

# Zwiększenie zdolności pomiarowych Laboratorium Wzorcującego Wentylacyjne Przyrządy Pomiarowe

WŁADYSŁAW CIERNIAK, ANDRZEJ KRACH, ROBERT NOWAK

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

## Streszczenie

W artykule zostały omówione prace podjęte w celu poprawy jakości wzorcowania przyrządów do pomiaru prędkości powietrza, różnicy ciśnień i temperatury. Do pomiarów małych różnic ciśnień potrzebny jest precyzyjny zadajnik, który jest obecnie konstruowany. W artykule znajduje się opis prac konstrukcyjnych. Tunel aerodynamiczny służący do wzorcowania anemometrów wymaga wywzorcowania w zakresie prędkości ( $0 \div 0,4$ ) m/s. W artykule jest opisana metodyka i stanowisko służące do wzorcowania. Do kontroli przyrządów służących za wzorce temperatury stosowane są przyrządy wykorzystujące przemiany fazowe bardzo czystych składników. Jedną z wykorzystywanych do tego celu przemian jest punkt wrzenia wody. W artykule jest opisane zbudowane urządzenie (ewaporometr) służące do odtwarzania tego punktu.

**Słowa kluczowe:** metrologia, mechanika płynów

## 1. Wstęp

W laboratorium Wzorcującym Wentylacyjne Przyrządy Pomiarowe IMG PAN są wzorcowane przyrządy do pomiaru prędkości powietrza, ciśnienia absolutnego, różnicy ciśnień, temperatury i wilgotności względnej. Wzorcowanie anemometrów i ciśnieniomierzy jest objęte akredytacją Polskiego Centrum Akredytacji.

Akredytacja tunelu aktualnie obejmuje zakres prędkości od 0.4 m/s do 40 m/s. Podczas ostatniej oceny w nadzorze, dokonanej przez auditorów PCA, okazało się, że zakres od 0 do 0.4 m/s nie jest wywzorcowany i chociaż wzorcowanie anemometru kontrolnego w naszym laboratorium i w laboratorium *National Institute of Standards and Technology* wykazało zgodność w zakresie oszacowanej niepewności pomiaru to jednak Polskie Centrum Akredytacji cofnęło akredytację w tym zakresie. Z tego powodu podjęto pracę nad opracowaniem metody i zbudowaniem odpowiedniego urządzenia, co jest opisane w rozdziale 2. Starania o anemometr wywzorcowany w zakresie pomiarowym ( $0 \div 0,4$ ) m/s w laboratorium akredytowanym nie dały rezultatu.

Akredytacja stanowiska do wzorcowania różnic ciśnień obejmuje zakres pomiarowy ( $0 \div 200$ ) kPa z przyrządami wzorcowymi o zakresach ( $0 \div 5$ ) kPa, ( $0 \div 7.5$ ) kPa, ( $0 \div 20$ ) kPa i ( $0 \div 200$ ) kPa. Akredytacja stanowiska do wzorcowania ciśnienia absolutnego obejmuje zakres pomiarowy ( $200 \div 1310$ ) kPa.

Wzorcowania przyrządów w zakresie małych różnic ciśnień wymaga odseparowania układu pomiarowego od ciśnienia atmosferycznego ze względu na ciągłe wahania tego ciśnienia, które uniemożliwiają wzorcowanie. Stosowane dotychczas sposoby wzorcowania pozwalały uzyskać niepewność wzorcowania 1.9 Pa, przy posiadaniu przyrządów wzorcowych o niepewności 0.1 do 0.2 Pa. Aby zmniejszyć niepewność wzorcowania podjęto pracę nad skonstruowaniem precyzyjnego zadajnika małych różnic ciśnień opisane w rozdziale 4.

Akredytacja nie obejmuje wzorcowania termometrów i wilgotnościomierzy. Wyposażenie pomiarowe laboratorium pozwala wzorcować termometry w zakresie ( $-25 \div 140$ )°C i wilgotnościomierze z małymi sondami pojemnościowymi w zakresie ( $6 \div 95$ )% RH. Problemy związane z wzorcowaniem termometrów i wilgotnościomierzy zostały opisane w rozdziałach 5 i 6.

## 2. Wzorcowanie tunelu aerodynamicznego

W artykule [Kiełbasa, 2010] są pokazane przebiegi napięcia wyjściowego z termoanemometru z sinusoidalnie drgającym włóknem. Dla średniej prędkości ruchu włókna równej prędkości powietrza napięcie wyjściowe termoanemometru nie zawiera pierwszej harmonicznej częstotliwości drgań włókna. Jeśli w tunelu aerodynamicznym umieścić taki termoanemometr poruszany z jednostajną znaną prędkością, to gdy ta prędkość będzie równa prędkości powietrza, z sygnału wyjściowego termoanemometru zniknie pierwsza harmoniczna. Pozwala to skonstruować urządzenie do wzorcowania tunelu dla bardzo małych prędkości.

Dla dobrania odpowiedniego włókna zostanie przeprowadzona analiza z zastosowaniem wyników wzorcowania termoanemometru stałotemperaturowego z włóknami o różnych grubościach.

W pracy [Cierniak, 1993] charakterystyki termoanemometru stałotemperaturowego w zakresie od zera do około 40 m/s zostały aproksymowane funkcją:

$$\frac{W}{W-1} I^2 = \frac{\left[ a + b(v_0^{22} + v)^n \right]^{1.5}}{\left[ a + b(v_0^2 + v^2)^n \right]^{0.5} - C} \quad (1)$$

gdzie:

- $a, b, C, n, v_0$  – wielkości wyznaczone z aproksymacji charakterystyki termoanemometru,
- $I$  – prąd płynący przez włókno,
- $W$  – współczynnik nagrzania włókna.

Napięcie zasilające mostek termoanemometru opisuje wzór:

$$U = I(R_{w0}W + R + R_p) \quad (2)$$

gdzie:

- $R$  – rezystancja opornika szeregowo połączona z włóknem termoanemometru,
- $R_p$  – rezystancja przewodów łączących włókno z mostkiem termoanemometru,
- $R_{w0}$  – rezystancja włókna termoanemometru w temperaturze płynącego gazu,
- $U$  – napięcie zasilające mostek termoanemometru.

W pewnych przypadkach, gdy wokół włókna przez czas rzędu kilkudziesięciu sekund brak fluktuacji prędkości gazu, rozwija się konwekcja swobodna i dla prędkości rzędu centymetra na sekundę i mniejszych prąd płynący przez włókno jest nieco większy niż wynikający ze wzoru (1). W omawianym tutaj przypadku z założenia występują fluktuacje prędkości i można wzór (1) stosować.

W tabeli (1) zostały zebrane parametry kilku włókien dla temperatury odniesienia 20°C.

Tab. 1. Parametry włókien

Lp.	$d$	$l$	$R_{w0}$	$R_p$	$W$	$a$	$b$	$C$	$n$	$v_0$
1	3	1.488	7.500	0.670	1.326	0.00075821	0.00091036	0.007093	0.19247	0.19407
2	5	5.078	18.13	0.643	1.308	0.0019828	0.0023456	1.78e-6	0.21313	0.05334
3	8	5.090	7.550	0.475	1.320	0.0051157	0.0066846	0.7e-6	0.21514	0.032957

Wartość rezystancji szeregowego opornika we wszystkich przypadkach wynosiła 5.664 Ω.

