenie modelu pomiaru termooanemometru opracowanego na podstawie bilansu energetycznego włókna pomiarowego. Określenie parametrów linearyzatora pozwala na zapisanie zależności pozwalającej na estymację chwilowych wartości prędkości przepływającego medium v_e :

$$v_e = \left[(U^2 - A)B \right]^n \quad (2)$$

W wyniku tak przedstawionego procesu wzorcowania uzyskiwane są charakterystyki $v_r(v_e)$ w postaci funkcji liniowych o współczynniku nachylenia zbliżonym do wartości 1 i zerowym przesunięciu. Taka postać charakterystyki staje się użyteczna w ocenie wpływów, jakie na charakterystykę przyrządu posiadają zewnętrzne czynniki, np. zmiany warunków środowiskowych. Zastosowanie zależności (2) w pomiarach przepływu powietrza o parametrach innych niż te, w których włókno pomiarowe było wzorcowane może powodować duże błędy pomiarowe. Na skutek braku możliwości wykonywania wzorcowań we wszelkich możliwych parametrach przepływającego powietrza, konieczna staje się kompensacja wpływu ich zmian na charakterystykę przetwarzania termooanemometrów.

3. Stanowisko pomiarowe

W celu określenia poziomu skuteczności korekcji temperaturowej dla termooanemometrów konstruowanych w IMG-PAN wykorzystano stanowisko pomiarowe opisane w pracy Jamróz i in., (2015) w skład którego wchodzi: zamknięty tunel aerodynamiczny (Bujalski i in., 2013) z systemem do pomiaru wzorcowej prędkości przepływu, termooanemometryczny system pomiarowy pracujący w oparciu o koncepcję sterowanego układu stałotemperaturowego (Ligęza, 2003) wyposażony w zestaw jednowłóknowych sond pomiarowych o średnicy 5 μm .

4. Badania eksperymentalne

4.1. Wpływ temperatury przepływającego powietrza na charakterystykę statyczną termooanemometru

Z analizy dotychczasowych prac poświęconych termooanometrii wynika, że czynnikiem wpływającym w sposób decydujący na dokładność uzyskiwanych wyników pomiaru jest temperatura przepływającego powietrza. Jej zmiana w trakcie wykonywania pomiarów, w stosunku do temperatury medium w trakcie wzorcowania $T_{a,0}$ ma bardzo duży wpływ na charakterystykę przetwarzania termooanemometru. Wpływ ten określany był przez dużą grupę badaczy (Koppius i Trines, 1976; Fiedler, 1978; Bremhorst, 1985; Cierniak, 2009). Prezentowane przez nich wyniki związane są z konkretnymi układami termooanemometrycznymi lub ich modelami. Prezentowane zależności dotyczą charakterystyk napięciowych $E_w(v, T_a)$ lub mocy odbieranej w postaci ciepła z jednostkowych odcinków nieskończenie długich włókien $P(v, T_a)$. Dotyczą one zarówno badań eksperymentalnych, jak również wykonywanych z użyciem modeli wymiany ciepła pomiędzy włóknom, a przepływającym medium. W zbiorczej pracy poświęconej termooanemometrycznej metodzie pomiaru (Brunn, 1995), zaleca się stosowanie współczynnika korekcji dla mierzonego napięcia proporcjonalnego do prądu płynącego przez włókno pomiarowe zgodnie z zależnością:

$$U_0 = U \left(\frac{T_w - T_{a,0}}{T_w - T_a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

gdzie:

- T_w – temperatura nagrzanego włókna pomiarowego,
- $T_{a,0}$ – temperatura powietrza w trakcie wzorcowania,
- T_a – temperatura powietrza w trakcie wykonywanych pomiarów.

Tak skorygowane napięcie wykorzystuje się do wyznaczenia skorygowanej wartości prędkości w stosunku do różnicy temperatur pomiędzy warunkami, w jakich wzorcowana była sonda pomiarowa, a warunkami, w jakich jest ona wykorzystywana. Przeprowadzony eksperyment pomiarowy miał na celu wykazać, na ile prezentowana metoda korekcji jest skuteczna w przypadku wykorzystywanych w IMG PAN termoanemometrycznych układów pomiarowych. Wykorzystując dostępne stanowisko pomiarowe i aparaturę, zaplanowano eksperyment polegający na dwukrotnym wzorcowaniu serii czterech termoanemometrycznych sond włóknowych (średnica włókna 5 μm).

