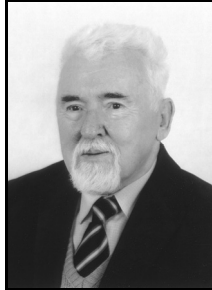


Jan KIEŁBASA

INSTYTUT MECHANIKI GÓROTWORU PAN
ul. Reymonta 27, 30-057 Kraków

Wyznaczenie parametrów w równaniu opisującym anemometr stałorzystancyjny

Prof. dr hab. Jan KIEŁBASA



Studia z zakresu fizyki doświadczalnej na Uniwersytecie Jagiellońskim ukończyłem w 1962 r. Od tego czasu pracuję w Instytucie Mechaniki Górnotworu PAN w Krakowie, gdzie zdobyłem kolejne stopnie naukowe a w 1994 roku uzyskałem tytuł profesora. W latach 1998-2010 pracowałem jako profesor na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Przez cały czas zajmuję się zagadnieniami dotyczącymi powolnych przepływów, a w szczególności związanych z pomiarami termo-anemometrycznymi.

e-mail: ula_jas@interia.pl

Streszczenie

W artykule zaprezentowano inne podejście do tzw. prawa Kinga, które wiąże prąd I_w zasilający włókno anemometru cieplnego z jego rezystancją R_w , temperaturą włókna T_w , temperaturą napływającego medium T_g , prędkością medium v a także trzema parametrami a , b i n , które określa się w procesie wzorcowania sond. W artykule za Ligęzą [5] wprowadza się tzw. prąd normujący I_k oraz prędkość normującą v_k , które jednak definiuje się odmiennie. Dzięki temu można wyznaczyć niezależnie wykładnik n .

Słowa kluczowe: anemometr cieplny, termoanemometr, anemometr z grzanym włóknem, prawo Kinga.

Determination of the parameters in the equation describing a constant-resistance anemometer

Abstract

The King's law describes heat losses of a thin heated wire in relation to the flow velocity and the type of flowing medium. This formula was derived under the following assumptions: the flow is potential, the flow velocity is uniform in the vicinity of the wire and the flowing medium does not change its composition and the physical properties *regardless* of the velocity and the temperature. Under the above conditions the asymptotic solution has a form:

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

where I_w — electric current supplying the wire of the probe, R_w - wire resistance T_w - wire temperature, T_g - temperature of the flowing medium, v - velocity of the flowing medium, a and b - constants obtained in the calibration process. Then, it turned out that the real characteristics of anemometers differed from the above relationship. Numerous authors modified Eq. 1 by introducing the term $v^{0.5}$ instead of v^n . The constant resistance anemometer can be described by Eq. 2. The dimension of term bv^n is changeable since it depends on n , therefore parameters b and n cannot be determined unambiguously. Ligęza [5] proposed a solution to this problem by introducing the characteristic current I_k and the standard velocity v_k . In such approach Eq. 2 takes the form of Eqs. 3 and 4. The author rewrote Eq. 3 to the form of Eq. 5, in which the values related to the current are on the left side and the values related to the velocity are on the right side. If the left side equals 1, the flow velocity v is equal to v_k regardless of the value of exponent n . After logarithming Eq. 5. side by side we obtain the $n(v)$ dependence.

Keywords: thermoanemometer, constant-resistance anemometer, King's law.

