

Juliusz TOPOLNICKI

POLSKA AKADEMIA NAUK, INSTYTUT MECHANIKI GÓROTWORU

Zastosowanie pomiaru siły do wyznaczania różnic ciśnienia – studium metody**Doc. dr hab. Juliusz TOPOLNICKI**

Physicist working on the mining safety field. Solving some problems concerning force measurements was necessary to achieve the major goals of Strata Mechanics Institute. This become a complicated task requiring a dipper look into the subject.

e-mail: topolnic@img-pan.krakow.pl**Streszczenie**

Opisano zasadę działania, budowę i wyniki wstępnych testów przed prototypu cieczowego manometru różnicowego w którym pomiar poziomu cieczy został sprowadzony do pomiaru siły wyporu. Przeprowadzono testy manometru pracującego w trybie miernika poziomu wody. Stwierdzono liniową odpowiedź na zmiany poziomu wody. Prognozowana wartość działki elementarnej manometru różnicowego wynosi 0.1 Pa przy zakresie pomiarowym 350 Pa.

Application of the force measurements to the pressure difference determination**Abstract**

The manometer designed to gas velocity measurements by using Prandtl's or Pitot's pipe was described. The prototype of this kind of manometer was tested. Tested instrument has linear voltage response to pressure. Its measurements range is 0 - 350 Pa, with elementary rate 0.1 Pa.

1. Wstęp, inspiracja, podstawowe warunki

Praca dotyczy metody umożliwiającej pomiary małych różnic ciśnienia z rozdzielczością poniżej 1 Pa. Pomiary tego rodzaju odgrywają ważną rolę w anemometrii. Zastosowanie rurek spiętrzeniowych do pomiaru prędkości powietrza poniżej 1 - 2 m/s wymaga rozwiązania dwu zadań. Należy sprawdzić dolną granicę stosowalności wzoru:

$$\Delta P = \frac{\rho v^2}{2}$$

określającego różnicę ciśnień wywołaną naporem strugi gazu o gęstości ρ i prędkości v , oraz dobrać lub zbudować manometr różnicowy dysponujący wystarczającym zakresem pomiarowym. Przyjmijmy, że mierzymy prędkość strugi powietrza w warunkach normalnych, oraz że w całym zakresie pomiarowym obowiązuje wzór:

$$\Delta P = \frac{\rho v^2}{2}$$

Jeśli prędkość strugi zmienia się od 0.5 do 10 m/s, to różnica ciśnień wygenerowana na rurce spiętrzeniowej zawiera się w przedziale 0.2 - 70 Pa (0.02 - 7 mmH₂O). Aby mierzyć prędkości powietrza w przedziale poniżej 1m/s należy mierzyć różnice ciśnień z dokładnością i rozdzielczością znacznie lepszą niż 0.1 Pa.

Do pomiaru takich różnic ciśnienia można zastosować cieczowy manometr różnicowy działający w oparciu o zasadę naczyń połączonych. Do tej grupy przyrządów należą między innymi mikromanometr typu Betz oferowany przez DFVLR AVA GOTTINGEN (Niemcy) oraz mikromanometr typu Miniscop 5

oferowany przez AMETEK DEBRO Messtechnik GmbH, Meerbusch (Niemcy).

Opierając się na świadectwach wzorcowania wydanych przez Główny Urząd Miar, można stwierdzić, że właściwości mikromanometru typu Betz charakteryzują liczby :

zakres pomiarowy	-0.5 , +39.2 mbar (-50, +3920 Pa),
działka elementarna	0.01 mbar (1 Pa),
niepewność	0.001 mbar (0.1 Pa) przy odczycie 0 mbar,
	0.003 mbar (0.3 Pa) przy odczycie 5 mbar (500 Pa),
	0.007 mbar (0.7 Pa) przy odczycie 39 mbar (3900 Pa) [1].

Opierając się na analogicznym źródle stwierdzamy, że mikromanometr typu Miniscop charakteryzują liczby :

zakres pomiarowy	0 - 50 mbar (0 - +5000 Pa),
dokładność odczytu	0.001 mbar (0.1 Pa),
niepewność	0.001 mbar (0.1 Pa) przy odczycie 0 mbar,
	0.002 mbar (0.2 Pa) przy odczycie 5 mbar (500 Pa),
	0.004 mbar (0.4 Pa) przy odczycie 40 mbar (4000 Pa) [2].

W obu przypadkach pomiar różnicy ciśnień sprowadza się do pomiaru poziomu cieczy manometrycznej poprzez określenie pozycji swobodnie unoszącego się na powierzchni cieczy pływaka. Wyniki pomiaru są w obu przypadkach odczytywane optycznie bez możliwości bezpośredniego przetworzenia na sygnał elektryczny czy cyfrowy.

