

## Nowy opis charakterystyk termoanemometrów stałorezystancyjnych

JAN KIELBASA, ANDRZEJ RACHALSKI

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

### Streszczenie

P. Ligęza [5] zaproponował nowe równanie opisujące pracę anemometru stałorezystancyjnego w formie przyjmuje postać

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

gdzie  $I_w(v)$  jest prądem zasilającym włókno anemometru,  $N = R_w/R_g$  jest współczynnikiem nagrzania włókna,  $R_w$  – rezystancją nagrzanego włókna,  $R_g$  – rezystancją włókna w temperaturze wzorcowania sondy, a  $v$  jest prędkością przepływającego medium. Stałe  $I_k^2$ ,  $v_k$  i  $n$ , powiązał z parametrami  $a$ ,  $b$  i  $n$  równania Kinga [1]

$$I_w^2 R_w = (a + b\sqrt{v})(R_w - R_g) \quad (ii)$$

Opracowanie to podaje inny sposób wyznaczania parametrów  $I_k^2$ ,  $v_k$  i  $n$ , które wylicza się niezależnie od siebie. Z równania (i) po przekształceniu otrzymuje się bezwymiarową postać

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

pozwalającą na wyznaczenie parametrów równania.

Pokazano, że parametry  $I_k^2$ ,  $v_k$  są zależne od średnicy grzanych włókien, a wykładnik  $n = n(v)$  dla  $v$  z zakresu 0 do 5 m/s jest monotonicznie malejącą funkcją prędkości przepływu oraz, że zależy on także od współczynnika nagrzania  $N$  i temperatury płynącego gazu.

**Słowa kluczowe:** anemometr cieplny, anemometr stałorezystancyjny, prawo Kinga

### 1. Wstęp

Praca anemometru cieplnego pracującego w systemie anemometru stałorezystancyjnego jest opisana równaniem Kinga [1], które wiąże moc dostarczaną do grzanego włókna z prędkością napływającego medium równaniem:

$$I_w^2 R_w = (a_0 + b_0\sqrt{v})(T_w - T_g) \quad (1)$$

gdzie  $I_w(v)$  oznacza prąd zasilania grzanego włókna,  $R_w$  rezystancję nagrzanego włókna,  $T_w$  temperaturę nagrzanego włókna a  $T_g$  temperaturę opływającego medium,  $a_0$  i  $b_0$  stałe, a  $v$  jest prędkością przepływającego medium.

Jeżeli anemometr z grzonym włóknem pracuje w systemie anemometru stałorezystancyjnego (tradycyjnie zwanego stałotemperaturowym co nie jest prawdą), w którym rezystancja nagrzanego włókna  $R_w$  jest utrzymywana na stałej ustawionej wartości to wykorzystując związki, że

$$R_w = R_0[1 + \gamma(T_w - T_0)] \quad (2)$$

oraz

$$R_g = R_0[1 + \gamma(T_g - T_0)] \quad (3)$$

otrzymuje się

$$T_w - T_g = \frac{R_w - R_g}{\gamma R_0} \quad (4)$$

Wstawiając (4) do (1) dostaje się

$$I_w^2 R_w = (a_0 + b_0 \sqrt{v}) \left( \frac{R_w - R_g}{\gamma R_0} \right) \quad (5)$$

i dalej

$$I_w^2 = (a + b\sqrt{v}) \left( 1 - \frac{1}{N} \right) \quad (6)$$

gdzie stałe  $a$ ,  $b$  i  $N$  są kolejno równe

$$a = \frac{a_0}{\gamma R_0} \quad (7)$$

i

$$b = \frac{b_0}{\gamma R_0} \quad (8)$$

$$N = \frac{R_w}{R_g} \quad (9)$$

przy czym  $\gamma$  jest temperaturowym współczynnikiem rezystancji włókna  $R_0$  wyznaczonym w temperaturze odniesienia  $T_0$ . Parametr  $N$  zwie się współczynnikiem nagrzania włókna.

W praktyce liczni autorzy przyjmują, że zależność (6) nie jest pierwiastkowa lecz potęgowa a wykładnik potęgowy  $n$  różnie autorzy podają. Wg Strickerta [2] jest zawarty w przedziale 0.4-0.6 a nawet dla bardzo małych prędkości [6-9] jest równy 2. Jest on wyznaczany w procesie wzorcowania.

