

nr 1 do 4, następnie ponownie termoelementy sprawdzane od nr 4 do 1 oraz termoelement kontrolny. Jako wynik pomiaru przyjmuje się średnią arytmetyczną obu odczytów. Do pomiarów stosuje się kompensator klasy $\sigma_{\max} = 0,05\%$ lub wyższej. Wartość dopuszczalnych odchyłek podano w tablicy 2.9.

3. POMIARY CIŚNIEŃ

Ciśnienie, podobnie jak temperatura, jest podstawową wielkością określającą stan termodynamiczny ciała i dlatego pomiary ciśnienia są nieodłącznym elementem wszystkich pomiarów bilansowych w technice cieplnej.

3.1. POJĘCIA PODSTAWOWE

Ciśnienie w ogólnym przypadku definiuje się jako granicę stosunku siły normalnej do wartości pola powierzchni przy założeniu, że wartość pola powierzchni dąży do zera

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta A} = \frac{\partial F_n}{\partial A}, \quad (3.1)$$

gdzie:

F_n - składowa siły prostopadła do powierzchni A ,

A - pole powierzchni.

W układzie SI podstawową jednostką ciśnienia jest paskal (Pa). Jest to ciśnienie jakie wywiera siła 1 N równomiernie rozłożona i prostopadła do powierzchni 1 m², a zatem

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2.$$

W technicznym zbiorze jednostek miar stosowano jako jednostkę podstawową 1 kilogram siły na metr kwadratowy 1 kg/m².

W praktyce operowano atmosferą techniczną

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kg/cm}^2 = 10^4 \text{ kg/m}^2 = 98066,5 \text{ Pa}.$$

Oprócz wymienionych jednostek stosowano niekiedy jednostki niespójne (pozaukładowe) wyrażające ciśnienie wysokością słupa cieczy, który je równoważył. Ciśnienie wywierane przez słup cieczy wynosi

$$p = h \rho g, \quad \text{Pa}, \quad (3.2)$$

gdzie:

h - wysokość słupa cieczy manometrycznej, m,

ρ - gęstość cieczy manometrycznej, kg/m^3 ,

g - przyspieszenie ziemskie, m/s^2 .

Najczęściej stosowane są dwie cieczy manometryczne i dlatego ciśnienie wyrażane w:

- milimetrach lub metrach słupa wody ($\text{mm H}_2\text{O}$, $\text{m H}_2\text{O}$),
- milimetrach słupa rtęci (mm Hg), które zwane są torami (Tr).

Dla określenia umownych warunków fizycznych stosowana bywa jako jednostka atmosfera fizyczna (Atm). Jest to ciśnienie jakie wywiera słup rtęci o gęstości $\rho_{\text{Hg}} = 13595,1 \text{ kg/m}^3$ (w 0°C) i wysokości 760 mm w miejscu, gdzie panuje normalne przyspieszenie ziemskie $g_0 = 9,80665 \text{ m/s}^2$

$$1 \text{ Atm} = 101\,325 \text{ Pa}.$$

W literaturze bywa również stosowana jednostka ciśnienia zwana barem

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} \approx 1,02 \text{ at}.$$

Bar nie należy do jednostek układu SI, jest on jednak stosowany ze względu na zbliżoną wartość liczbową do atmosfery technicznej.

Przy określaniu wartości ciśnienia stosuje się trzy pojęcia w zależności od przyjętego poziomu odniesienia: ciśnienie absolutne, nadciśnienie i podciśnienie.

|| Ciśnienie bezwzględne jest w odniesieniu do próżni absolutnej i określone jako p_a .

|| Nadciśnieniem określa się różnicę pomiędzy ciśnieniem bezwzględnym p_a a ciśnieniem atmosferycznym p_b w przypadku, gdy $p_a > p_b$

$$\Delta p_n = p_a - p_b. \quad (3.3)$$

Podciśnienie jest to różnica ciśnienia atmosferycznego p_a i ciśnienia bezwzględnego p_b wówczas, gdy $p_a < p_b$

$$\Delta p_p = p_b - p_a. \quad (3.4)$$

Ciśnienie całkowite p_c przepływającego płynu określają dwie składowe - ciśnienie statyczne p_s i ciśnienie dynamiczne p_d .