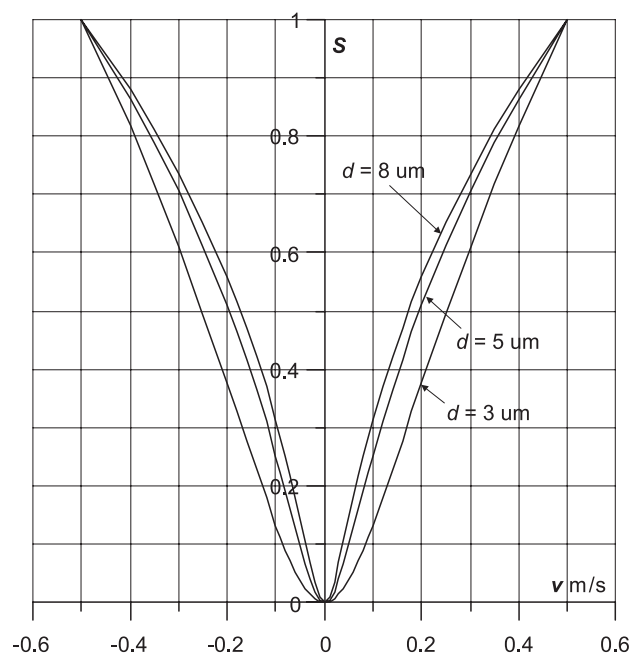
Znormalizowane charakterystyki w zakresie prędkości od -0.5 m.s do 0.5 ms zostały pokazane na Rys. 1. Normalizacja polegała na obliczeniu wyrażenia:

$$S = \frac{U(v) - U(0)}{U(v=0.5) - U(0)} \quad (3)$$

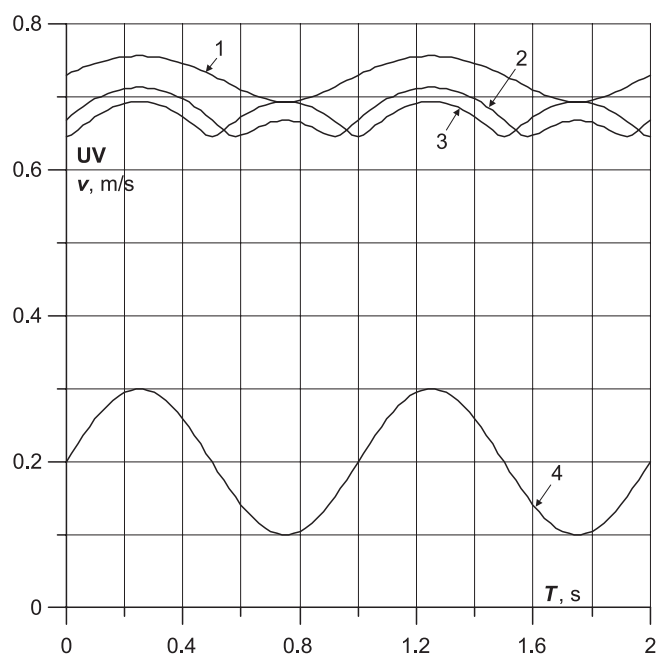
Jak widać dla małych dla małych prędkości najkorzystniejsze jest włókno o grubości 8μ.

Na Rys. 2. zostały pokazane przebiegi napięć wyjściowych dla różnych przebiegów prędkości powietrza, wyliczone dla włókna o grubości 8μ. Wykres numer (4) pokazuje prędkość opisaną wzorem:

$$v = 0.2 + 0.1 \sin(2\pi t) \quad (4)$$



Rys. 1. Względne charakterystyki anemometru stałotemperaturowego dla różnych włókien



Rys. 2. Wykresy napięć wyjściowych termocouple z włóknem o grubości 8μ oraz wykres prędkości powietrza opisany wzorem (4)

Wykres numer (1) pokazuje napięcia wyjściowe termocouple dla prędkości opisanej powyższym wzorem. Wykres numer (2) pokazuje napięcia dla prędkości opisanej wzorem:

$$v = 0.5 + 0.1 \sin(2\pi t) \quad (5)$$

Wykres numer (3) pokazuje napięcia wyjściowe dla prędkości opisanej wzorem

$$v = 0.1 \sin(2\pi t) \quad (6)$$

Cechą wyróżniającą przypadek gdy średnia prędkość ruchu włókna termooanemometru jest równa zero jest brak składowej o częstotliwości równej częstotliwości zmian prędkości ruchu oscylacyjnego włókna. Daje to możliwość dokładnego wyznaczenia wyznaczania prędkości powietrza w tunelu przez pomiar średniej prędkości ruchu czujnika termooanemometru.

### 3. Stanowisko do wzorcowania tunelu aerodynamicznego w zakresie małych prędkości powietrza

Prędkość powietrza w komorze pomiarowej tunelu aerodynamicznego w LWWPP w zakresie  $(0,1 \div 1,5)$  m/s jest mierzona pośrednio, poprzez pomiar różnicy ciśnień na wielootworowej kryzie pomiarowej, umieszczonej za komorą pomiarową tunelu. Różnicę ciśnień na kryzie mierzy mikromanometr hydrostatyczny BETZ „DLR” o zakresie pomiarowym:  $(-0,5 \div 39,3)$  mbar. Dodatkowymi wielkościami mierzonymi, koniecznymi do wyznaczenia gęstości powietrza są temperatury powietrza (wilgotna i sucha), mierzone psychrometrem Assmanna oraz ciśnienie barometryczne, mierzone elektronicznym barometrem cyfrowym  $\mu$ BAR. Wartości różnicy ciśnień na kryzie, temperatur, ciśnienia barometrycznego i prędkości wskazywanej przez wzorcowany anemometr wprowadzane są do programu komputerowego, obliczającego prędkość powietrza w komorze pomiarowej tunelu i drukującego świadectwa wzorcowania.

Kryza wielootworowa, zaprojektowana przez W. Trutwina, została wywzorcowana w zakresie prędkości od 0,4 m/s [Trutwin, Chmiel, Socha, 1984]. Dlatego dolna granica zakresu pomiarowego akredytowanego przez PCA jest równa 0,4 m/s. Aby otrzymać akredytację dla zakresu pomiarowego zaczynającego się od 0,1 m/s należy w zakresie pomiarowym  $(0,1 \div 0,4)$  m/s wykonać wzorcowanie całego zespołu pomiarowego tunelu z zachowaniem spójności pomiarowej.

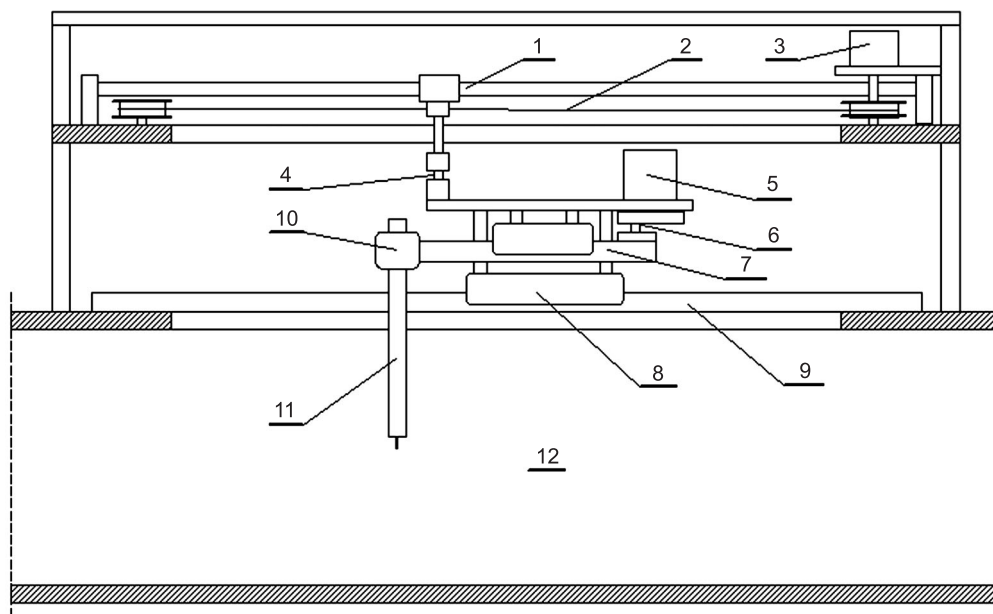
W tym celu zaprojektowano stanowisko do pomiaru prędkości powietrza w komorze pomiarowej tunelu metodą komparacyjną, na zasadzie opisanej w rozdziale 2. Stanowisko to realizuje na pewnym odcinku komory pomiarowej ruch sondy termooanemometrycznej ze stałą prędkością wzdłuż osi komory, z nałożonym na ten ruch postępowy ruchem oscylacyjnym o niewielkiej amplitudzie i częstotliwości tak dobranej, aby w czasie ruchu ze stałą prędkością miało miejsce kilkanaście do kilkudziesięciu okresów ruchu oscylacyjnego. Wykorzystując parzystość charakterystyki termooanemometru drucikowego zastosowanego jako sonda pomiarowa, można dokładnie określić zrównanie prędkości powietrza w tunelu i średniej prędkości ruchu sondy. Na rysunku 3 pokazano budowę stanowiska.