1. Wstęp

Na ogół przyjmuje się, że anemometr stałorzystancyjny (stało-temperaturowy) opisuje równanie

$$I_w^2(v) = (a + bv^n) \left(1 - \frac{1}{N}\right), \quad (2)$$

gdzie I_w jest prądem nagrzewającym włókno sondy, $N=R_w/R_g$ nazywa się współczynnikiem nagrzania włókna, R_w jest rezystancją nagrzanego włókna, R_g rezystancją włókna w temperaturze płynącego medium, v prędkością przepływu, n wykładnikiem zbliżonym do 0,5, a stałe a i b wyznacza się z danych uzyskanych przy wzorcowaniu sond. Pewną trudności sprawia interpretacja fizyczna parametru b gdyż w zależności od wartości wykładnika n jego wymiar musi ulegać zmianie co jest trudne do zaakceptowania. P. Ligęza zaproponował [5] inną postać równania opisującego pracę anemometru stałorzystancyjnego w formie

$$I_w^2(v) = I_k^2 \left(1 - \frac{1}{N}\right) \left(1 + \left(\frac{v}{v_k}\right)^n\right), \quad (3)$$

oraz

$$v_k = \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

gdzie I_k jest prądem charakterystycznym, przy którym dla $v = 0$ rezystancja czujnika zmierza do nieskończoności, a stałą v_k wyznacza zależność podana obok. Autor [6] proponuje inną postać równania opisującego pracę anemometru stałorzystancyjnego w formie

$$\frac{N}{N-1} \frac{I_w^2(v)}{I_k^2} - 1 = \left(\frac{v}{v_k}\right)^n, \quad (5)$$

gdzie I_w jest prądem zasilającym czujnik, I_k prądem charakterystycznym, przy którym dla $v = 0$ rezystancja czujnika się podwaja, natomiast v_k jest normującą prędkością, dla której lewa strona równania (5)

$$F(v, N) = \frac{N}{N-1} \frac{I_w^2(v)}{I_k^2} - 1 \quad (6)$$

jest równa jedności. Prąd $I_w(v)$, przy którym spełniona jest zależność (5) wyznacza prąd I_k a prędkość przepływu v , przy której dla współczynnika nagrzania $N=2$ prąd zasilający włókno sondy $I_w(v)=I_k$ jest równa v_k .

Wykładnik $n = n(v, N)$ jako funkcję prędkości v i współczynnika N nagrzania włókna uzyskuje się z równania (5) po jego obustronnym zlogarytmowaniu jako

$$n(v, N) = \frac{\ln(F(v, N))}{\ln\left(\frac{v}{v_k}\right)}. \quad (7)$$

2. Wyniki eksperymentalne

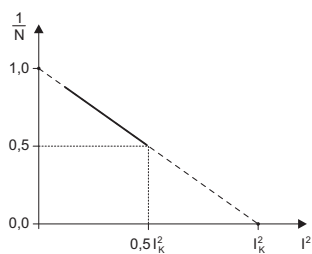
Do badań wykorzystano czujnik wykonany z włókna wolframowego o średnicy 5 μm i długości około 2 mm. Czujnik wzorcowano na stanowisku firmy TSI model 1129 [7]. Czujnik był umocowany w uchwycie pionowo w ten sposób, że włókno było poziomo a napływ powietrza na włókno był pionowo w górę.

Czujnik zasilano z układu elektronicznego realizującego anemometr stałorezystancyjny co oznacza, że układ elektroniczny zasilał włókno czujnika takim prądem, aby jego rezystancja była stała niezależnie od prędkości opływającego go medium. Pomieszczenie było klimatyzowane a temperatura powietrza wynosiła $26^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Rezystancja włókna „na zimno” wynosiła $R_0=5,57\Omega$. Zmierzono w warunkach bezprzepływowych ($v = 0$), prąd zasilania sondy I_0 dla współczynnika nagrzania $N = 2$, który był równy 44,40 mA, stąd $I_k^2 = 3942 \text{ mA}^2$.

W tabeli 1 zestawiono wyniki pomiarów prądów zasilania czujnika jakie występują dla danej prędkości przepływu powietrza przy zadanym współczynniku nagrzania N .