Niepewność wskazań instrumentów wymienionych powyżej przekracza 0.1 Pa, co oznacza, że nie nadają się one do pomiarów prędkości powietrza poniżej 1 m/s.

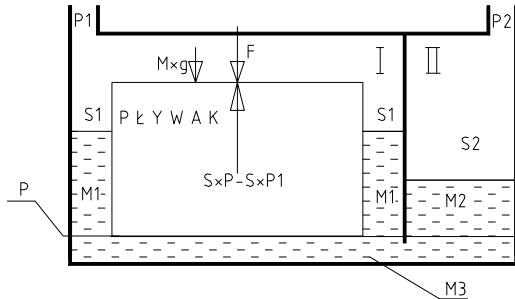
Jeśli pozostajemy przy naszych wymaganiach i przy manometrach cieczowych wypełnionych wodą, to zmiany poziomu wody powinny być oznaczane z dokładnością lepszą niż 0.01 mm. Praca ta ma na celu zasugerowanie kierunku działań dla zrealizowania takiego zadania.

2. Założenia konstrukcyjne

Pomiar różnicy ciśnień sprowadza się do pomiarów poziomów luster słupów cieczy manometrycznej w układzie naczyń połączonych. W jednym z tych naczyń lokujemy pionowy cylinder częściowo zanurzony w cieczy manometrycznej, który będzie dalej określany słowem pływak. Zmiany siły wyporu działającej na pływak kompensowane są przy pomocy dynamometru [3, 4] który jednocześnie pełni dwie funkcje: unieruchamia pływak, oraz kompensuje i mierzy siłę wyporu działającą na pływak. Siła wyporu, a zatem i wskazania dynamometru zależą od poziomu cieczy manometrycznej. Jest to podstawą zasady pomiaru różnicy ciśnień w manometrze którego schemat przedstawia rysunek 1, przy czym zakłada się spełnienie następujących warunków:

- ścianki obu naczyń połączonych są zorientowane pionowo,
- powierzchnie lustra cieczy w obu naczyniach są stałe niech wynoszą S_1 i S_2 ,
- ciśnienia gazu nad powierzchnią cieczy w obu naczyniach wynoszą P_1 i P_2 ,
- ciśnienie na poziomie denka pływaka wynosi P ,

- w jednym z naczyń znajduje się pionowy cylindryczny pływak o powierzchni podstawy S , masie m ,
- pływak jest utrzymywany w stałej wysokości poprzez dynamometr generujący siłę F która kompensuje zmiany siły wyporu działającej na pływak,
- współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej ścianek naczynia i pływaka wynosi α ,
- współczynnik objętościowej rozszerzalności cieplnej cieczy wynosi β ,
- temperatura w całej objętości obu naczyń połączonych jest stała.



Rys. 1. Schemat manometru

3. Ocena wpływu zmian temperatury na wskazania manometru

Ciecz wypełniająca naczynia manometru przedstawionego na rysunku 1 dzieli na trzy części o masach M_1 , M_2 , M_3 . Części pierwsza i druga zawarte są w naczyniach I i II ponad płaskim dnem pływaka. Część trzecia, o masie M_3 , wypełnia objętość zawartą V poniżej podstawy pływaka. Sumaryczna masa M cieczy wprowadzonej do manometru jest stała.

Warunek równowagi pływaka ma postać:

$$F + mg = S(P - P_1) \quad (1)$$

gdzie: F - siła generowana w dynamometrze,
 mg - ciężar pływaka,
 P - ciśnienie jakie panuje na poziomie podstawy pływaka,
 P_1 - ciśnienie jakie panuje ponad lustrem wody,
 S - pole przekroju pływaka.

Z warunków równowagi mamy:

$$P_2 - P_1 = g \left(\frac{M_1}{S_1} - \frac{M_2}{S_2} \right) \quad (2)$$

gdzie: S_1 , S_2 - powierzchnie lusterek cieczy w naczyniu I i II.

Uwzględniając rozmiary naczyń, bilans masy wody oraz cieplną rozszerzalność naczyń i cieczy manometrycznej mamy:

$$P_2 - P_1 = \frac{1}{(1 + 2\alpha\Delta T)} \left(\frac{(F + mg)}{S} \left(1 + \frac{S_1}{S_2} \right) - \frac{Mg}{S_2} - \frac{V(1 + 3\alpha\Delta T)\rho g}{(1 + \beta\Delta T)S_2} \right) \quad (3)$$