Wartość ciśnienia całkowitego oblicza się za pomocą wzoru

$$p_c = p_s + p_d. \quad (3.5)$$

Ciśnieniem statycznym nazywa się ciśnienie płynu znajdującego się w spoczynku lub w ruchu ustalonym wskazywane przez manometr poruszający się z tą samą prędkością i zgodnie z kierunkiem ruchu płynu.

Ciśnienie dynamiczne oblicza się z zależności

$$p_d = \frac{w^2}{2} \rho, \quad \text{Pa}, \quad (3.6)$$

gdzie:

w - prędkość przepływającego płynu, m/s,

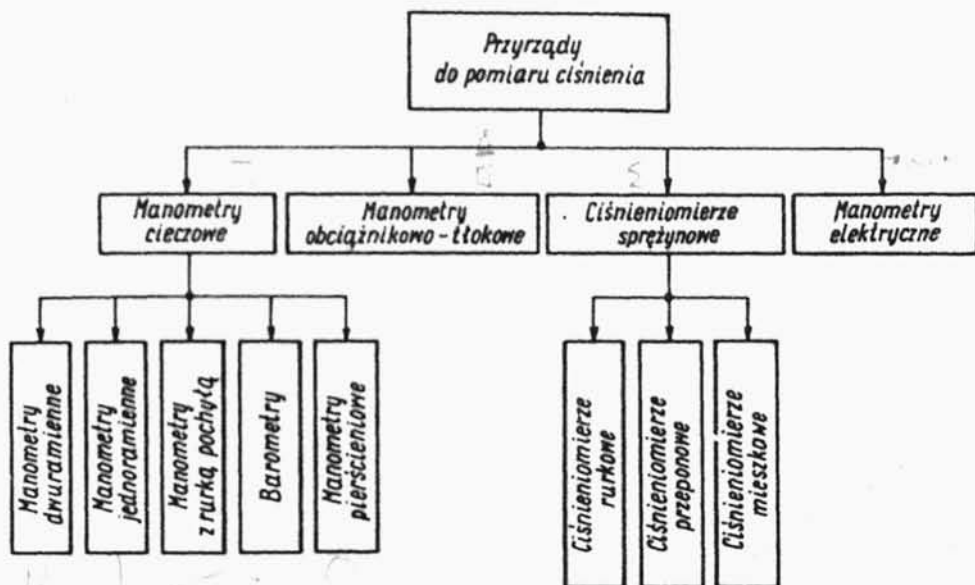
ρ - gęstość płynu, kg/m³,

3.2. RODZAJE PRZYRZĄDÓW DO POMIARU CIŚNIENIA

Ogólny podział przyrządów do pomiaru ciśnienia uwzględniający zasadę budowy i działania pokazano na rys.3.1. Podstawą klasyfikacji może być również przeznaczenie przyrządów i rozróżniamy wówczas:

- manometry do pomiaru nadciśnienia,
- wakuometry do pomiaru podciśnienia,
- manowakuometry do pomiaru nadciśnienia i podciśnienia,
- ciągomierze do pomiaru małych podciśnień,
- mikromanometry do pomiaru małych nadciśnień i podciśnień,
- barometry do pomiaru ciśnienia atmosferycznego.

Ze względu na dokładność i ewentualne przeznaczenie, manometry można podzielić na: techniczne, precyzyjne, laboratoryjne, wzorcowe.



Rys.3.1. Podział ogólny ciśnieniomierzy

3.2.1. MANOMETRY CIECZOWE (HYDROSTATYCZNE)

Manometry cieczowe z bezpośrednimi wskazaniami mają szerokie zastosowanie w pomiarach natężenia przepływu cieczy metodą zwężkową, poziomu cieczy metodą hydrostatyczno-pneumatyczną i przy pomiarach laboratoryjnych. Wadą ich jest brak możliwości rejestracji wskazań oraz przekazywania danych na odległość.