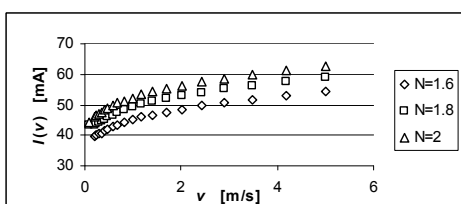
Tab. 1. Prądy zasilania czujników dla trzech współczynników nagrzania włókien
Tab. 1. Sensor supply current for three heating coefficients of fibres

N=1.6		N=1.8		N=2.0	
v [m/s]	I(v) [mA]	v [m/s]	I(v) [mA]	v [m/s]	I(v) [mA]
0	0	0,083	42,01	0,083	44,32
0,214	39,57	0,209	43,28	0,21	46,19
0,246	39,97	0,247	43,70	0,246	46,65
0,288	40,37	0,287	44,09	0,287	47,05
0,339	40,80	0,339	44,59	0,339	47,60
0,404	41,42	0,403	45,23	0,403	48,27
0,48	42,03	0,48	45,91	0,481	48,94
0,572	42,71	0,572	46,62	0,572	49,71
0,684	43,46	0,684	47,40	0,684	50,50
0,82	44,24	0,819	48,24	0,819	51,38
0,981	45,05	0,981	49,13	0,981	52,29
1,174	45,90	1,174	50,03	1,174	53,24
1,407	46,78	1,408	50,96	1,408	54,21
1,689	47,68	1,689	51,94	1,689	55,23
2,027	48,61	2,028	52,95	2,028	56,27
2,431	49,61	2,433	54,01	2,433	57,39
2,904	50,64	2,905	55,09	2,906	58,53
3,484	51,74	3,486	56,28	3,486	59,75
4,174	52,93	4,175	57,60	4,176	61,05
5,004	54,16	4,956	58,93	5,006	62,43



Rys. 1. Graficzne wyznaczenie I_k^2
Fig. 1. Graphical determination of I_k^2

Natomiast w tabeli 2 zamieszczono wyniki obliczeń wielkości $F(v,N)$, v/v_k , $\ln(F)$, $\ln(v/v_k)$ oraz $n(v)$.



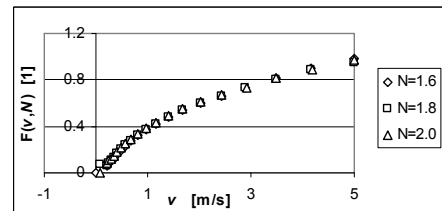
Rys. 2. Krzywe wzorcowania sondy W-5µm od prędkości dla $N = 1,6, 1,8$ i $2,0$
Fig. 2. Calibration curve of the W-5µm sensor for $N = 1,6, 1,8$ and $2,0$

Na rys. 2 przedstawiono prądy $I_w(v)$ zasilania czujnika przy zmieniających się prędkościach dla trzech współczynników nagrzania N . Widać, że krzywe są wyraźnie rozdzielone.

Na rys. 3 naniesiono wartości funkcji $F(v,N)$ dla tych samych współczynników nagrzania co na rys. 2. Krzywe wyraźnie zbliżyły się do siebie.

Przecięcie się funkcji $F(v,N)$ z wartością $F = 1$ wyznacza wartość v_k . Wynika to wyraźnie z rys. 4.

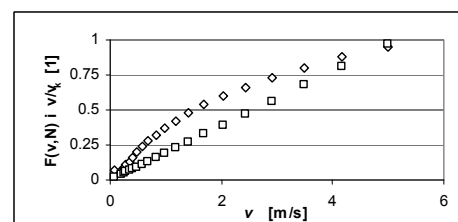
Na rys. 5 zamieszczono wykres $n(v, N = 1,8)$. Można zauważyć, że dla $v > 1,5$ wartości $n(v)$ zbliżają się do 0,5.