4.2. Wzorcowanie w temperaturze odniesienia $T_{a,0} = 293,15 \text{ K}$

W pierwszym etapie eksperymentu sondy wywzorcowano w standardowych warunkach laboratoryjnych, w których wykonywane są rutynowe wzorcowania: wilgotność względna powietrza $\varphi_{a,0} = 40\%$ (przetwornik RF-01N, dokładność $\pm 0,2\%$), ciśnienie atmosferyczne $p_{a,0} = 999,32 \text{ hPa}$ (przetwornik RPT 410, dokładność $\pm 0,5 \text{ hPa}$). Dzięki wykorzystaniu stabilizacji temperatury w tunelu, udało się utrzymać w ciągu całego wzorcowania temperaturę przepływającego powietrza $T_{a,0}$ o wartości 293,15 K (pomiar przetwornikiem o dokładności $\pm 0,15 \text{ K}$), dla której wcześniej określono rezystancję włókien sond termoanemometrycznych R_0 . Dla tych warunków gęstość powietrza wynosiła $\rho_{a,0} = 1.183 \text{ kg/m}^3$. Następnie, przyjmując współczynnik nagrzania o wartości 1,6 nastawiono rezystancję pracy R_w . Dla tak określonej rezystancji pracy poszczególnych sond konieczne było wyznaczenie temperatury grzanego włókna T_w . Temperaturę pracy włókien sond określono na podstawie zależności pomiędzy temperaturą a rezystancją włókna (4):

$$T_w = T_{a,0} + \frac{\frac{R_w}{R_0} - 1}{\alpha} \quad (4)$$

gdzie:

- α – temperaturowy współczynnik rezystancji [$1/\text{K}$], dla wolframu 0,0036 (Brunn, 1995),
- $R_{a,0}$ – rezystancja włókna pomiarowego w temperaturze $T_{a,0}$,
- R_w – rezystancja włókna pomiarowego w temperaturze T_w .

Wyniki pomiarów i nastaw przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Rezystancje i temperatury poszczególnych sond pomiarowych

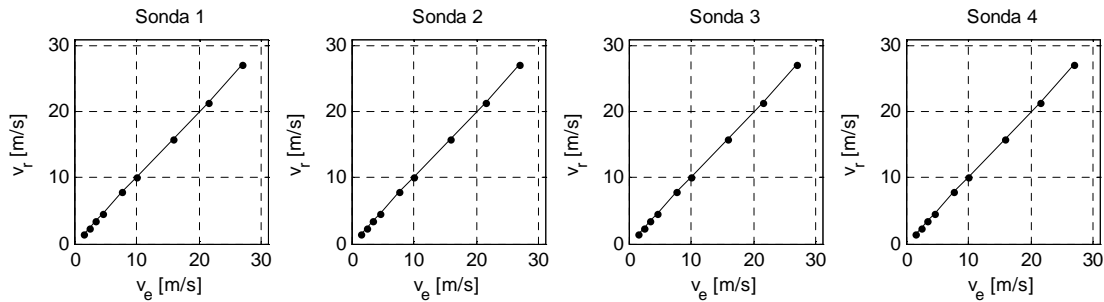
	T_0 [K]	R_0 [Ω]	R_w [Ω]	T_w [K]
Sonda 1	293,15	6.34	10.14	457.04
Sonda 2	293,15	5.23	8.37	457.04
Sonda 3	293,15	6.24	9.98	457.04
Sonda 4	293,15	5.59	8.94	457.04

Dla tak przygotowanego eksperymentu wykonano wzorcowanie w 8 punktach pomiarowych w zakresie 2÷30 m/s, w trakcie których określono współczynniki linearyzatorów dla każdego z kanałów pomiarowych (Tabela 2).

Tab. 2. Współczynniki funkcji lienaryzujących charakterystyki statyczne sond

	A	B	n
Kanał 1/Sonda 1	2.292	0.458	2.357
Kanał 2/Sonda 2	3.197	0.378	2.380
Kanał 3/Sonda 3	2.278	0.455	2.378
Kanał 4/Sonda 4	2.907	0.392	2.391

Na podstawie tak wyznaczonych danych pomiarowych możliwe jest określenie dla każdej z sond charakterystyki statycznej w postaci wykresu zależności $v_r(v_e)$ przedstawionym na rysunku 1, na którym punktami zaznaczono dane pomiarowe, natomiast linią ciągłą ich aproksymację funkcją liniową.