W przypadku, gdy anemometr pracuje w systemie stałorezystancyjnym ( $R_w = \text{const}$ ) równanie (6) daje się sprowadzić do bardziej ogólnej zależności

$$I_w^2(v) = (a + bv^n) \left( 1 - \frac{1}{N} \right) \quad (10)$$

Występujący tu parametr  $a$  jest równy kwadratowi prądu zasilania włókna w warunkach  $N$  przy zerowej prędkości  $v$ . Pewną trudność w tym równaniu sprawia interpretacja fizyczna współczynnika  $b$ , gdyż w zależności od wartości wykładnika  $n$  jego wymiar musi ulegać zmianie, a to jest trudne do zaakceptowania. Stąd pojawiają się próby nieco innego opisu, który by tych kłopotów interpretacyjnych nie powodował.

## 2. Propozycja opisu wg P. Ligęzy

Paweł Ligęza zaproponował nową postać równania opisującego pracę anemometru stałorezystancyjnego w formie [4-5]

$$I_w^2(v) = I_k^2 \left( 1 - \frac{1}{N} \right) \left[ 1 + \left( \frac{v}{v_k} \right)^n \right] \quad (11)$$

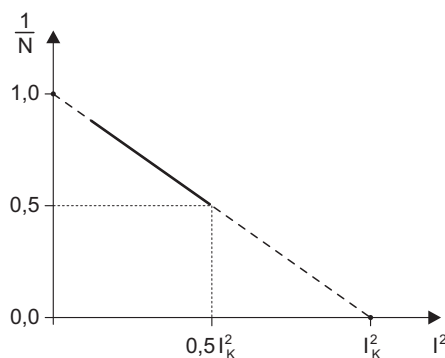
gdzie stałe  $I_k$  i  $v_k$  wiążą się ze stałymi z równania (10) następującymi zależnościami

$$I_k = \sqrt{a} \quad (12)$$

oraz

$$v_k = \left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (13)$$

a  $n$  pozostaje to samo. Parametr  $I_k$  ma wymiar prądu i teoretycznie jest równy prądowi, gdy  $v = 0$  i  $R_w \rightarrow \infty$  czyli  $\frac{1}{N} \rightarrow 0$ . Tę sytuację ilustruje Rys. 1.



Rys. 1. Graficzne wyznaczenie  $I_k^2$

W praktyce tok postępowania jest następujący: dla  $v = 0$  i określonego  $N$  z równania (11) dostajemy

$$I_k^2 = \frac{N}{N-1} I_w^2 \quad (14)$$

a w szczególności gdy  $N = 2$  mamy

$$I_k^2 = 2I_w^2 \quad (15)$$

Równanie (15) pozwala w praktyce wyznaczyć  $I_k^2$  bez obawy przepalenia włókna.

Natomiast  $v_k$  jest pewną hipotetyczną prędkością normująca, której interpretację poda się niżej. Pewną trudność stanowi fakt, że wzory (10 i 11) nie opisują dokładnie charakterystyki prądowej anemometru od prędkości przepływu ale tylko jej część dla  $v \geq v_{\min}$ . Stąd wyjściowa interpretacja, że  $I_k$  jest prądem zasilania czujnika dla  $v = 0$  jest błędna.

Wzór (11) możemy także zapisać w formie bezwymiarowej jako

$$\frac{N}{N-1} \frac{I_w^2}{I_k^2} - 1 = \left(\frac{v}{v_k}\right)^n \quad (16)$$

w którym zmienne są rozdzielone. Zauważmy, że dla  $v = v_k$  wartość ułamka  $\left(\frac{v}{v_k}\right)^n = 1$  niezależnie od wartości wykładnika  $n$  i wówczas

$$I_w^2 = 2I_k^2 \left(\frac{N-1}{N}\right) \quad (17)$$

co dla  $N = 2$  daje

$$I_w^2 = I_k^2 \quad (18)$$

Równocześnie oznacza to, że jeżeli dla pewnego  $v$  spełniona jest równość (17) to  $v_k = v$ . Jeżeli wzorujemy czujnik a wartość  $I_k$  jest już znana zadajemy określoną prędkość  $v$  przepływu i odczytujemy prąd  $I_w$ , jaki płynie przez czujnik przy zadanym współczynniku nagrzania  $N$ . Jeśli ten prąd  $I_w$  będzie równy wyznaczonemu z równania (17) to prędkość  $v_k$  jest równa tej zadawanej prędkości  $v$ .