W pokrywie górnej komory pomiarowej tunelu aerodynamicznego (12) znajduje się szczelina, w której przesuwana jest sonda termooanemometru drucikowego (11) zamocowana w uchwycie (10) na końcu szyny prowadnicy (7). Na drugim końcu szyny prowadnicy znajduje się mechanizm jarzmowy (6), napędzany silnikiem krokowym (5), realizujący sinusoidalny ruch sondy termooanemometrycznej. Prowadnica (7) zamocowana jest w karetkce, poruszającej się na wózkach (8) prowadnic, przesuujących się po szynach (9), umieszczonych na pokrywie górnej komory pomiarowej po obu stronach szczeliny. Karetka, przez układ sprzęgający (4), połączona jest z urządzeniem napędu liniowego, złożonego z prowadnicy (1) i silnika krokowego (3), przesuującego wózek prowadnicy za pomocą linki (2), a z nim karetkę z sondą termooanemometryczną. Wykorzystano tu urządzenie napędowe zaprojektowane przez J. Kruczkowskiego [1999] do badania własności dynamicznych anemometrów skrzydełkowych. Sonda termooanemometryczna pracuje w układzie pokazanym na rysunku 4.

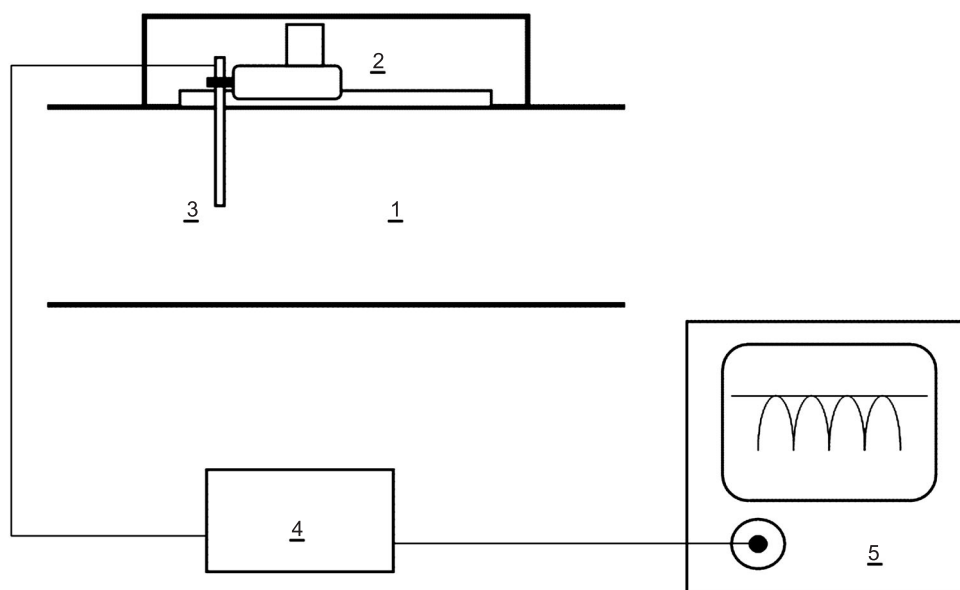
Układ napędowy (2) realizuje ruch sondy termooanemometrycznej (3) zgodnie ruchem powietrza w komorze pomiarowej (1) tunelu aerodynamicznego. Sonda przyłączona jest do termooanemometru, z którego sygnał napięciowy doprowadzony jest do wejścia oscyloskopu.

Gdy suma stałej prędkości ruchu karetki i amplitudy prędkości ruchu sinusoidalnego sondy jest mniejsza od prędkości powietrza lub różnica stałej prędkości ruchu karetki i amplitudy prędkości ruchu sinusoidalnego sondy jest większa od prędkości powietrza to na ekranie oscyloskopu obserwuje się przebieg okresowy o okresie równym okresowi ruchu sinusoidalnego sondy, pokazany na Rys. 2 jako przebieg (1). Jeżeli prędkość powietrza mieści się w granicach prędkości sumarycznej i różnicowej sondy i jest różna od prędkości ruchu karetki, to na ekranie oscyloskopu obserwuje się przebieg pokazany na Rys. 2 jako przebieg (2). Jeżeli prędkość powietrza i prędkość ruchu karetki są równe, to obserwowany przebieg będzie miał postać jak przebieg (3) na Rys. 2.

Prędkość ruchu karetki mierzona jest za pomocą magnetycznego enkodera liniowego połączonego z częstotściomierzem. Głowica enkodera, przymocowana do karetki, przesuwa się nad taśmą magnetyczną

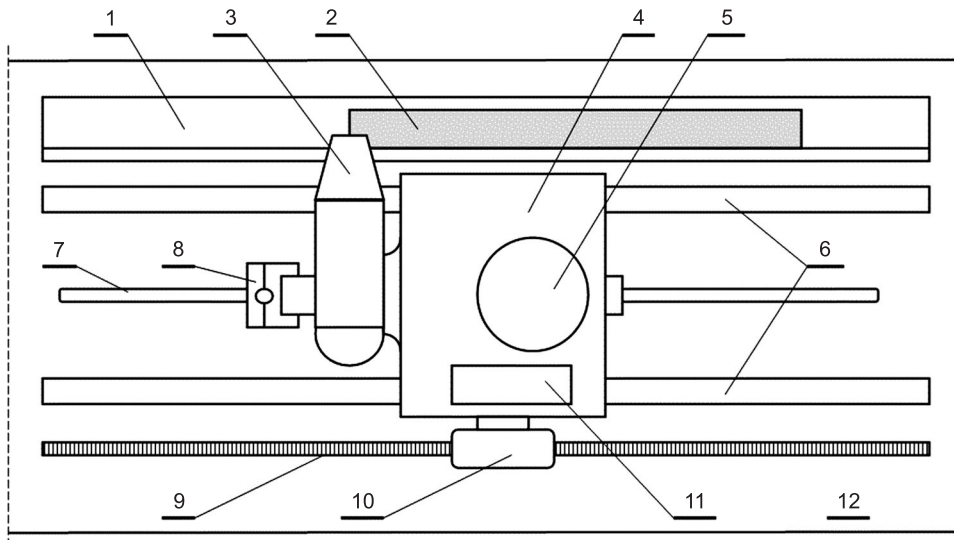


Rys. 3. Urządzenie do pomiaru prędkości powietrza w komorze pomiarowej tunelu aerodynamicznego TA-1.  
**1.** Prowadnica układu napędowego ruchu stałoprędkościowego karetki; **2.** Linka pociągowa układu napędowego ruchu stałoprędkościowego; **3.** Silnik krokowy napędu ruchu stałoprędkościowego karetki; **4.** Sprzęgło; **5.** Silnik krokowy napędu ruchu sinusoidalnego sondy termooanemometrycznej; **6.** Urządzenie mimośrodowe; **7.** Prowadnica ruchu sinusoidalnego sondy termooanemometrycznej; **8.** Wózek prowadnicy ruchu stałoprędkościowego karetki; **9.** Szyna prowadnicy ruchu stałoprędkościowego karetki; **10.** Uchwyt sondy termooanemometrycznej; **11.** Sonda termooanemometru drucikowego. **12.** Komora pomiarowa tunelu aerodynamicznego



Rys. 4. Układ do pomiaru prędkości powietrza metodą komparacyjną.  
**1.** Komora pomiarowa tunelu aerodynamicznego; **2.** Zespół realizujący ruch sondy termooanemometrycznej;  
**3.** Sonda termooanemometryczna; **4.** Termooanometr; **5.** Oscyloskop

namagnesowaną naprzemiennie w odstępach 2 mm. Rozdzielczość enkodera w połączeniu z kwadratującym licznikiem impulsów jest równa 5  $\mu$ m. Stąd częstotliwość impulsów mierzona częstościomierzem jest równa  $50 \cdot v$  kHz, gdzie  $v$  jest prędkością ruchu głowicy enkodera. Dla zachowania spójności pomiarowej układu pomiaru prędkości ruchu karetki konieczne jest wzorcowanie enkodera z użyciem wzorca długości. Służy do tego urządzenie, pokazane na rysunku 5.



Rys. 5. Urządzenie do wzorcowania układu pomiaru prędkości ruchu karetki.