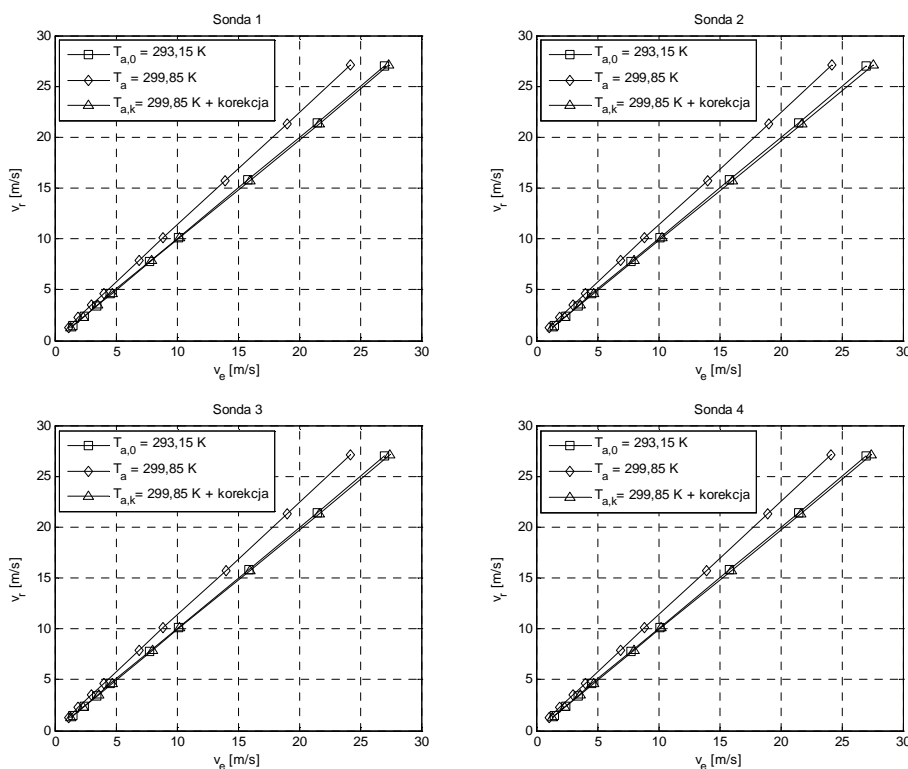
Rys. 1. Charakterystyki statyczne sond pomiarowych w temperaturze $T_{a,0}$

W danych warunkach pomiarowych, ściśle związanych z warunkami wzorcowania charakterystyki te pokrywają się z idealnymi charakterystykami przetwarzania. Nieznaczne odchyłki spowodowane mogą być dokładnością dopasowania funkcji linearyzatora (2) do danych pomiarowych.

4.3. Pomiary w temperaturze innej niż temperatura wzorcowania

W drugim etapie eksperymentu założono, że zostanie wykonane wzorcowanie sond termooanemometrycznych z użyciem wcześniej wyznaczonych parametrów linearyzatorów (Tabela 2), w temperaturze $T_a = 299,85$ K ($26,7^\circ\text{C}$), w punktach odpowiadających prędkościom, w których sondy te były wzorcowane w temperaturze $T_{a,0}$. Niezmieniona została temperatura pracy sondy T_w , dla której określono charakterystyki statyczne w punkcie 4.2. Wartość ciśnienia barometrycznego powietrza wynosiła $p_a = 1000,61$ hPa, a gęstość powietrza $\rho_a = 1.156$ kg/m³.

Wyniki pomiarów w postaci charakterystyk statycznych termooanemometrów przedstawiono na rysunku 2. Dodatkowo wykreślono charakterystyki poszczególnych sond pomiarowych z uwzględnieniem korekcji temperaturowej określonej zależnością (4).



Rys. 2. Charakterystyki statyczne sond pomiarowych dla różnych temperatur

W celu oceny wpływu temperatury na charakterystykę statyczną badanego termoanemometru oraz skuteczności przyjętej metody korekcji, wykonano regresję liniową każdej z nich i wyznaczono współczynniki nachylenia a i przesunięcia b poszczególnych charakterystyk zgodnie z zależnością:

$$v_r = a \cdot v_e + b \quad (5)$$

Wartości poszczególnych współczynników zamieszczono w tabeli 3.