### 3. Wyznaczenie zależności $n(v)$

Zależność (16) jest równaniem nieliniowym o rozdzielonych zmiennych. Lewa strona zawiera dane prądowe a prawa prędkościowe. Wprowadzając nową funkcję

$$F(v, N) = \frac{N}{N-1} \frac{I_w^2(v)}{I_k^2} - 1 \quad (19)$$

badamy kiedy  $F(v, N) = 1$  dla danego  $N$ . Jeśli ta równość zachodzi tzn, że

$$v_k = v \quad (20)$$

Wykorzystując (16) i (19) dostaje się

$$F(v, N) = \left(\frac{v}{v_k}\right)^n \quad (21)$$

Logarytmując obustronnie równanie (21) uzyskuje się

$$\ln[F(v, N)] = n \ln\left(\frac{v}{v_k}\right) \quad (21)$$

a stąd

$$n = \frac{\ln[F(v, N)]}{\ln\left(\frac{v}{v_k}\right)} \quad (22)$$

Znając z eksperymentu dane  $v_i$  i  $I_w(v_i)$  znajdujemy wartości  $n(v_i)$ . Mając wspomniane wielkości wyznaczamy np.  $v$  gdy w danych warunkach znamy prąd zasilania czujnika  $I_w$

$$v = v_k [F(v, N)]^{\frac{1}{n(v)}} = v_k [F(v, N)]^{m(I_w)} \quad (23)$$

gdzie

$$m(I_w) = \frac{1}{n(v)}$$

lub  $I_w$  gdy interesuje nas prąd zasilania czujnika przy znanej prędkości  $v$

$$I_w = I_k \left\{ \left(1 - \frac{1}{N}\right) \left[1 + \left(\frac{v}{v_k}\right)^n\right] \right\}^{0.5} \quad (24)$$

### 3. Opis eksperymentu

Do badań wykorzystano dwa czujniki termoanemometryczne wykonane z włókna wolframowego o średnicy 5  $\mu\text{m}$  i długości 2 mm Czujnik wzorcowano na stanowisku firmy TSI [3] model 1129. Czujnik był umocowany w uchwycie pionowo w ten sposób, że włókno było poziome a napływ powietrza na włókno był pionowo w górę.

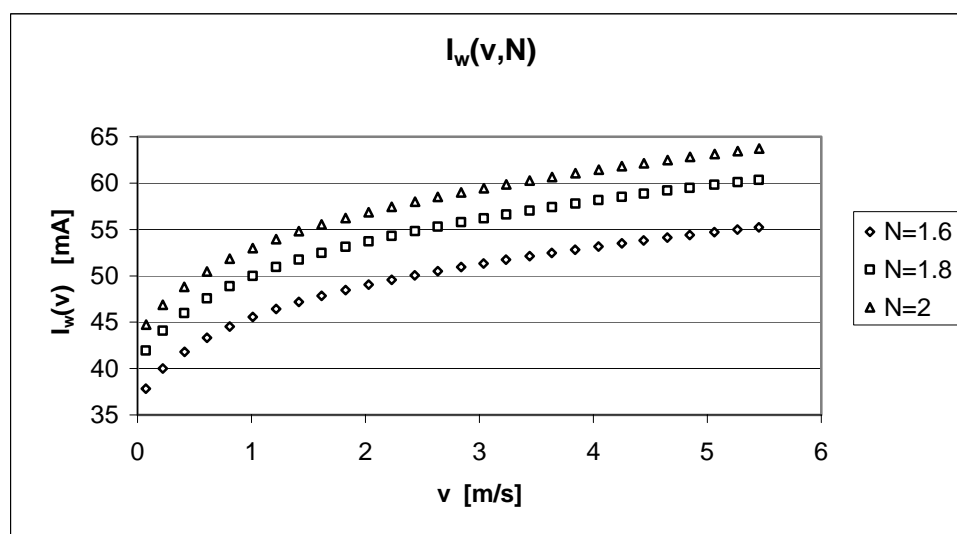
Czujnik był zasilany z układu elektronicznego realizującego anemometr stałorezystancyjny co oznacza, że układ elektroniczny zasiliał włókno czujnika takim prądem, że zachowywało ono stałą nastawioną rezystancję niezależnie od prędkości opływającego go medium. Temperatura powietrza w pomieszczeniu była klimatyzowana i wynosiła 23°C z dokładnością do 0.5°. Rezystancja włókna „na zimno” wynosiła  $R_0 = 2.49 \Omega$  Zmierzono w warunkach bezprzepływowych ( $v = 0$ ) prąd zasilania sondy  $I_0$  dla współczynnika nagrzania  $N=2$ , który był równy 63.849 mA, stąd  $I_0^2 = 4080 \text{ mA}$  [2].