1. Prowadnica płytki wzorcowej; 2. Płytkę wzorcową; 3. Mikroskop cyfrowy; 4. Karetkę; 5. Silnik krokowy napędu mechanizmu ruchu sinusoidalnego sondy; 6. Szyny prowadnic karetki; 7. Szczelina w płycie górnej komory pomiarowej tunelu aerodynamicznego; 8. Uchwyt sondy termooanemometrycznej; 9. Taśmę magnetyczną; 10. Głowicę magnetycznego enkodera liniowego; 11. Sterownik silnika krokowego; 12. Płytę górną komory pomiarowej tunelu aerodynamicznego

Do karetki (4), poruszającej się po szynach (6) przymocowany jest mikroskop cyfrowy (3), obserwujący krawędzie płytki wzorcowej (2) leżącej w prowadnicy (1). Głowica magnetycznego enkodera liniowego (10) przesuwaną się nad taśmą magnetyczną (9) przyłączona jest do licznika kwadraturowego. Karetkę ustawia się tak, aby obraz krawędzi płytki wzorcowej na ekranie monitora komputera, do którego jest przyłączony mikroskop cyfrowy, pokrył się z pionową linią zaznaczoną na tym ekranie. Następnie zeruje się licznik impulsów i przesuwa się karetkę tak, aby na ekranie monitora pojawił się obraz drugiej krawędzi płytki wzorcowej. Po zrównaniu obrazu krawędzi płytki z pionową linią na ekranie odczytuje się licznik, przesuwa się płytkę wzorcową o parę centymetrów i powtarza się procedurę pomiaru. Dysponując wynikami odczytów licznika oblicza się ich wartość średnią i odchylenie standardowe średniej. Następnie dzieląc średnią ilość impulsów przez długość płytki wzorcowej otrzymuje się ilość impulsów na jednostkę długości. Ponieważ licznik kwadraturowy ma rozdzielczość 4 razy większą niż zwykły licznik, to otrzymany wynik należy podzielić przez 4. Przyłączając sygnał z głowicy enkodera do częstotściomierza, dla ruchu karetki ze stałą prędkością otrzymuje się wynik pomiaru częstotliwości impulsów proporcjonalny do prędkości ruchu. Prędkość ruchu karetki oblicza się z następującego wzoru:

$$v = \frac{4L}{I} f \quad (7)$$

gdzie

$L$  – długość płytki wzorcowej,  
 $I$  – średnia ilość impulsów wskazywana przez licznik kwadraturowy,  
 $f$  – częstotliwość impulsów.

Względna niepewność standardowa pomiaru prędkości ruchu karetki jest równa

$$\frac{u(v)}{v} = \sqrt{\left[\frac{u(L)}{L}\right]^2 + \left[\frac{u(I)}{I}\right]^2 + \left[\frac{u(f)}{f}\right]^2} \quad (8)$$

Jeżeli na ekranie oscyloskopu przebieg sygnału z termooanemometru będzie miał kształt jak przebieg (3) na Rys. 2, to oznacza, że prędkość ruchu karetki i prędkość powietrza w komorze pomiarowej tunelu są równe.

#### 4. Rozbudowa stanowiska do wzorcowanie mierników różnic ciśnień

Obecnie Laboratorium Wzorcujące Wentylacyjne Przyrządy Pomiarowe w systemie jakości akredytowanym przez Polskie Centrum Akredytacji do wzorcowania mierników i przetworników różnic ciśnień oraz ciśnienia absolutnego posiada następujące przyrządy pomiarowe:

- 1) mikromanometr hydrostatyczny MINISKOP 5 na zakres (0÷5) kPa o rozdzielczości 0,1 Pa, wzorcowany przez Główny Urząd miar z niepewnością 0.1 Pa do 0.2 Pa,
- 2) elektroniczny miernik różnicy ciśnień RUSKA 7050 LP na zakres 7.5 kPa o rozdzielczości 0.001 Pa i niepewności pomiaru (podawanej przez producenta) 0,4 Pa obecnie wycofany z użycia z powodu braku aktualnego wzorcowania,
- 3) elektroniczny miernik różnicy ciśnień DIPTRON 4, wyposażony w trzy wkładki na zakresy:
  - a) (0÷20) kPa i rozdzielczości 1 Pa, wzorcowany z niepewnością 2 do 3 Pa przez Okręgowy Urząd Miar w Krakowie
  - b) (0÷200) kPa i rozdzielczości 10 Pa, wzorcowany z niepewnością 10 do 20 Pa przez Okręgowy Urząd Miar w Krakowie.
- 4) elektroniczny miernik ciśnienia absolutnego DPI 142 na zakres (35÷1310) hPa, wzorcowany w zakresie (200÷1310) hPa przez Laboratorium Pomiarów Ciśnienia Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych z niepewnością 0.07 do 0.09 hPa.

Poza systemem jakości w laboratorium znajdują się dwa przyrządy obciążnikowo-tłokowe:

- 5) różnicowy zadajnik różnicy ciśnienia MEETRAN 505 na zakres (20÷25000) Pa z niepewnością pomiaru podawaną przez producenta 0.12 Pa lub 0.01% wartości mierzonej
- 6) zadajnik różnicy ciśnienia względem ciśnienia atmosferycznego RUSKA 2465-799A na zakres (11,7÷700) kPa z niepewnością podawaną przez producenta 0.0015%

Podstawowym powodem nie włączenia tych przyrządów do systemu jakości są kłopoty z ich wzorcowaniem w Polsce, gdyż brak jest urządzeń do wzorcowania z dostatecznie małą niepewnością. Zadajnik MEETRAN 505 jest uruchomiony i można z niego korzystać do wzorcowania nie wymagających świadectwa z akredytowanego laboratorium. Aby uruchomić zadajnik RUSKA 2465-799A potrzebne jest jeszcze dodatkowe wyposażenie.

Niepewność wzorcowania przyrządów jest funkcją niepewnością przyrządów wzorcowych, niepewnością odczytu przyrządów wzorcowanych oraz powtarzalnością uzyskiwanych wyników. Powtarzalność uzyskiwanych wyników zależy od właściwości przyrządu wzorcowanego oraz możliwości stanowiska pomiarowego (po pominięciu powtarzalności przyrządu wzorcowego).

Podczas wzorcowania przyrządów na niskie zakresy różnic ciśnień, gdy trzeba odczytywać wartości z rozdzielczością lepszą niż 10 Pa wszystkie stosowane urządzenia muszą być odłączone od wpływu ciśnienia atmosferycznego, którego wartości ulegają ciągłym zmianom. Aby to uzyskać w tor pomiarowy włącza się dwa zbiorniki o objętości umożliwiającej zadawanie różnicy ciśnień z wystarczającą precyzją.

Odczytów wartości różnic ciśnień dokonuje się dla stanu ustalonego, aby uniknąć błędów spowodowanych spadkami ciśnień wywołanych przepływami powietrza w układzie pomiarowym. Przy obecnie stosowanych zbiornikach bardzo poważnym problemem są zmiany różnicy ciśnień wywoływane zmianami temperatury zbiorników wywoływane zmianami temperatury w laboratorium. Mniejszym problemem jest czas ustalania się różnicy ciśnień po zmianie ich wartości, która to zmiana powoduje zmianę temperatury w zbiornikach. Przy wzorcowaniu przyrządów o rozdzielczości 0.1 Pa czas ustalania się różnicy ciśnień po zmianie wynosi kilkanaście minut. A wystarczająco dokładne nastawienie żądanej wartości trwa kilkadziesiąt minut.