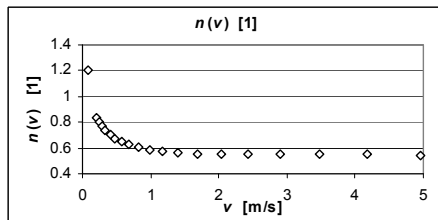
Rys. 3. Zależność funkcji $F(v, N)$ od prędkości
Fig. 3. Function $F(v, N)$ in dependence of the velocity

Tab. 2. Wyniki pomiarowe i obliczeniowe dla sondy przy $N = 1,8$
Tab. 2. Measurement and calculation results for the probe at $N = 1,8$

v	I(v)	F(v,N)	v/v _k	ln(F)	ln(v/v _k)	n(v)
m/s	mA	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]
0,08	42	0,0069	0,0162	-4,9761	-4,1209	1,2075
0,209	43,28	0,0688	0,0408	-2,6765	-3,1994	0,8365
0,247	43,68	0,0888	0,0481	-2,4215	-3,0335	0,7983
0,287	44,09	0,1091	0,0560	-2,2154	-2,8822	0,7687
0,339	44,59	0,1344	0,0661	-2,0066	-2,7160	0,7388
0,403	45,23	0,1674	0,0787	-1,7875	-2,5426	0,7030
0,480	45,91	0,2030	0,0936	-1,5947	-2,3682	0,6734
0,572	46,62	0,2401	0,1116	-1,4269	-2,1927	0,6508
0,684	47,40	0,2821	0,1333	-1,2656	-2,0149	0,6281
0,819	48,24	0,3280	0,1598	-1,1146	-1,8340	0,6077
0,981	49,13	0,3773	0,1913	-0,9748	-1,6537	0,5895
1,174	50,03	0,4281	0,2290	-0,8483	-1,4741	0,5755
1,408	50,96	0,4821	0,2745	-0,7295	-1,2929	0,5643
1,689	51,94	0,5393	0,3293	-0,6176	-1,1107	0,5560
2,028	52,95	0,6001	0,3955	-0,5107	-0,9276	0,5506
2,433	54,01	0,6647	0,4744	-0,4084	-0,7458	0,5476
2,905	55,09	0,7321	0,5665	-0,3118	-0,5682	0,5488
3,486	56,28	0,8076	0,6797	-0,2137	-0,3860	0,5535
4,175	57,60	0,8935	0,8142	-0,1126	-0,2055	0,5478
4,956	58,93	0,9815	0,9665	-0,0186	-0,0341	0,5462



Rys. 4. Zależność $F(v, N)$ i v/v_k od prędkości dla $N = 1,8$
Fig. 4. Dependence of $F(v, N)$ and v/v_k vs. velocity for $N = 1,8$



Rys. 5. Wartości wykładnika $n(v)$ od prędkości przepływu
 Fig. 5. The value of exponent $n(v)$ as a function of the flow velocity

3. Wnioski

1. Parametry równania (2) a to I_k^2 i $n(v)$ można kolejno dokładnie wyznaczyć na podstawie danych uzyskanych w procesie wzorcowania czujnika.
2. Uzyskane dane są jednoznaczne, czego nie można powiedzieć o stałych a , b i n wyznaczanych klasycznie.
3. Wykazano, że wykładnik $n(v)$ zmienia się z prędkością od wartości 2 (co wykazano w publikacjach [8 i 9] dla $v = 0$ do wartości około 0,5 dla większych prędkości.
4. Wykorzystując tabelę $n(v)$ można na drodze numerycznej dokonać linearyzacji wskazań anemometru.