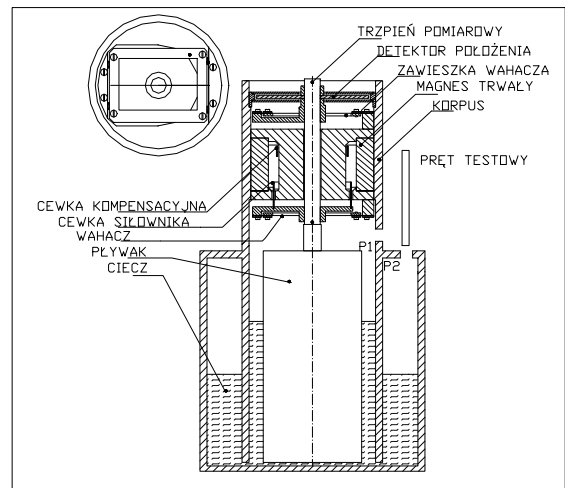
gdzie: V , S , S_1 , S_2 i ρ odnoszą się do temperatury T ,
 ΔT - przyrost temperatury miernika,
 α - współczynnik termicznej rozszerzalności liniowej naczyń,
 β - współczynnik termicznej rozszerzalności objętościowej cieczy manometrycznej

Jeśli objętość V części naczyń połączonych leżąca poniżej denka pływaka jest wystarczająco mała aby można było zaniedbać ostatni człon wzoru (3), to wpływ zmian temperatury na wskazania manometru wyznacza wyłącznie współczynnik rozszerzalności liniowej naczyń.

Nieskompensowane zmiany temperatury nie są jedynymi źródłami niepewności pomiarów. Znaczny wpływ mają między innymi siły generowane napięciem powierzchniowym i ciężar wody zwilżającej ścianki pływaka. Rozpoznanie skali tych zakłóceń oraz metod ich minimalizacji wymaga dodatkowych badań które nie będą uwzględniane w tej pracy.

4. Prototyp

Prototyp manometru różnicowego zbudowany został według szkicu przedstawionego na rysunku 2.



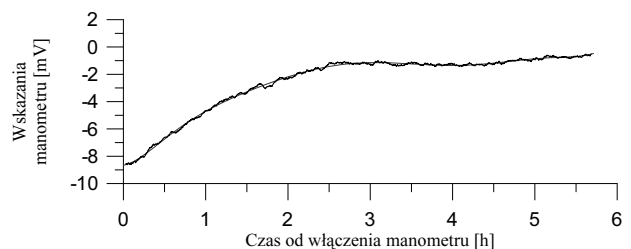
Rys. 2. Szkic prototypu manometru

Aby uzyskać lepsze wyrównanie temperatur w objętości miernika zastosowano koncentryczny układ naczyń połączonych. Powierzchnie lusterek wody w obu naczyniach połączonych (S_1 , S_2) oraz pole przekroju pływaka S wynoszą:

$$S_1 = 9.88 \text{ cm}^2 \quad S_2 = 19.125 \text{ cm}^2 \quad S = 28.27 \text{ cm}^2$$

4.1. Testowanie manometru - stabilność wskazań

Pierwszy z testów manometru miał na celu zbadanie stabilności wskazań. Napełniono manometr wodą. Następnie, po upływie 24 h uruchomiono dynamometr i w czasie 4 h rejestrowano wskazania dynamometru oczekując na ustanie pełzania wskazań towarzyszących „nagrzewaniu” urządzenia. Rezultat jest przedstawiony na rysunku 3. Po upływie około 2 godzin od włączenia manometru jego wskazania stabilizują się w przedziale o szerokości około 1 mV co jest równoważne niepewności pomiaru ciśnienia około +/-0.01 Pa.



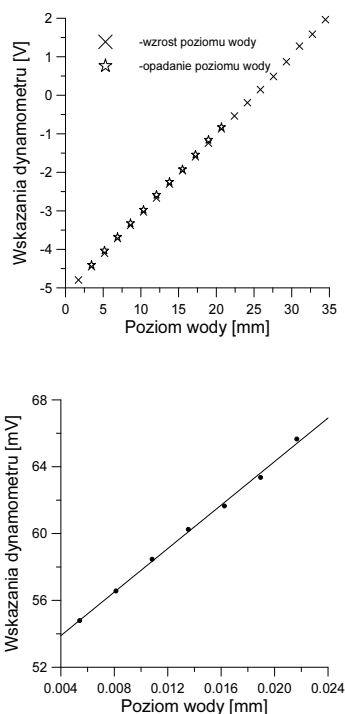
Rys. 3. Drif napięcia wskazania dynamometru po uruchomieniu

Okres 24 h od momentu napełnienia manometru potrzebny jest dla ustania procesów penetracji wody na ściankach i innych elementach manometru. Stabilność wskazań manometru wydaje się zależeć w głównej mierze od zjawisk zachodzących na granicy ciecz - ciało stałe. Istotna może okazać się optymalizacja szczegółów obróbki i wykańczania powierzchni detali manometru w szczególności ścianek pływaków.