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

Tab. 1. Tabela 2 dla  $N = 1.8$ 

N=1.6		N=1.8		N=2.0		$v$	$I(v)$	$F(I(v))$	$v/v_k$	$\ln(F)$	$\ln(v/v_k)$	$n(v)$
$v$ [m/s]	$I(v)$ [mA]	$v$ [m/s]	$I(v)$ [mA]	$v$ [m/s]	$I(v)$ [mA]	m/s	mA	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]
0	0	0.0832	42.005	0.083	44.321	0.083	42	0.0069	0.0162	-4.9761	-4.1209	1.2075
0.2137	39.573	0.2092	43.277	0.2098	46.186	0.209	43.28	0.0688	0.0408	-2.6765	-3.1994	0.8365
0.246	39.966	0.2469	43.679	0.2463	46.654	0.247	43.68	0.0888	0.0481	-2.4215	-3.0335	0.7983
0.2876	40.372	0.2872	44.085	0.2875	47.049	0.287	44.09	0.1091	0.0560	-2.2154	-2.8822	0.7687
0.3389	40.801	0.3392	44.586	0.3391	47.598	0.339	44.59	0.1344	0.0661	-2.0066	-2.7160	0.7388
0.4036	41.416	0.4034	45.228	0.4035	48.265	0.403	45.23	0.1674	0.0787	-1.7875	-2.5426	0.7030
0.4801	42.031	0.4802	45.913	0.4807	48.944	0.480	45.91	0.2030	0.0936	-1.5947	-2.3682	0.6734
0.5722	42.711	0.5724	46.615	0.5724	49.71	0.572	46.62	0.2401	0.1116	-1.4269	-2.1927	0.6508
0.6844	43.459	0.6838	47.398	0.6839	50.498	0.684	47.40	0.2821	0.1333	-1.2656	-2.0149	0.6281
0.8196	44.242	0.8193	48.241	0.8194	51.375	0.819	48.24	0.3280	0.1598	-1.1146	-1.8340	0.6077
0.9814	45.052	0.9812	49.126	0.9814	52.294	0.981	49.13	0.3773	0.1913	-0.9748	-1.6537	0.5895
1.1741	45.899	1.1742	50.025	1.1743	53.235	1.174	50.03	0.4281	0.2290	-0.8483	-1.4741	0.5755
1.4075	46.777	1.4076	50.962	1.4077	54.205	1.408	50.96	0.4821	0.2745	-0.7295	-1.2929	0.5643
1.6887	47.676	1.6888	51.935	1.6889	55.23	1.689	51.94	0.5393	0.3293	-0.6176	-1.1107	0.5560
2.027	48.614	2.0282	52.951	2.0284	56.274	2.028	52.95	0.6001	0.3955	-0.5107	-0.9276	0.5506
2.4313	49.614	2.4326	54.011	2.4328	57.39	2.433	54.01	0.6647	0.4744	-0.4084	-0.7458	0.5476
2.9043	50.642	2.9052	55.092	2.9056	58.525	2.905	55.09	0.7321	0.5665	-0.3118	-0.5682	0.5488
3.4844	51.741	3.4857	56.28	3.4863	59.75	3.486	56.28	0.8076	0.6797	-0.2137	-0.3860	0.5535
4.1742	52.929	4.1755	57.603	4.1759	61.048	4.175	57.60	0.8935	0.8142	-0.1126	-0.2055	0.5478
5.0039	54.164	4.956	58.926	5.0058	62.43	4.956	58.93	0.9815	0.9665	-0.0186	-0.0341	0.5462

W tabeli 2 zawarto wyniki obliczeń z danych pomiarowych uzyskanych dla współczynnika  $N = 1.8$ . Na Rys. 2 przedstawiono prądy  $I(v)$  zasilania czujnika przy zmieniających się  $v$  dla trzech współczynników nagrzania  $N$ .