W tej grupie przyrządów cieczowych rozróżnia się manometry dwuramienne, jednoramienne i z rurką pochyłą. Miara ciśnienia (różnicy ciśnień) jest różnica poziomów cieczy w dwóch rurkach będących naczyniami połączonymi.

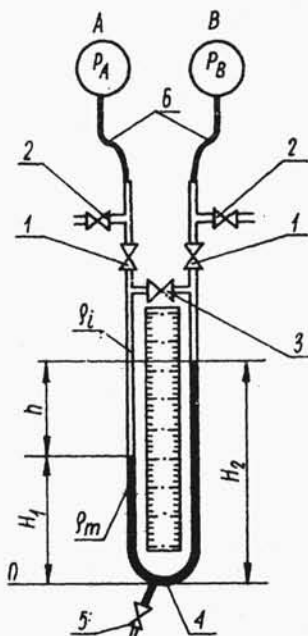
Jako ciecze manometryczne stosuje się najczęściej czystą lub zabarwioną wodę, rtęć, alkohol etylowy. W sprzedaży znajdują się również "firmowe" ciecze manometryczne:

czerwona - $\rho = 878 \pm 3 \text{ kg/m}^3$,
niebieska - $\rho = 1250 \pm 3 \text{ kg/m}^3$,
zielona - $\rho = 1670 \pm 3 \text{ kg/m}^3$.

Gęstość wody i rtęci zależy od ich temperatury. Gęstości tych cieczy w zależności od temperatury podano w tablicy 3.1.

Manometry dwuramienne wykonane są z rurki szklanej uformowanej w kształcie litery U i do połowy wypełnionej cieczą manometryczną. Manometry te napełnia się najczęściej wodą, rtęcią lub alkoholem etylowym. Schemat ideowy manometru dwuramiennego po-

kazano na rys.3.2.



Rys.3.2. Schemat ideowy manometru dwuramiennego typu MUR: 1 - zawór odcinający, 2 - zawór odpowietrzający, 3- zawór wyrównawczy, 4 - ciecz manometryczna, 5 - zawór spustowy, 6 - przewody impulsowe

W przypadku gdy płynem impulsowym jest ciecz, przed przystąpieniem do pomiarów należy odpowietrzyć manometr. Jeżeli płynem impulsowym jest gaz należy usunąć ewentualnie powstałe skropliny w przewodach impulsowych i sprawdzić drożność przewodów. Podane czynności wykonuje się przez kolejne otwieranie zaworów odpowietrzających 2. Po zamknięciu zaworów odpowietrzających, należy otworzyć zawór wyrównawczy 3, a następnie powoli zawory odcinające 1. Po zamknięciu zaworu wyrównawczego 3 manometr jest gotów do pracy. Co pewien okres należy sprawdzać położenie zerowe manometru. W tym celu należy otworzyć zawór wyrównawczy i zamknąć zawory odcinające. Poziom cieczy w obydwu ramionach powinien być równy. W przypadku napełniania manometru rtęcią należy

zwrócić szczególną uwagę na przepisy BHP, gdyż zarówno rtęć metaliczna, jak i jej pary są silnie trujące. Napełnianie lub opróżnianie manometru powinno być wykonywane w laboratorium rtęciowym. W przypadku braku takiego laboratorium czynności te należy wykonywać nad dużym płaskim naczyniem wypełnionym wodą. Rozlane drobne krople rtęci można łatwo zebrać za pomocą gumowej gruszki. Wskazane jest również instalowanie płaskiego naczynia - o ile to możliwe - poniżej miejsca pracy manometru.