4. Literatura

- [1] King L.V.: On the convection of heat cylinders in a stream of fluid: Determination of the convection constants of a small tungsten (platinum) wires with applications to hot-wire anemometry. Phil. Trans. Roy. Soc., London, A-214, 373-432, 1914.
- [2] Mc Adam W.H.: Heat transmission. McGraw-Hill Book Company Inc. 1954.
- [3] Andrews G.E., Bradley D., Hundy G.F.: Hot wire anemometer calibration for measurements of small gas velocities. Int. J. Heat Mass. Trans. 15,1765-86, 1972.
- [4] Strickert H.: Hitzdraht- und Hitzfilmanemometrie. VEB Verlag Technik, Berlin. DDR. S.263, 1973.
- [5] Ligęza P.: On unique parameters and unified formal form of hot-wire anemometric sensor model. Rev. Sci. Instrum., 76, 2005.
- [6] Kielbasa J.: Identification of coefficients describing constant-resistance anemometer. Arch. Min. Sci., vol. 56(2011), No 3, 499-505.
- [7] TSI Model 1129 Automated Air Velocity Calibrator – Instruction Manual. 2003.
- [8] Kielbasa J.: Measurement of gas flow velocity: anemometer with a vibrating hot wire. Rev. Sci. Instrum., A090785R, 2010.
- [9] Papierz K., Kielbasa J.: Methods of velocity measurement by the anemometer with a vibrating hot-wire. Arch. Min. Sci., vol. 56(2011), No 1, 93-118.

otrzymano / received: 29.08.2012

przyjęto do druku / accepted: 01.11.2012

artykuł recenzowany / revised paper

INFORMACJE

Informacje dla Autorów

Redakcja przyjmuje do publikacji tylko prace oryginalne, nie publikowane wcześniej w innych czasopismach. Redakcja nie zwraca materiałów nie zamówionych oraz zastrzega sobie prawo redagowania i skracania tekstów oraz streszczeń.

Artykuły naukowe publikowane w czasopiśmie PAK są formatowane jednolicie zgodnie z ustaloną formatką zamieszczoną na stronie redakcyjnej www.pak.info.pl. Dlatego artykuły przekazywane redakcji należy przygotowywać w edytorze Microsoft Word 2003 (w formacie DOC) z zachowaniem:

- wielkości czcionek,
- odstępów między wierszami tekstu,
- odstępów przed i po rysunkach, wzorach i tabelach,
- oznaczeń we wzorach, tabelach i na rysunkach zgodnych z oznaczeniami w tekście,
- układu poszczególnych elementów na stronie.

Osobno należy przygotować w pliku w formacie DOC notki biograficzne autorów o objętości nie przekraczającej 450 znaków, zawierające podstawowe dane charakteryzujące działalność naukową, tytuły naukowe i zawodowe, miejsce pracy i zajmowane stanowiska, informacje o uprawianej dziedzinie, adres e-mail oraz aktualne zdjęcie autora o rozmiarze 3,8 x 2,7 cm zapisane w skali odcieni szarości lub dołączone w osobnym pliku (w formacie TIF).

Wszystkie materiały:

- artykuł (w formacie DOC),
- notki biograficzne autorów (w formacie DOC),
- zdjęcia i rysunki (w formacie TIF lub CDR),

prosimy przesyłać w formie plików oraz dodatkowo jako wydruki na białym papierze (lub w formacie PDF) na adres e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl lub pocztą zwykłą, na adres: Redakcja Czasopisma Pomiary Automatyka Kontrola, Asystent Redaktora Naczelnego mgr Agnieszka Skórkowska, ul. Akademicka 10, p.21A, 44-100 Gliwice.

Wszystkie artykuły naukowe są dopuszczane do publikacji w czasopiśmie PAK po otrzymaniu pozytywnej recenzji. Autorzy materiałów nadesłanych do publikacji są odpowiedzialni za przestrzeganie prawa autorskiego. Zarówno treść pracy, jak i wykorzystane w niej ilustracje oraz tabele powinny stanowić dorobek własny Autora lub muszą być opisane zgodnie z zasadami cytowania, z powołaniem się na źródło cytatu.

Przedrukowywanie materiałów lub ich fragmentów wymaga pisemnej zgody redakcji. Redakcja ma prawo do korzystania z utworu, rozporządzania nim i udostępniania dowolną techniką, w tym też elektroniczną oraz ma prawo do rozpowszechniania go dowolnymi kanałami dystrybucyjnymi.