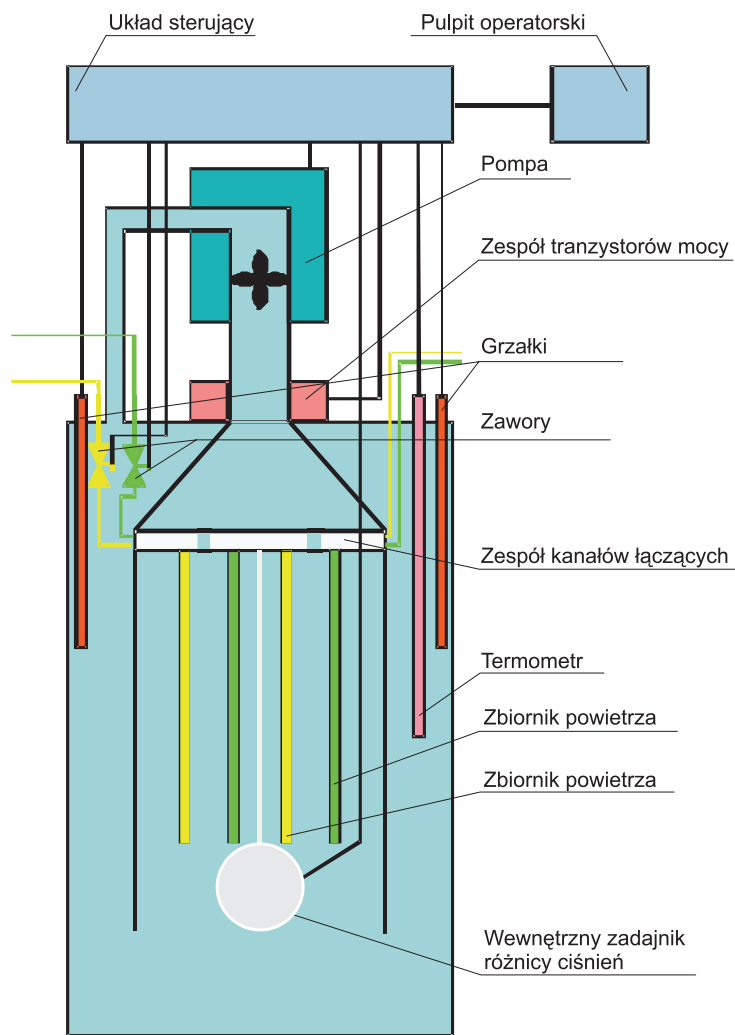
Z tego powodu podjęto prace nad opracowaniem odpowiedniego zadajnika różnicy małych ciśnień. Przyjęto następujące założenia: rozdzielczość 0.001 Pa i możliwie mały czas ustalania się różnicy ciśnień. Przez oczekiwaną rozdzielczość rozumie się, że w czasie kilkudziesięciu sekund, na wzorcowym przyrządzie RUSKA 7050 LP, nie zaobserwuje się zmiany ciśnienia większej niż 0.001 Pa. Z prawa Klapeyrona można wyliczyć, że w tym czasie różnica temperatur w obu zbiornikach musi się zmienić nie więcej niż 3  $\mu$ K. Jest to bardzo duże i trudne do osiągnięcia wymagania.

Aby zrealizować wyżej wymienione założenia przyjęto, że:

- 1) przewody łączące zadajnik ze wzorcowym przyrządem (mają pewną objętość) muszą mieć długość nie większą niż 30 cm i wewnętrzną średnicę nie większą niż 3 mm oraz, że muszą dobrze wymieniać

- ciepło i być izolowane cieplnie od atmosfery. Niestety nie da się takiego rozwiązanie zastosować do przyłączania przyrządów wzorcowanych,
- 2) zbiorniki o objętościach nie mniejszych niż dwa litry zostaną wykonane z rurek umieszczonych w zbiorniku o objętości kilkudziesięciu litrów zawierającym przepływającą wodę, której temperatura jest stabilizowana, przy czym rurki z obu zbiorników wzajemnie ze sobą sąsiadują,
  - 3) precyzyjny zadajnik o objętości roboczej kilkunastu centymetrów jak i zawory odcinające zbiorniki od zewnętrznych pomp również będą umieszczone w zbiorniku z wodą.

Schemat zadajnika jest pokazany na Rys. 6. Główna część zadajnika jest umieszczona w cylindrycznym zbiorniku wykonanym ze stali nierdzewnej o objętości około 60 litrów, wypełnionym wodą. Zbiorniki powietrza są wykonane ze stali nierdzewnej z jednostronnie zasklepionych rurek o średnicy wewnętrznej 16 mm, które drugimi końcami są wklejone w płytę wykonaną ze stali nierdzewnej o grubości kilkunastu milimetrów stanowiącą dolną część zespołu kanałów łączących. Nad tą płytą znajduje się wykonana z teflonu płyta, w której są wykonane kanały łączące rurki oraz połączenia z zaworami i króćcami a także z precyzyjnym zadajnikiem różnicy ciśnień. Ostatnią warstwą jest płyta ze stali nierdzewnej skrecona z dolną płytą. W całym zespole są wykonane otwory dla przepływu wody w górę. Nad zespołem kanałów łączących jest umieszczony dzwon kierujący wodę do pompy. Zespół rurek jest osłonięty wewnętrzną rurą otwartą od dołu, która jest koniczna dla wymuszenia opływu rurek przez wodę. Woda przepompowana przez pompę wprowadzana jest do zbiornika z góry w taki sposób by wywołać ruch wirowy co zwiększy symetrię osiową rozkładu temperatury.

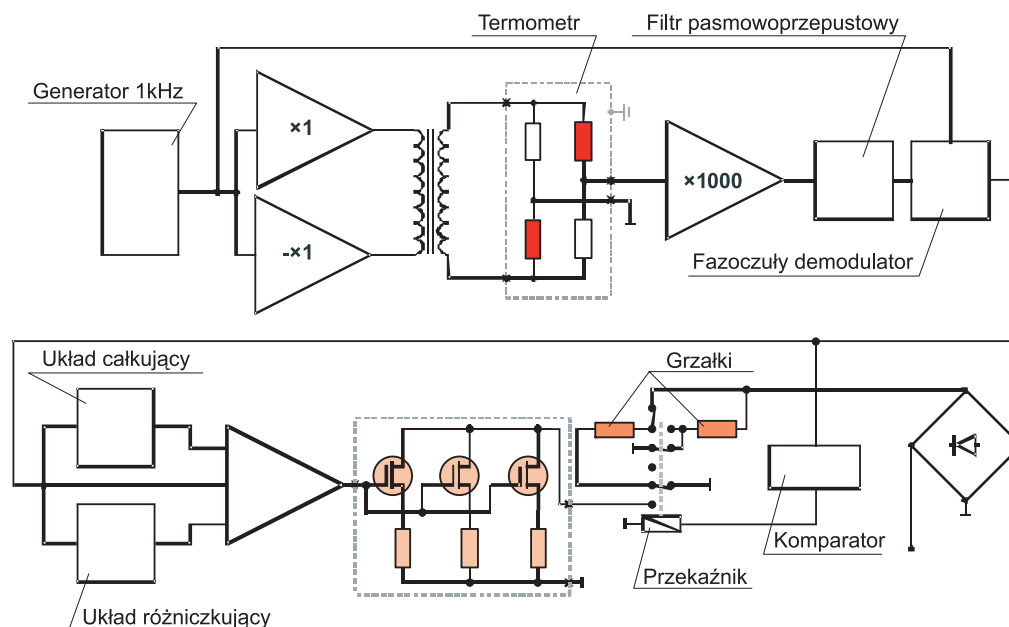


Rys. 6. Szkic zadajnika małych różnic ciśnień



Mała średnica rurek, z których są wykonane zbiorniki zwiększa szybkość wymiany ciepła zmniejszając w ten sposób czas ustalania się ciśnienia w układzie pomiarowym. Przestrzenne rozmieszczenie i wymieszanie rurek obu zbiorników spowoduje mniejszą wrażliwość na niejednorodność temperatury krążącej wody.

Dla uzyskania dobrej stabilności różnicy ciśnień istotna jest dobra stabilizacja temperatury wody. Schemat regulatora temperatury jest pokazany na Rys. 7. W układzie sprzężenia zwrotnego dla jakości stabilizacji istotne są: stabilność wartości zadanej, dokładność pomiaru oraz parametry regulatora.



Rys. 7. Schemat stabilizatora temperatury

Do pomiaru temperatury przewiduje się stosowanie termometrów platynowych (PT100) lub termistorów. Dostępne termometry platynowe mają mniejsze stałe czasowe od termistorów o takich samych rozmiarach lecz mają mniejszą czułość. Bez eksperymentu trudno rozstrzygnąć zastosowanie których będzie lepsze. Wybór rezystorów do pomiaru temperatury narzuca zastosowanie rezystancji do realizacji wartości zadanej.

Ponieważ wartości rezystancji rezystorów w układzie pokazanym na Rys. 7 również ulegają zmianie to do realizacji pomiaru temperatury i jej wartości zadanej przewiduje się zbudowanie mostka składającego się z dwóch czujników temperatury i dwóch rezystorów umieszczonych w osłonowej rurce i umieszczonej w wodzie jak na Rys. 6. Takie rozwiązanie powoduje, że zarówno rezystory pomiarowe (PT100) jak i pozostałe są miernikami temperatury, a wartością zadaną są relacje w tym układzie. Zastosowanie dwóch rezystorów pomiarowych w przekątnych mostka powoduje dwukrotny wzrost czułości.