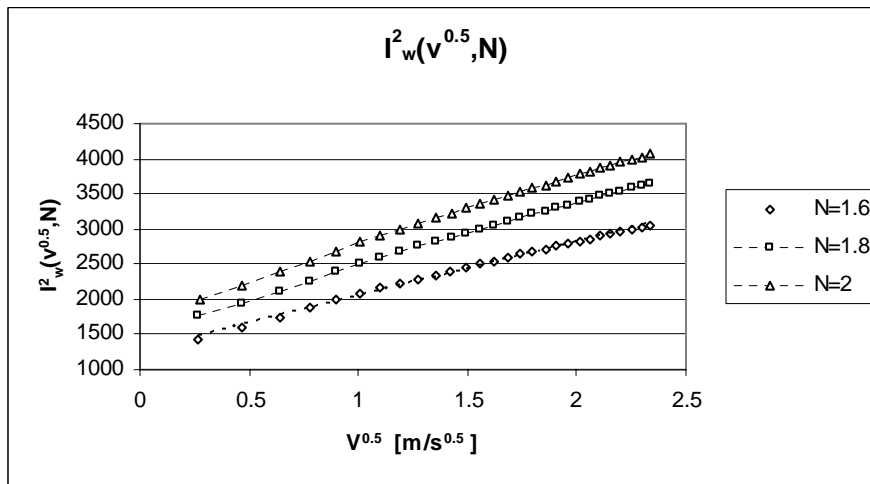
Rys. 2. Krzywe wzorcowania czujnika anemometrycznego W-5  $\mu\text{m}$  dla trzech współczynników nagrzania

Z danych zawartych w tabeli 2 wyliczono  $v^n$  (dla  $n = 0.5$  o czym będzie poniżej) oraz  $I_w^2(v)$  a uzyskane rezultaty przedstawiono na wykresie Rys. 3. Krzywe się nieco zlinearyzowały ale jednak są dość odległe od prostych o czym najlepiej świadczą parametry prostych aproksymujących wyniki pomiarowo-obliczeniowe.

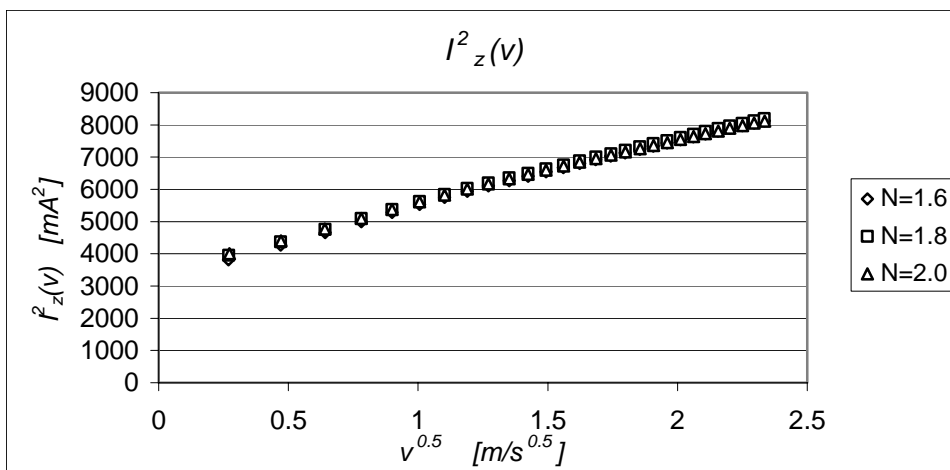
Na następnym rysunku (Rys. 4) przedstawiono zmodyfikowane krzywe, realizujące równanie

$$I_z^2(v) = a + bv^{0.5} = \frac{N}{N-1} I^2(v) \quad (26)$$

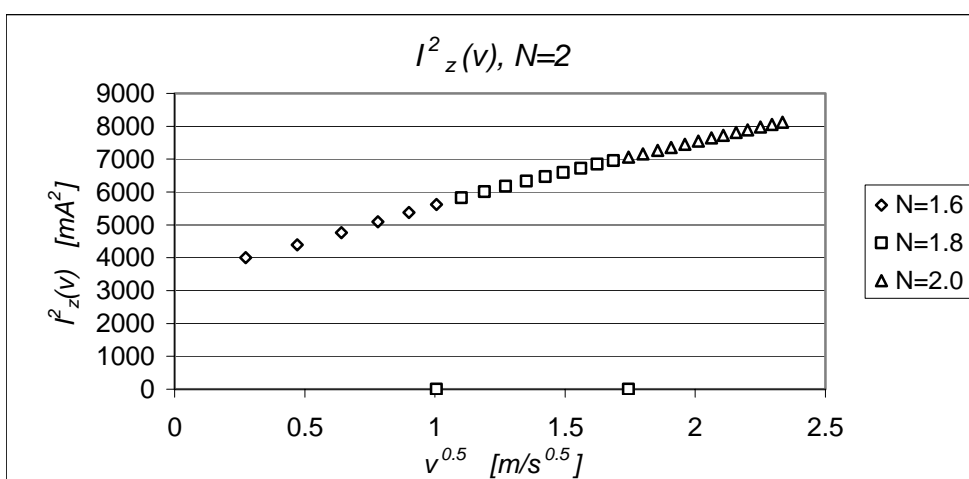
uzyskane bezpośrednio z równania (6). Widzimy, że krzywe Kinga zsunęły się i prawie nachodzą na siebie. Świadczy to, że równanie (26) dobrze opisuje straty cieplne od prędkości przepływu.