Tablica 3.1

Gęstość wody i rtęci w zależności od temperatury
(dla ciśnienia $p = 101\,325\text{ Pa}$)

Rodzaj cieczy manometrycznej		Temperatura °C						
		0°	2°	4°	6°	8°	10°	12°
woda	kg/m ³	999,87	999,97	1000,0	999,97	999,88	999,72	999,52
rtęć	kg/m ³	13595,1	13590,1	13585,2	13580,2	13575,3	13570,4	13565,4

14°	16°	18°	20°	22°	24°	26°	28°	30°
999,27	998,97	998,62	998,23	997,80	997,32	996,81	996,26	995,67
13560,5	13555,6	13550,7	13545,7	13540,8	13535,9	13531,0	13526,1	13521,2

Różnicę ciśnień wskazywaną przez manometr oblicza się za pomocą następującego wzoru

$$\Delta p = p_A - p_B = (H_2 - H_1)(\rho_m - \rho_1) g, \quad \text{Pa} \quad (3.7)$$

lub

$$\Delta p = h(\rho_m - \rho_1) g, \quad \text{Pa}, \quad (3.8)$$

gdzie:

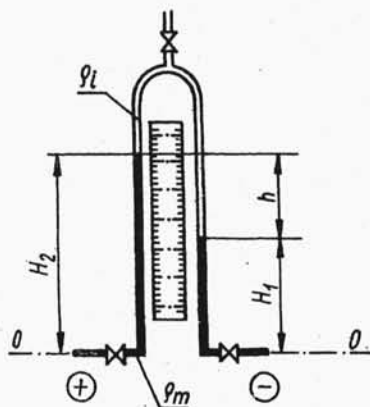
- p_A, p_B - ciśnienie panujące w zbiornikach A i B, Pa,
- H_1, H_2 - wysokość słupa cieczy manometrycznej względem poziomu odniesienia O - O, m,
- h - różnica wysokości słupów cieczy manometrycznej,
 $h = H_2 - H_1$, m,
- ρ_m - gęstość cieczy manometrycznej, kg/m^3 ,
- ρ_1 - gęstość płynu impulsowego, kg/m^3 ,

Jeżeli podzielnia manometru ma kreskę zerową w połowie swej wysokości, to wartość h oblicza się za pomocą wzoru

$$h = h_1 + h_2, \quad \text{m},$$

gdzie:

- h_1 - obniżenie poziomu rtęci poniżej kreski zerowej, m,
- h_2 - podniesienie poziomu rtęci w drugim ramieniu powyżej kreski zerowej, m.



Rys. 3.3. π - rurka do pomiaru różnicy ciśnień cieczy (oznaczenia jak na rys. 5.2)

Gęstość płynu impulsowego można w pewnych przypadkach pominąć w obliczeniach. Jeżeli przewody impulsowe wypełnione są gazem, a manometr cieczą (np. wodą), to błąd wynikający z takiego uproszczenia wynosi ok. 1%, a zatem w pomiarach technicznych uproszczenie takie jest dopuszczalne. W pomiarach dokładnych, w celu określania gęstości płynu impulsowego ρ_1 dla powietrza, można korzystać z rys. 11.4, zaś dla wody z tablicy 3.1. Najbardziej rozpowszechn-

niowymi manometrami dwuramiennymi są przyrządy typu MUR o zakresach pomiarowych $h = 760$ lub 1200 mm. Błąd odczytu wynosi ok. 1 mm słupa cieczy manometrycznej. Przyjmując dla pomiarów technicznych dokładność $3 \div 4\%$, otrzymuje się, że minimalna wielkość spiętrzenia dla manometrów dwuramiennych wynosi ok. 25 mm. Zwiększoną dokładność odczytu do $0,1$ mm można otrzymać, stosując podziałkę z noniuszem. Manometr typu MUR przystosowany jest do napełniania rtęcią lub wodą.

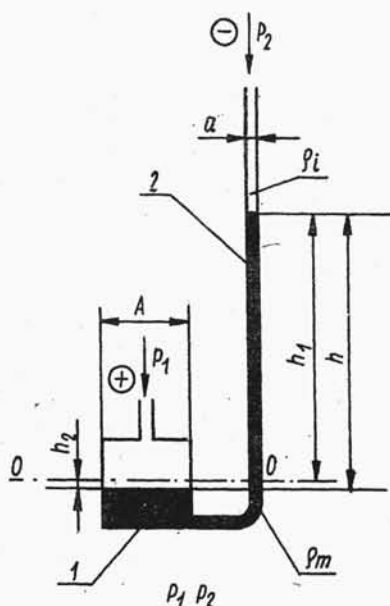
Odmianą manometru dwuramiennego jest π -rurka (rys. 3.3). Jest to odwrócony manometr U-rurkowy, do pomiaru niewielkich różnic ciśnienia cieczy. W przestrzeni zamkniętej nad cieczą znajduje się najczęściej powietrze. Różnicę ciśnień oblicza się za pomocą wzoru (3.8).