Mostek pomiaru temperatury jest zasilany z generatora, którego sygnał wyjściowy zawiera mało harmonicznych, poprzez transformator. Jedna przekątna mostka jest uziemiona. Takie rozwiązanie pozwala zastosować wzmacniacz operacyjny (wzmacniający 1000 razy) sygnału błędu, minimalizując wpływ wzmocnienia sygnałów wspólnych. Dla ograniczenia szumów za wzmacniaczem przewiduje się zastosowanie filtra pasmowego. Następnym elementem jest precyzyjny detektor fazoczuły. Wszystkie omówione dotąd układy regulatora temperatury realizują wartość zadaną i mierzoną temperatury oraz węzeł sumujący regulatora. Element wykonawczy jest zrealizowany w postaci dwóch grzałek o mocy 1 kW przy napięciu zasilania 230 V. Tak duża moc jest potrzebna do ogrzania 60 litów wody i około 100 kg stali o 5 do 10°C w ciągu kilkadziesiąt minut.

Regulator temperatury działa dwuetapowo. Na początku po załączeniu, gdy temperatura różni się od temperatury zadanej o więcej niż 1 °C, grzałki są połączone równolegle przez przełącznik i przyłączone do napięcia zasilania. Działaniem przełącznika steruje komparator sterowany sygnałem z detektora fazoczułego. Gdy różnica temperatur zadanej i realizowanej zmaleje przełącznik łączy grzałki w szereg i przyłącza je do źródła prądowego składającego się z trzech równolegle połączonych tranzystorów polowych, sterowanego

z regulatora PID. Zastosowanie w początkowym etapie regulatora przekaźnikowego zmniejszyło maksymalną moc wydzielaną na tranzystorach regulacyjnych z 500 W do 120 W. Przewidziano takie umieszczenie tranzystorów mocy, że wydzielane na nich ciepło będzie oddawane do wody. Zmontowany układ takiego regulatora w małej objętości stabilizował temperaturę ze stabilnością nie gorszą niż  $0.003^{\circ}\text{C}$ . Na dokładniejsze sprawdzenie jakości regulatora nie pozwalała dostępna technika pomiarowa.

Zadawanie różnicy ciśnień będzie się odbywać dwuetapowo. Zgrubnie zewnętrznymi pompkami ręcznymi. Następnie, po zamknięciu zaworów, pompką umieszczoną w zbiorniku napędzaną silnikiem krokowym. Pompka umieszczona w zbiorniku będzie wykonana z siłownika ze stali nierdzewnej o średnicy tłoka 16 mm, napędzanego silnikiem krokowym przez śrubę o małym skoku. Do sterowania silnika krokowego dla uzyskania dostatecznej precyzji zadawania różnicy ciśnień konieczny jest sterownik z podziałem kroku 1/64.

Zawory odcinające zewnętrzne pompki muszą być zaworami kulowymi gdyż takie nie zmieniają części objętości układu zadajnika pozostajej po ich zamknięciu a tym samym i ciśnienia. Do sterowania zaworami przewidziane są elektromagnesy.

Zarówno budowa stanowiska do wzorcowania jak i wysokie wymagania co do właściwości zadajnika wymagają zdalnego nim sterowania.

Do obecnej chwili zaprojektowano i sprawdzono regulator temperatury, zaprojektowano układy zdalnego sterowania oraz zaprojektowano dwie kolejne wersje części mechanicznej. Ich analizy wykazywały pewne niedostatki zmuszające do opracowania następnej wersji, zapewne już ostatecznej. W tej wersji zostanie wykorzystanych wiele elementów już wcześniej skonstruowanych.

## 5. Wzorcowanie termometrów

W tym zakresie celem jakie chcemy osiągnąć w laboratorium jest możliwość wzorcowania termometrów w zakresie  $(-40\div 160)^{\circ}\text{C}$  z niepewnością w zależności od wzorcowanego termometru od 0.1 do  $0.3^{\circ}\text{C}$ .

Osiągane niepewności wzorcowania termometrów zależą od stosowanych urządzeń wzorcowych. Najmniejsze niepewności uzyskuje się przez stosowanie urządzeń do odtwarzania punktów stałych międzynarodowej skali temperatur. Możliwe do osiągnięcia niepewności są rzędu  $0.001^{\circ}\text{C}$  do  $0.0001^{\circ}\text{C}$ . W termostatach cieczowych osiąga się niepewności  $0.01^{\circ}\text{C}$ . W piecach i komorach temperaturowych możliwe są do osiągnięcia niepewności rzędu  $0.1^{\circ}\text{C}$ .

Laboratorium posiada dwa stanowiska do wzorcowania termometrów. Jednym z nich jest piec OCANUS 580 z możliwą do uzyskania niepewnością 0.1 do  $0.2^{\circ}\text{C}$  w zakresie  $(-25\div 140)^{\circ}\text{C}$ . Drugim jest prymitywna i mała komora temperaturowa z możliwą do osiągnięcia niepewnością  $0.2^{\circ}\text{C}$  w zakresie  $(0^{\circ}\text{C}\div 40)^{\circ}\text{C}$ . Aby uzyskać i utrzymywać akredytację Polskiego Centrum Akredytacji konieczne jest zapewnienie spójności pomiarowej. Uzyskuje się ją przez kolejne wzorcowania w laboratoriach posiadających akredytację z uzyskiwaną mniejszą niepewnością pomiarową. W przypadku nieposiadania odpowiednich wzorców zachodzi więc potrzeba wzorcowania wzorców użytkowych. Jest to organizacyjnie kłopotliwe i kosztowne. Z tych względów zostały zakupione urządzenia wzorcowe, a mianowicie:

- 1) komórka do odtwarzania punktu topnienia galu ( $29,7646^{\circ}\text{C}$ ),
- 2) komórka do odtwarzania punktu potrójnego wody ( $0.01^{\circ}\text{C}$ ),
- 3) wzorcowy termometr platynowy (temperaturowy współczynnik rezystancji 0.00392),
- 4) mostek zmiennoprądowy,
- 5) rezystor wzorcowy.

Zakupione urządzenia pozwalają odtworzyć międzynarodową skalę temperatur w zakresie  $(0\div 30)^{\circ}\text{C}$ .

Termometrami użytkowymi są platynowe czujniki temperatury (temperaturowy współczynnik rezystancji 0.00385) z miernikami uniwersalnymi wyposażonymi w możliwość pomiaru temperatury z rozdzielczością  $0.01^{\circ}\text{C}$ .

Aby móc kontrolować jakość wzorcowania w szerszym zakresie temperatur skonstruowano i zbudowana ewaporator odtwarzający temperaturę wrzenia wody. Podczas pracy wykorzystano opis znajdujący się w książce Michalskiego i Eckersdorfa [1986]. Temperatura wrzenia wody znajdowała się w zbiorze stałych zdefiniowanej w 1968 roku, obecnie w tym zbiorze nie występuje.

Do oceny niestabilności temperatury wrzenia wody wykorzystano tabelę z pracy Oleśkiewicz-Popieła i Wojtkowiaka [2007], w której znajdują się między innymi temperatury ciśnienia nasyconej pary wodnej w zakresie temperatur 97 do 103°C, zestawione w Tabeli 2.

Tab. 2. Zestawienie ciśnienia nasyconia pary wodnej w zakresie temperatur od 97°C do 103°C

Lp.	Ciśnienie	Temperatura
	bar	°C
1	0.9103076	97
2	0.9439022	98
3	0.9785184	99
4	1.0132393	99.974
5	1.0141799	100
6	1.0509109	101
7	1.0887359	102
8	1.1276796	103

Aproksymacja zależności temperatury wrzenia wody od ciśnienia dla danych zawartych w tabeli (2) wielomianem trzeciego stopnia dała wynik:

$$53.21117477 + 1.64512636p - 32.06212077p^2 + 6.811784162p^3 \quad (9)$$

gdzie:

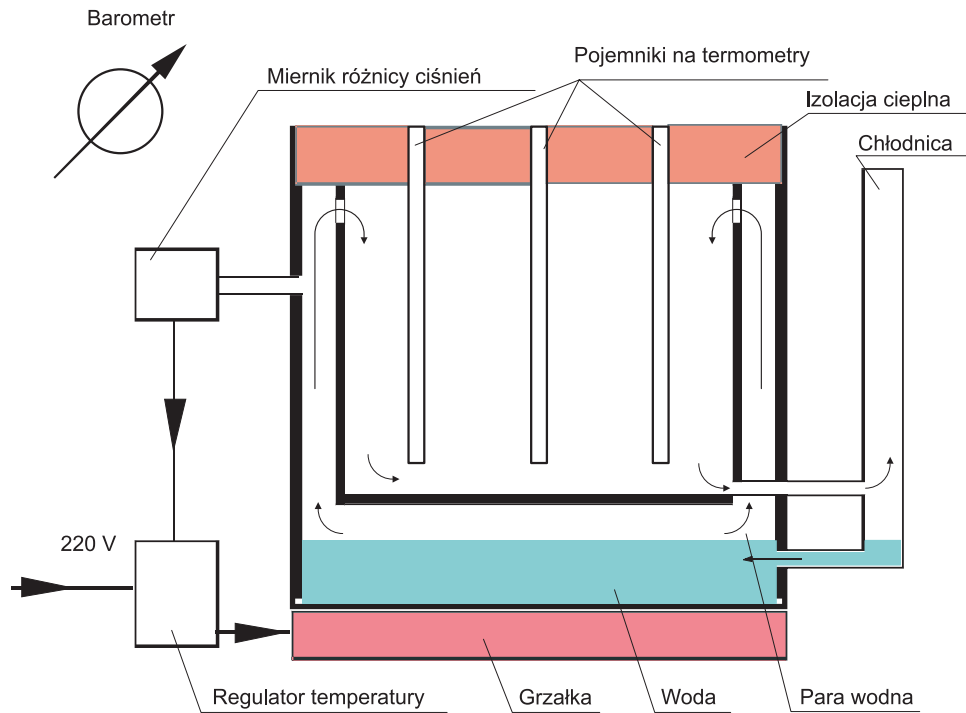
- $p$  – ciśnienie [bar],
- $T$  – temperatura [°C].

Maksymalna różnica temperatur pomiędzy wartościami z tabeli (2) i wzoru (9) jest rzędu 0.00011°C. Brak informacji o niepewności zawartych w tablicy (2) danych uniemożliwia oszacowanie niepewności wyznaczenia temperatury ze wzoru (9) przy znanym ciśnieniu w ewaporometrze. Sądząc po ilości miejsc znaczących w tabeli (2) można przypuszczać, że temperatura była mierzona z niepewnością około 0.001°C a ciśnienie z niepewnością mniejszą niż 0.1 Pa. Wobec tego można sądzić, że niepewność „własna” wzoru (9) jest rzędu 0.001°C. Możliwa do wyznaczenia niepewność ciśnienia w ewaporometrze w warunkach laboratorium wynosi 20 Pa. Wynikająca z tego niepewność temperatury w ewaporatorze wynosi około 0.0056°C. Łączna niepewność temperatury w ewaporometrze jest rzędu 0.0058°C. W książce Michalskiego i Eckersdorfa [1986] szacuje się, że niepewność wyznaczenia temperatury w ewaporatorze z regulacją ciśnienia jest rzędu 0.001°C, a bez stabilizacji ciśnienia jest rzędu 0.005°C.

Ewaporator składa się z dwóch naczyń. Na dnie zewnętrznego naczynia znajduje się woda destylowana podgrzewana grzałką. Para przedostaje się do naczynia wewnętrznego otworami w jego górnej części. Przez dolny otwór przechodzi do skraplacza, z którego po skropleniu spływa do naczynia zewnętrznego. W naczyniu wewnętrznym są zamontowane rurki do umieszczania termometrów. Schematycznie ewaporator jest pokazany na Rys. 8.

Ciśnienie panujące w ewaporatorze jest wyznaczone z pomiaru ciśnienia atmosferycznego i różnicy ciśnienia względem ciśnienia atmosferycznego. Do regulacji mocy grzałki używany jest sygnał różnicy ciśnienia.

Obecnie wzorcowanie termometrów, w zależności od ich rodzaju, odbywa się w piecu lub komorze. W piecu wzorcowane są termometry z czujnikami rezystancyjnymi lub termoparowymi, o ile jest możliwe ich umieszczenie w studni o średnicy 50 mm. W komorze są wzorcowane termometry cieczowe oraz te termometry elektroniczne, które nie mieszczą się w studni pieca. Do zwiększenia dokładności odczytu temperatury na termometrach cieczowych stosuje się lunetę zamontowaną w katetometrze. Najwięcej kłopotu sprawiają termometry zabudowane w urządzeniach mierzących również inne wielkości fizyczne powietrza, z których nie można wyjąć czujnika termometru. Wzorcowanie takich termometrów jest obciążone dużymi niepewnościami, sięgającymi jednego stopnia. Głównym powodem błędów są duże gradienty temperatury występujące w komorze oraz częsta konieczność umieszczenia termometru wzorcowego kilka centymetrów od termometru wzorcowanego. Zmniejszenie niepewności można uzyskać stosując komorę o mniejszych gradientach temperatury. Inną możliwością jest zasypywanie termometru wzorcowego i urządzenia z wzorcowanym termometrem cząstkami z materiałów o dobrym przewodnictwie cieplnym. W praktyce cząstki do



Rys. 8. Schemat ewaporatora

zasypywania mogą być wykonane z miedzi, aluminium, stopu aluminium PA6, brązu, lub węgla krzemu. Niepewność wzorcowania można zmniejszyć przez umieszczenie termometru wzorcowanego i wzorcowego w pojemniku z masywnymi ścianami z materiału dobrze przewodzącego ciepło.

## 6. Wzorcowanie wilgotnościomierzy

W praktyce spotyka się dwa rodzaje wzorcowanych w laboratorium wilgotnościomierzy: psychrometry Assmanna i higrometry z pojemnościowymi czujnikami wilgotności.

Psychrometry Assmanna wyposażone są w dwa termometry oraz wentylator wywołujący przepływ powietrza wokół termometrów. Dla poprawnej pracy psychrometru prędkość powietrza opływającego termometry powinna być większa od pewnej wartości. Zwykle minimalna wartość prędkości mieści się w przedziale od 1,6 do 2,5 m/s. Wzorcowanie polega na sprawdzeniu, czy jest osiągalna minimalna prędkość oraz na wzorcowaniu termometrów. Zwykle dla psychrometrów, których wentylator jest napędzany sprężyną sprawdza się czas jednego obrotu bębna zawierającego sprężynę. Zwykle producenci podają maksymalny czas obrotu zapewniający poprawną pracę przyrządu.

Termometry cieczowe są wzorcowane w komorze temperaturowej. Zbiorniki zawierające ciecz są umieszczane w otworach miedzianego bloku. W otworach tego bloku są również umieszczane termometr wzorcowy i termometr regulatora temperatury.

Higrometry są wzorcowane w zadajniku wilgotności HUMOR 20. Wzorcowy przyrząd posiada dwie komory umieszczone w masywnym bloku aluminium. W komorze o regulowanym ciśnieniu znajduje się woda destylowana. Przepływające nad nią powietrze jest nasycające parą wodną i jest kierowane do komory o ciśnieniu atmosferycznym. Mała prędkość przepływu i masywna konstrukcja z materiału dobrze przewodzącego ciepło zapewnia z dostateczną dokładnością jednakową temperaturę w obu komorach. Powietrze nasycone parą wodną w komorze ciśnieniowej po rozprężeniu zmniejsza swoją wilgotność względną. Z pomiaru temperatury oraz ciśnienia w obu komorach procesor przyrządu wylicza wilgotność względną.

Stanowisko pomiarowe musi być wyposażone w źródło powietrza o ciśnieniu 1 MPa, nie zawierającego oleju i pyłów o rozmiarach większych niż 5  $\mu\text{m}$ . Obecnie stanowisko nie jest kompletne. Brak zbiornika wyrównawczego i regulatora ciśnienia. Znacznie utrudnia to pracę i powiększa niepewność wzorcowania.

## 7. Podsumowanie

Oprócz zwiększania możliwości pomiarowych laboratorium istotna jest automatyzacja wielu czynności. Automatyzacja zmniejszy ilość błędów powodowanych głównie przez ludzi oraz zmniejszy pracochłonność. Zarówno zwiększanie zdolności pomiarowych jak automatyzacja wymagają opracowań, zakupów, wzorcowań i szkoleń personelu. W zależności od rodzaju wzorcowanych przyrządów występują różne potrzeby.