Rys. 3. Wyniki wzorcowania sond w układzie współrzędnych Kinga dla trzech różnych współczynników nagrzania



Rys. 4. Znormalizowane krzywe Kinga (wg równania 26)

Rys. 5. Dane dla  $N=2$  podzielone na trzy grupy w zależności od  $v$ 

Otwartą sprawą pozostaje wyznaczenie parametrów  $a$  i  $b$  równania (26). Problem zilustruje na przykładzie krzywej z rysunku 3 dla  $N=2$ . Krzywą podzielono na 3 części i w każdej wpisano prostą o równaniu  $I^2(v) = a + bv^{0.5}$ , której parametry zmieszczone są w tabeli 3. Różnice w parametrach poszczególnych odcinków są nazbyt widoczne. To samo mamy gdy analizuje się wyniki uzyskane dla  $N=1.8$  czy  $N=1.6$ .

Tab. 3.

Zakres pierwiastka z prędkości	$a$	$b$	$R^2$
$0 < v^{0.5} < 1.0$	3372.2	2216.6	0.9988
$1.05 < v^{0.5} < 1.70$	3699.2	1939.1	0.9996
$1.72 < v^{0.5} < 2.5$	3936.9	1794.6	0.9999

Tę sytuację próbowano ratować przyjmując do opisu zmodyfikowane równanie (10) dla  $n$  różnego od 0.5. I tu pojawiła się nowa trudność, gdyż równanie (10) przestało być wymiarowo jednorodne. Parametr  $a$  ma wymiar kwadratu prądu, parametr  $b$  w równaniu (6) jest też jednoznaczny, gdyż  $bv^{0.5}$  ma wymiar kwadratu prądu, natomiast  $b$  w równaniu (10) jest nieokreślone. Drugą kwestią jest jak wyznaczyć jednoznacznie  $b$  i  $n$  z danych pomiarowych. Równanie

$$c = bv^n$$

gdzie  $v$  jest stałą nie ma jednoznacznego rozwiązania na  $b$  i  $n$ . Logarytmując to równanie mamy

$$\ln(c) = \ln(b) + n \ln(v)$$

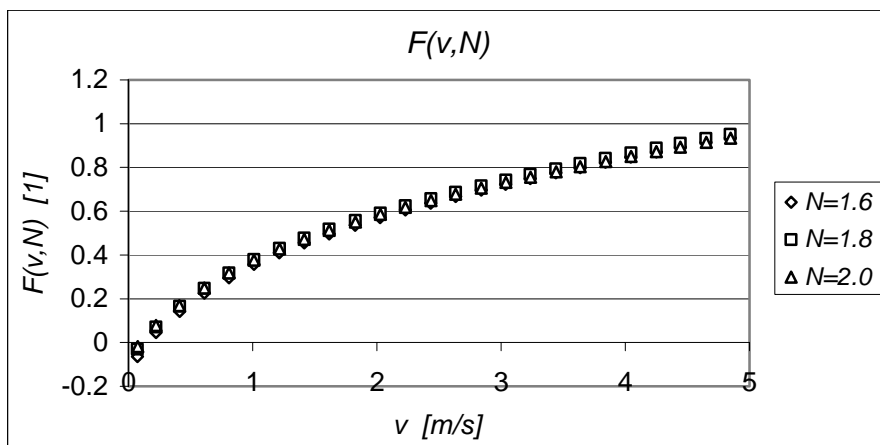
Gdy  $\ln(c)$  i  $\ln(v)$  są stałe to ostatnie równanie ma nieskończenie wiele rozwiązań.