Manometry jednoramienne (rys. 3.4) są zbudowane w ten sposób, że pole przekroju jednego ramienia zostało znacznie powiększone, dzięki czemu wahania poziomu cieczy w tym ramieniu są niewielkie. Pomiar sprowadza się do jednego odczytu, co jest wygodniejsze niż w manometrach dwuramiennych; zmniejsza się również błąd pomiaru, szczególnie przy pomiarach szybko zmiennej różnicy ciśnień. Wartość różnicy ciśnień oblicza się ze wzoru

$$\Delta p = p_1 - p_2 = h(\rho_m - \rho_i)g, \quad \text{Pa}, \quad (3.9)$$

ale

$$h = h_1 + h_2$$



Rys. 3.4. Schemat ideowy manometru jednoramiennego:
1 - zbiornik cieczy manometrycznej, 2 - ramię pomiarowe

oraz

$$h_1 a = h_2 A,$$

zatem

$$\Delta p = h_1 \left(1 + \frac{a}{A}\right) (\rho_m - \rho_i) g, \quad \text{Pa}, \quad (3.10)$$

gdzie:

a - pole wewnętrznego przekroju poprzecznego rurki manometrycznej, m^2 ,

A - pole wewnętrznego przekroju naczynia, m^2 ,

Pozostałe oznaczenia jak we wzorze (3.8).

Do najbardziej rozpowszechnionych manometrów jednoramien-nych należą przyrządy typu MIR o zakresie pomiarowym 760 lub 1200 mm. Podziałka manometru może być milimetrowa (równomier-na) lub niemilimetrowa, tzn. skrócona w stosunku $1/(1 + a/A)$. W tym ostatnim przypadku wynik odczytuje się w mm Hg bez konieczności przeliczania. Dla manometrów MIR stosunek $a/A = 0,0022$, co w przypadku pominięcia mnożnika $(1 + a/A)$ powoduje powstawanie dodatkowego błędu systematycznego $\sim 0,22\%$. W pomiarach technicznych takie uproszczenie jest zatem dopuszczalne. Wadą opisanych manometrów jest dokładność odczytu różnicy ciśnień nie przekraczająca 0,5 mm.

Manometry z rurką pochyłą są stosowane do pomiaru naj-niższych ciśnień, względnie różnicy ciśnień. Zwiększoną do-kładność pomiaru uzyskano przez odczyt długości słupka cie-czy w rurce nachylonej pod kątem α do poziomu. Schemat idea-owy manometru z rurką pochyłą pokazano na rys.3.5, zaś sposób prawidłowego odczytu długości słupa cieczy na rys.3.6. Róż-nicę ciśnień obliczamy ze wzoru

$$\Delta p = p_1 - p_2 = h(\rho_m - \rho_i)g = (h_1 + h_2)(\rho_m - \rho_i)g, \quad (3.11)$$