Tab. 3. Współczynniki prostych aproksymujących charakterystyki statyczne sond pomiarowych

Sonda 1						Sonda 2					
$T_{a,0} = 293,15 \text{ K}$		$T_a = 299,85 \text{ K}$		$T_{a,k} = 299,85 \text{ K}$ korekcja		$T_{a,0} = 293,15 \text{ K}$		$T_a = 299,85 \text{ K}$		$T_{a,k} = 299,85 \text{ K}$ korekcja	
a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1.00022	-0.00384	1.11819	0.10868	0.9912	-0.03117	1.00020	-0.00352	1.11683	0.12060	0.98506	-0.04152
Sonda 3						Sonda 4					
$T_{a,0} = 293,15 \text{ K}$		$T_a = 299,85 \text{ K}$		$T_{a,k} = 299,85 \text{ K}$ korekcja		$T_{a,0} = 293,15 \text{ K}$		$T_a = 299,85 \text{ K}$		$T_{a,k} = 299,85 \text{ K}$ korekcja	
a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1.00024	-0.00420	1.11752	0.10741	0.98946	-0.03182	1.00023	-0.00396	1.12080	0.11216	0.98927	-0.04158

Aby określić wpływ temperatury na charakterystykę sondy, wyznaczono temperaturowe współczynniki nachylenia i przesunięcia charakterystyki względem charakterystyki określonej w warunkach wzorcowych $T_{a,0}$ zgodnie z zależnościami:

$$\frac{\Delta a_{T_a, T_{a,0}}}{\Delta T_{T_a, T_{a,0}}} = \frac{a_{T_a} - a_{T_{a,0}}}{T_a - T_{a,0}} \quad \text{oraz} \quad \frac{\Delta b_{T_a, T_{a,0}}}{\Delta T_{T_a, T_{a,0}}} = \frac{b_{T_a} - b_{T_{a,0}}}{T_a - T_{a,0}} \quad (6)$$

W podobny sposób dokonano oceny skuteczności korekcji, odnosząc zmiany poszczególnych współczynników opisujących charakterystykę przyrządu względem zmiany temperatury zgodnie z zależnością:

$$\frac{\Delta a_{T_{a,k}, T_{a,0}}}{\Delta T_{T_{a,k}, T_{a,0}}} = \frac{a_{T_{a,k}} - a_{T_{a,0}}}{T_{a,k} - T_{a,0}} \quad \text{oraz} \quad \frac{\Delta b_{T_{a,k}, T_{a,0}}}{\Delta T_{T_{a,k}, T_{a,0}}} = \frac{b_{T_{a,k}} - b_{T_{a,0}}}{T_{a,k} - T_{a,0}} \quad (7)$$

Wartości odpowiednich współczynników zamieszczono w tabeli 4.

Tab. 4. Temperaturowe współczynniki nachylenia i przesunięcia charakterystyk statycznych

	ΔT bez korekcji		ΔT z korekcją	
	$\frac{\Delta a_{T_a, T_{a,0}}}{\Delta T_{T_a, T_{a,0}}}$	$\frac{\Delta b_{T_a, T_{a,0}}}{\Delta T_{T_a, T_{a,0}}}$	$\frac{\Delta a_{T_{a,k}, T_{a,0}}}{\Delta T_{T_{a,k}, T_{a,0}}}$	$\frac{\Delta b_{T_{a,k}, T_{a,0}}}{\Delta T_{T_{a,k}, T_{a,0}}}$
Kanał 1/Sonda 1	0,0176	0,0168	-0,0013	-0,0041
Kanał 2/Sonda 2	0,0174	0,0185	-0,0022	-0,0057
Kanał 3/Sonda 3	0,0175	0,0166	-0,0016	-0,0041
Kanał 4/Sonda 4	0,0180	0,0173	-0,0016	-0,0056

Wyniki uzyskane w czasie wzorcowań potwierdzają silny wpływ zmiany temperatury przepływu w stosunku do temperatury wzorcowania na charakterystykę statyczną. Wzrost temperatury o 6,7 K powoduje średni wzrost kierunkowego współczynnika prostej aproksymującej charakterystykę statyczną na poziomie 0,12, co daje jego przyrost 0,018/K. Podobnego rzędu przyrost zaobserwowano dla współczynnika przesunięcia charakterystyki. W przeprowadzonym eksperymencie wykazano konieczność korygowania charakterystyki wraz ze zmianą temperatury. Po zastosowaniu rekomendowanej metody kompensacji wpływu zmiany temperatury uzyskano znaczne zmniejszenie wartości temperaturowych współczynników nachylenia i przesunięcia charakterystyk statycznych do średniej wartości -0,0017/K dla współczynnika a oraz -0,005 dla współczynnika b . Kompensacja ta jednak nie gwarantuje całkowitej eliminacji wpływu

zmiany temperatury dla badanego układu termooanemometru. Powodem tego może być szereg czynników związanych z przyjętą metodyką badań i własnościami termooanemometrii:

- niedokładne wyznaczenie temperatury nagrzanego włókna (przyjęto rekomendowaną wartość współczynnika α dla wolframu),
- zmiana temperatury oprócz zmiany współczynnika nagrzania włókna niesie ze sobą również zmianę gęstości medium, czego rekomendowana metoda kompensacji zmiany temperatury nie uwzględnia.

5. Podsumowanie

Dzięki przeprowadzonym badaniom eksperymentalnym, możliwe było określenie wpływu zmiany temperatury przepływającego powietrza wokół włókna pomiarowego na charakterystykę statyczną badanego systemu pomiarowego. Zastosowanie zalecanej metody kompensacji dla termooanemometrów projektowanych i wytwarzanych w IMG PAN przynosi wysoką skuteczność korekcji, jednak nie zapewnia całkowitej eliminacji wpływu tego czynnika na charakterystyki. Powoduje to konieczność uwzględniania tego składnika w opracowywanych budżetach niepewności wykonywanych pomiarów.

Praca została wykonana w ramach prac statutowych 2016 realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Bremhorst K., 1985. *Effect of fluid temperature on hot-wire anemometers and an improved method of temperature compensation and linearisation without use of small signal sensitivities*. Journal of Physics E: Scientific Instruments 18(1): 44-49.
- Brunn H., 1995. *Hot-wire Anemometry. Principles and Signal Analysis*. New York: Oxford University Press.
- Bujalski M., Gawor M., Sobczyk J., 2013. *Tunel aerodynamiczny o obiegu zamkniętym, ze stabilizacją temperatury i wilgotności powietrza, przystosowany do pomiarów metodami optycznymi*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, 15(1-2): 65-74.
- Cierniak W., 2009. *Thermoanemometers*. Kraków: Instytut Mechaniki Górotworu PAN.
- Fiedler H., 1978. *On Data Acquisition in Heated Turbulent Flows*. [W:] Proceedings of the Dynamic Flow Conference 1978 on Dynamic Measurements in Unsteady Flows, 81-100.
- Jamróz P., Socha K., Ligęza P., Poleszczyk E., Rachalski A., Zięba M., 2015. *Badanie charakterystyk statycznych termooanemometrycznych czujników włóknowych*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, 17(3-4).
- Koppius A.M, Trines G.R.M., 1976. *The dependence of hot-wire calibration on gas temperature at low Reynolds numbers*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 19(9): 967-974.
- Ligęza P., 2003. *Sterowany komputerowo termooanemometryczny system pomiarowy pracujący w oparciu o koncepcję sterowanego układu stalotemperaturowego*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, 5(2): 237-244.
- Ligęza P., Jamróz P., Poleszczyk E., Socha K., 2012. *Wykorzystanie naturalnych fluktuacji parametrów przepływu do pomiaru wektora prędkości*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, 14(1-4): 203-212.
- Rachalski A., 2014. *Anemometr z falą cieplną – sygnały temperaturowe i metody wyznaczania prędkości*. [W:] Materiały X Konferencji Podstawowe Problemy Metrologii, PPM 2014.
- Skotniczny P., Jamróz P., Ligęza P., Poleszczyk E., 2014. *Wielokanałowy system termooanemometryczny do wyznaczania zaawansowanych parametrów przepływowych powietrza w wyrobisku górniczym*. [W:] Wybrane problemy eksploatacji pokładów węgla kamiennego ze szczególnym uwzględnieniem zagrożeń aerologicznych. Katowice : Główny Instytut Górnictwa.

The temperature correction effectiveness of the hot-wire measurement systems

Abstract

The article presents an analysis of the impact of temperature air flow changes on static response of a hot-wire measurement system static characteristic. For this purpose, a series of experimental studies were conducted. The probe calibrations in velocity range were carried out in the closed wind tunnel for various ambient temperatures. The pitot tube was utilized as the measurement reference instrument. Based on the calibrations results, the correction method effectiveness was studied.

Keywords: hot wire measurement system, temperature correction