Po takim materiale wprowadzającym przejdzie się do równania (19)

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

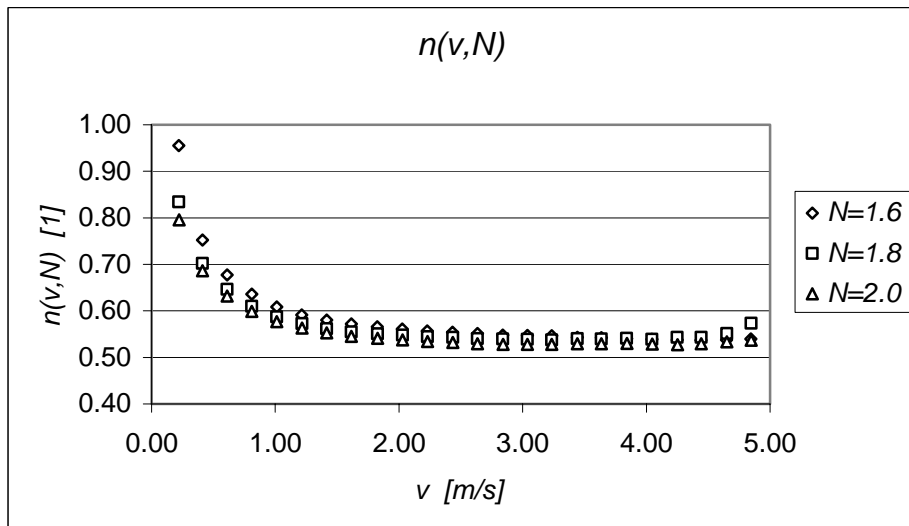
które ilustruje Rys. 6. Widać, że krzywe dla różnych  $N$  niewiele różnią się od siebie.

Dla każdej z serii danych zamieszczonych w tabeli 1 czyli dla każdego  $N$  liczono  $F(v, N)$  wg zależności (19). Następnie w 5 ostatnich punktów pomiarowych wpisywano prostą i tym sposobem na przecięciu tej prostej z prostą  $F(v, N) = 1$  wyznaczano prędkość normująca  $v_k$ . Mając  $v_k$  liczono  $v/v_k$  i dalej  $\ln(F(v, N))$  oraz  $\ln(v/v_k)$  a w końcu  $n(v)$



Rys. 6. Przebieg funkcji  $F(v, N)$  dla różnych  $N$  od prędkości przepływu. Tu dla  $N = 2$ ,  $I_k^2 = 4080 \text{ mA}^2$ , a  $v_k = 5.346 \text{ m/s}$

Z danych zawartych w tabeli 2 liczymy stosunek logarytmu  $F(v)$  do logarytmu  $(v/v_k)$ . Uzyskane punkty, pokazano na Rys.7. Dla małych prędkości rzędu 0-1.5 m/s punkty mocno opadają od wartości rzędu jeden do 0.55 a dalej osiągają poziom 0.54-0.52. Widać zatem, że powszechne przyjmowanie wartości  $n = 0.5$  jest nieuzasadnione. Zauważa się też zależność  $n(N)$  zwłaszcza dla  $v < 1.5 \text{ m/s}$  jest mocno nieliniowa. Warto też przypomnieć, że dla  $v = 0$  funkcja opisująca straty ciepłe włókna jest parabolą a więc wówczas  $n = 2$ .



Rys. 7. Zależność współczynnika  $n(v, N)$  od prędkości przepływu  $v$  i współczynnika  $N$

### 3. Ocena niepewności wyznaczenia $I_k^2$ , $v_k$ i $n(v)$

Niepewność pomiaru  $\Delta(I_k^2) = 2I_k\Delta I_k$  wyliczamy bezpośrednio z podanego wzoru. Tu  $I_k$  dla  $v = 0$  i  $N = 2$  wynosiło 64.10 mA a mierzono go z dokładnością  $\Delta I_k = 0.001$  mA.

Zatem  $\Delta(I_k^2) = 2I_k\Delta I_k = 128.20 \times 0.001 = 0.128$  mA [2], stąd  $I_k^2 = 4080 \pm 0.1282$  mA [2] a niepewność względna wyznaczenia  $I_k^2$  wynosi 0.00312%.