4.2. Testowanie manometru - liniowość wskazań

Ze względu na brak dostępu do atestowanego źródła różnicy ciśnień, liniowość wskazań manometru badana była w sposób pośredni. Badano reakcję manometru na kontrolowane zmiany poziomu wody. Zmiany te wywoływane były na dwa sposoby. Duże zmiany wywoływane były wprowadzaniem odmierzonej ilości wody do manometru. Subtelne manipulowanie poziomem wody w manometrze uzyskiwano wprowadzając do jego wnętrza kontrolowany odcinek pręta o znanej średnicy. Znajac sumaryczną powierzchnię luster wody w naczyniach manometru (29 cm^2) można było określić wartość wywołanych w ten sposób zmian poziomu wody.

Na rysunku 4 przedstawione zostały charakterystyki manometru pracującego jako miernik poziomu wody. Pomiary prowadzone były w dwu przedziałach zmian poziomu wody 0 - 35 mm i 0 - 0.024 mm słupa wody. W przedziale 0 - 35 mm odpowiedź dynamometru na zmiany poziomu wody jest liniowa. Brak wyraźnej histerezy pomiędzy wskazaniami dla narastających i opadających poziomu wody wydaje się wskazywać na ograniczony wpływ zmian napięcia powierzchniowego wody wywołanych zmianą kierunku przemieszczania się lustra wody.

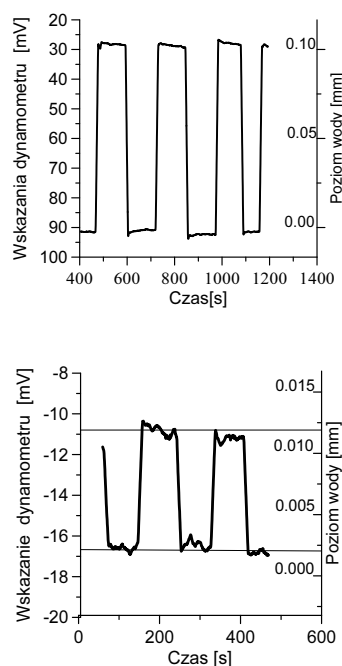


Rys. 4. Charakterystyki manometru pracującego jako miernik poziomu wody

Charakterystyka w przedziale 0 - 0.025 mm sporządzona została przy 3-krotnie zwiększonym wzmocnieniu wskazań dynamometru. Podobnie w zakresie 0 - 35 mm ma ona liniowy charakter. Dalsze testy prowadzone były przy powiększonym wzmocnieniu dynamometru.

4.3. Testowanie manometru - rozdzielczość

Kolejnym testem badanego prototypu manometru było sprawdzenie reakcji na niewielkie zmiany poziomu wody wprowadzonej do jego wnętrza. Zmiany poziomu wody były wywoływane przez wprowadzanie i usuwanie odcinka pręta testowego do zewnętrznego naczynia (patrz rys. 2). Wprowadzenie 23 mm pręta o średnicy 4 mm wywołuje zmianę poziomu wody o 0.1 mm. W przypadku odcinka 37 mm drutu o średnicy 4 mm generuje się zmiany poziomu wody o 0.01 mm. Wyniki zostały przedstawione na wykresach na rysunku 5. Wyraźna odpowiedź manometru na skoki poziomu wody o 0.01mm wskazuje, że spełnia on warunek pozwalający na pomiary różnic ciśnienia z dokładnością około 0.1 Pa. Rokuje to szansę przy pomiarach prędkości powietrza przy pomocy rurki spiętrzeniowej na zejście poniżej prędkości 1 m/s.



Rys. 5. Reakcja dynamometru na skokowe zmiany poziomu wody

5. Wnioski

Właściwości prezentowanego urządzenia pomiarowego są na tyle zachęcające, że skłaniają do dalszej pracy nad tym projektem. W przedstawionej wersji powinien on pozwalać na pomiary prędkości powietrza w przedziale 0.3 - 20 m/s. Wymaga on jednak dalszych badań w kierunku:

- właściwości powierzchniowych materiału z jakiego został wykonany (hydrofobowość/hydrofilność),
- właściwości cieczy - napięcie powierzchniowe,
- możliwości rozszerzenia zakresu pomiarowego.

6. Literatura

- [1] Świadectwo Wzorcowania nr 518-M34-97-1/04, Główny Urząd Miar, 16.07.2004
- [2] Świadectwo Wzorcowania nr 339-M34-04/75-1, Główny Urząd Miar, 14.06.2004
- [3] J. Topolnicki, Dynamometer with a electromagnetic actuator, PAK 2006
- [4] J. Topolnicki (1988) Dynamometr elektryczny, Świadectwo autorskie nr 142491 Urząd patentowy PRL