Najpilniejszą potrzebą jest dokończenie wzorcowania tunelu w zakresie prędkości ( $0 \div 0,4$ ) m/s. Następne poważne zagadnienie to automatyzacja stanowiska. Automatyzacja powinna obejmować wszystkie pomiary konieczne do wyznaczenia prędkości jak i warunków środowiskowych. Obecnie jest ona w ogólnych zarysach zaprojektowana. Są również zakupione przyrządy pomiarowe do pomiaru ciśnienia absolutnego, różnic ciśnień na kryzie i statycznej rurce Pitota, temperatury i wilgotności względnej powietrza w tunelu aerodynamicznym. Zakupione jest również urządzenie zawierające przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe umożliwiające zbieranie danych i sterowanie procesem wzorcowania przez komputer. Do wykonania jest projekt instalacji oraz jej montaż, napisanie programu komputerowego obsługującego stanowisko, uruchomienie i walidacja oraz wprowadzenie do akredytowanego systemu wzorcowania anemometrów, co oznacza dokonanie poważnych zmian zapisów w księdze jakości i procedurze wzorcowania.

Dla stanowiska do wzorcowania mierników ciśnienia absolutnego oraz różnic ciśnień jest bardzo potrzebny zadajnik małych różnic ciśnień. Również bardzo potrzebne jest wytypowanie akredytowanego laboratorium do wzorcowania naszych przyrządów wzorcowych, których z możliwą do uzyskania dokładności nie można wzorcować w kraju oraz ich wywzorcowanie. Do pełnego wykorzystania możliwości pomiarowych zadajnikowo-tłokowych potrzebna jest czysty azot. A więc zachodzi potrzeba zakupu butli z azotem razem z odpowiednim oprzyrządowaniem oraz zaprojektowania i wykonania stanowiska pomiarowego.

Obciążnikowo-tłokowy zadajnik różnic ciśnień RUSKA 2465-799A po wyposażeniu stanowiska w pompę próżniową i miernik próżni można stosować do wzorcowania ciśnieniomierzy ciśnienia absolutnego. W instytucie są odpowiednie pompy próżniowe, potrzeba tylko zakupić miernik próżni.

Procedura wzorcowania przewiduje okresowe sprawdzenia przyrządów wzorcowych przez kontrolne, okresowe wzorcowanie przyrządów pomiarowych wytypowanych i służących wyłącznie do tego celu. W laboratorium brak jest przyrządów o odpowiednich do tego celu parametrach i należy zakupić przyrządy obejmujące cały akredytowany zakres ciśnień.

Do pomiaru temperatury podczas wzorcowania termometrów są używane dwa czujniki platynowe dobrej klasy razem z uniwersalnymi miernikami. Wzorcowanie odbywa się w piecu OCEANUS 580, w zakresie ( $-25^{\circ}\text{C} \div +140^{\circ}\text{C}$ ), jeśli czujniki termometrów mogą być umieszczone w jednym z pięciu walców aluminiowych umieszczonych w studni pieca. Podawana przez dostawcę różnica temperatur w otworach walców z umieszczonymi w nich podobnymi czujnikami termometrów może dochodzić do  $0,06^{\circ}\text{C}$ . Dla czujników o różnej konstrukcji różnice temperatur mogą osiągać większe wartości, co ogranicza wartość uzyskiwanej niepewności do wartości większych od  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Jeśli czujników termometrów nie można umieścić w otworach walców, to termometry są wzorcowane w komorze temperaturowej w zakresie ( $0 \div 40$ ) $^{\circ}\text{C}$ .

Termometry cieczkowe podczas wzorcowania muszą być całe umieszczone w ośrodku o jednakowej wartości temperatury. Z tego względu są wzorcowane w posiadanej przez laboratorium komorze temperaturowej. Ponieważ w tej komorze ciepło jest przenoszone przez powietrze, a komora jest mała i źle izolowana termicznie, to występują w niej znaczne gradienty temperatur ograniczające dokładność wzorcowania. Szacuje się, że tylko z tego względu niepewność wzorcowania jest nie lepsza niż  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Dla wzorcowania termometrów umieszczonych w stacjach meteorologicznych komora jest zbyt mała aby wzorcowanie przeprowadzać z niepewnością lepszą niż  $0,3^{\circ}\text{C}$ .

Przyrządami pozwalającymi wzorcować przyrządy i czujniki użytkowe są dwie komórki odtwarzające punkty stałe międzynarodowej skali temperatur (ITS 90): komórka realizująca punkt potrójny wody (z definicji  $+0,01^{\circ}\text{C}$ ) oraz komórka galowa realizująca temperaturę  $29,7646^{\circ}\text{C}$ . Do akredytacji posiadane komórki wymagają porównania z komórkami posiadanymi przez GUM. Jako wzorzec temperatury  $100^{\circ}\text{C}$  jest przygotowane urządzenie do odtwarzania temperatury wrzenia wody. Do akredytacji to urządzenie również musi mieć zapewnioną spójność pomiarową, którą najpewniej będzie uzyskać przez wzorcowanie w GUM. W książce Michalskiego i Eckersdorfa [1986] ocenia się niepewność temperatury wrzenia wody na  $\pm 0,005^{\circ}\text{C}$  jeśli nie jest uwzględniane ciśnienie atmosferyczne. Punkt wrzenia wody nie jest punktem stałym na skali temperatur.

Do pokrycia pełnego zakresu temperatur jakie są spotykane w wentylacji potrzebne są jeszcze dwa urządzenia odtwarzające punkty stałe. Urządzenie odtwarzające punkt potrójny rtęci  $-38.8344^{\circ}\text{C}$  oraz punkt krzepnięcia indu  $+156.5985^{\circ}\text{C}$ .

Pomiędzy tymi wartościami temperatur wzorcem jest wzorcowy termometr platynowy (wywzorcowany przez GUM) oraz dokładny mostek rezystancyjny razem z wzorcowym rezystorem.

Dla rozszerzenia zakresu i poprawienia niepewności wzorcowania termometrów cieczowych oraz termometrów, których czujników nie można umieszczać w posiadanym piecu, potrzebna jest inna, większa komora temperaturowa oraz termostat cieczowy. Odpowiednie do tego celu są komory klimatyczne, które będą również służyć do wzorcowania wilgotnościomierzy.

Obecnie na wyposażeniu laboratorium znajduje się przenośny kalibrator typu HUMOR 20 do wzorcowania higrometrów zaopatrzonych w zewnętrzne czujniki. Do jego pracy jest wymagane źródło sprężonego powietrza o małej wydajności i ciśnieniu 1 MPa. Posiadany bezolejowy kompresor spełnia te wymagania. Jednak do jego wykorzystania potrzebne są dodatkowe urządzenia, z których najważniejsze to zbiornik wyrównawczy, regulator ciśnienia (reduktor), filtr powietrza i kontrolny higrometr dobrej klasy.

Do wzorcowania higrometrów o dużych wymiarach jest potrzebna komora klimatyczna, ta sama co do wzorcowania termometrów. Na jej wyposażeniu dodatkowo musi się znajdować dobrej klasy higrometr, najlepiej taki sam jak higrometr kontrolny do kalibratora HUMOR 20.

Przed napisaniem procedur wzorcowania termometrów i higrometrów konieczne jest odbycie szkolenia przynajmniej jednej osoby w GUM.

Praca została wykonana w roku 2010 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wzwyższego.

## Literatura

- Cierniak W., 1993. *Anemometr statotemperaturowy, analiza wpływu parametrów mostka i wzmacniacza*, praca doktorska, Instytut Mechaniki Górotworu PAN, Kraków.
- Kiełbasa J., 2010; *Measurement of gas flow velocity: Anemometr with a vibrating hot wire*. REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 81, 1.
- Michalski L., Eckersdorf K., 1986. *Pomiary temperatury*. WNT Warszawa.
- Oleśkiewicz-Popiel Cz., Wojtkowiak J., 2007. *Eksperymenty w wymianie ciepła*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
- Trutwin W., Chmiel W., Socha P., 1984. *Cechowanie zwężki pomiarowej 16x50 w tunelu aerodynamicznym*. IMG PAN, Kraków.

## Extending the measurement capabilities of the Laboratory Ventilation Equipment Calibration

### Abstract

The paper summarises the attempts made to improve the quality of calibration of equipment used for measurements of pressure difference, flow velocity and temperature. Measurements of small pressure differences require a high-precision sensor, which is currently being fabricated. The paper details on the design procedures. The wind tunnel used for calibration of anemometers requires the calibration in the velocity range from 0 to 0.4 m/s. The paper provides the description of the calibration methodology and facilities. Devices based on phase transitions of high-purity components are used in control of devices acting as temperature references. One of the transition points used for that purposes is the water boiling point. The paper provides the description of a newly-engineered device (evaporation meter) used to reconstruct this point.

**Keywords:** metrology, fluid mechanics