Niepewność pomiaru  $\Delta v_k$  wyznacza się z równania (16) przy założeniu że  $n(v) = 1$ . Mamy wówczas

$$v_k = \frac{v}{F(v, N)}$$

Dla  $F(v, N) = 1$  mamy, że  $v_k = v$ , a stąd  $\Delta v_k = \Delta v$ . Bezwzględną niedokładność pomiaru  $v$  można wg tabeli 2 ocenić na 0.01 m/s. Stąd maksymalny błąd względny pomiaru prędkości będzie wynosił

$$\frac{0.01}{9.049} \times 100 = 0.11\%$$

Ocenę niepewności  $n$  przeprowadzi się w oparciu o zależność (22). Dla ustalonego  $N$  mamy więc

$$|\Delta n| = \left| \frac{\Delta F}{F} \ln\left(\frac{v}{v_k}\right) \right| + \left| \ln[F(v)] \left( \frac{\Delta v}{v} + \frac{\Delta v_k}{v_k} \right) \right|$$

Korzystając z tabeli 2 mamy  $F(v) = 0.98$ ,  $\Delta F = 0.05$ ,  $v = 4.956$  m/s,  $\Delta v = 0.05$  m/s,  $v_k = 5.346$  m/s,  $\Delta v_k = 0.05$  m/s i stąd

$$\frac{\Delta n(v)}{n(v)} \times 100\% = 1.60\%$$

### 4. Wnioski

1. Parametry równania (4) a to  $I_k^2$ ,  $v_k$  i  $n(v)$  można kolejno dokładnie wyznaczyć w oparciu o dane powstałe w procesie wzorcowania czujnika.
2. Uzyskane dane są jednoznaczne czego nie można powiedzieć o stałych  $a$ ,  $b$  i  $n$  wyznaczanych klasycznie w równaniach (3) i (4).
3. Wykazano, że wykładnik  $n(v)$  zmienia się z prędkością od wartości 2 [7-9] dla  $v = 0$  do wartości około 0.5 dla większych prędkości.



4. Wykorzystując 8-mą kolumnę tabeli  $m(I_w)$  można na drodze numerycznej dokonać linearyzacji wskaźników anemometru.
5. Niepewność wyznaczenia parametrów  $I_k^2, v$  i  $n$  jest dużo mniejsza niż w klasycznej metodzie.

Praca została wykonana w roku 2012 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## 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. Transs. Roy. Soc., London, A-214, 373-432, 1914.
- [2] Strickert H. *Hitzdraht- und Hitzfilmanemometrie*. VEB Verlag Technik, Berlin. DDR. S. 263, 1973.
- [3] TSI Model 1129 Automated Air Velocity Calibrator – Instruction Manual. 2003.
- [4] Ligęza P. *On unique parameters and unified formal form of hot-wire anemometric sensor model*. Rev. Sci. Instrum., 76, 2005.
- [5] Ligęza P. *Anemometr stalopasmowy*. Mat. IX Ogólnopolskiego Sympozjum „Zastosowanie Mechaniki płynów w Inżynierii i Ochronie Środowiska – 2007”. Gliwice-Wisła 2007, 153-162.
- [6] DISA Information , Nr 7, pp. 32-35, 1969.
- [7] Kielbasa J. *Measurement of gas flow velocity: anemometer with a vibrating hot wire*. Rev. Sci. Instrum., A090785R , 2010
- [8] Papierz K., Kielbasa J. *Methods of velocity measurement by the anemometer with a vibrating hot-wire*. Arch. Min. Sci., Vol. 56(2011), No 1, p. 93-118.
- [9] Kielbasa J. *Identification of coefficients describing constant-resistance anemometer*. Arch. Min. Sci., Vol. 56(2011), No 3, p. 499-505.

## New description of characteristics of constant-temperature thermo-anemometers

### Abstract

Paweł Ligęza derived a new equation governing the operation of constant-resistance anemometers, given as:

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

where  $I(v)$  is the current supplying the anemometer wire,  $N = R_w/R_g$  – wire overheating ratio,  $R_w$  – resistance of a hot wire,  $R_g$  – wire resistance at the calibration temperature,  $v$  – velocity of the flowing medium. The constants  $I_k^2$ ,  $v_k$ ,  $n$  are related to the parameters  $a$ ,  $b$ ,  $n$  in the King equation:

$$I_w^2 R_w = (a + b\sqrt{v})(R_w - R_g) \quad (ii)$$

This study suggests a different approach to finding the parameters  $I_k^2$ ,  $v_k$ ,  $n$  which are to be computed independently. Rearranging Eq (i) yields a dimensionless equation:

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

and the relevant parameters can be determined accordingly.

It is demonstrated that parameters  $I_k^2$ ,  $v_k$  are dependent on the hot wire diameter and that the exponent  $n = n(v)$  for  $v$  in the range 0-5 m/s is a monotonically decreasing function of flow velocity and is associated with the overheating ratio  $N$  and the temperature of the flowing gas.

**Keywords:** thermal anemometer, constant-resistance anemometer, King law