ale

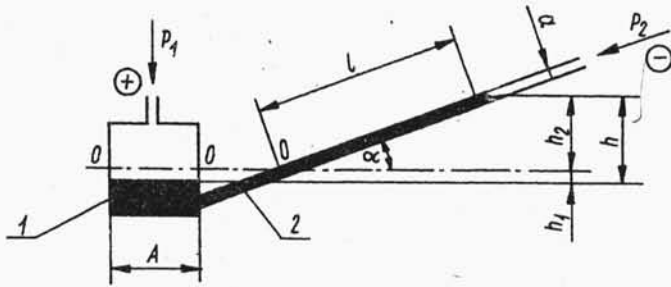
$$h_1 A = l a \quad (3.12)$$

oraz

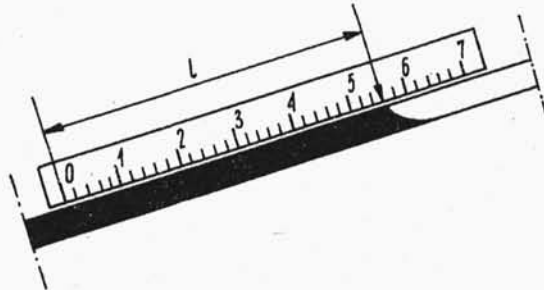
$$h_2 = l \sin \alpha, \quad (3.13)$$

zatem

$$\Delta p = p_1 - p_2 = l(\sin \alpha + a/A)(\rho_m - \rho_i)g, \quad (3.14)$$



Rys.3.5. Schemat ideowy manometru z rurką pochyłą: 1 - zbiornik cieczy manometrycznej, 2 - pochyłe ramię pomiarowe



Rys.3.6. Sposób prawidłowego odczytu długości słupka cieczy w mikromanometrach z pochyłą rurką

przyjmując $n = \sin \alpha + a/A$ jako przełożenie mikromanometru otrzymuje się

$$\Delta p = l n (\rho_m - \rho_i) g, \quad \text{Pa}, \quad (3.15)$$

gdzie:

l - długość słupa cieczy manometrycznej, mm,

n - przełożenie mikromanometru,

ρ_m - gęstość cieczy manometrycznej, g/cm^3 ,

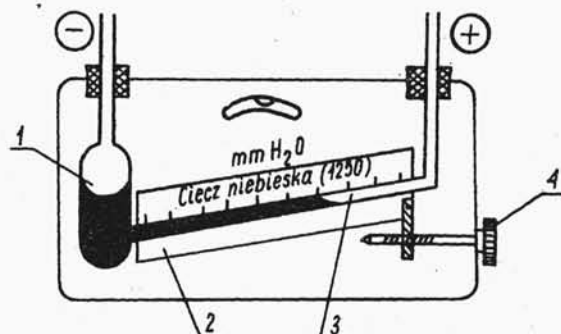
ρ_i - gęstość płynu impulsowego, g/cm^3 ,
(ρ_i dla powietrza można odczytać z rys.11.4)

g - przyspieszenie ziemskie, m/s^2 .

Ponieważ manometry z rurką pochyłą używane są do pomiaru różnicy ciśnienia gazu, zatem przy pomiarach mniej dokładnych

można pominąć wpływ gęstości płynu impulsowego ($\rho_i \approx 0$). Błąd wynikający z tego uproszczenia wynosi ok. 0,1%. Do najbardziej rozpowszechnionych manometrów z rurką pochyłą należy ciągomiernik Krëlla i mikromanometr Recknagla.

Ciągomiernik Krëlla (rys.3.7) mający stałe przełożenie n i podziałkę w mm H_2O jest przyrządem przeznaczonym do pomiarów technicznych. Manometr ten stosuje się do pomiaru podciśnienia w przewodach spalinowych. Przyrząd należy napełniać

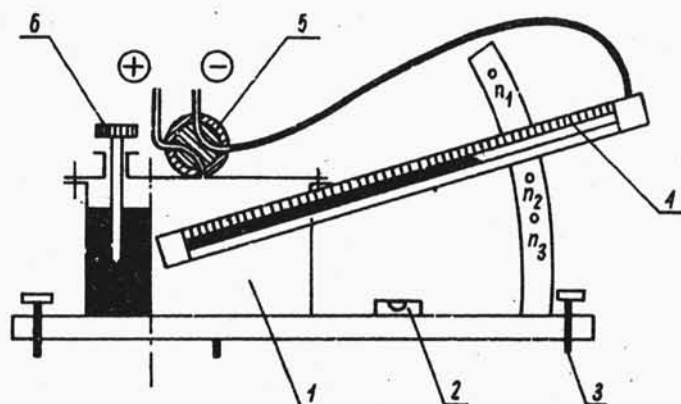


Rys.3.7. Ciągomiernik Krëlla: 1 - zbiornik cieczy manometrycznej, 2 - podziałnia, 3 - rurka pochyła, 4 - śruba adiustacyjna

cieczą manometryczną, dla której został wykonany. Rodzaj cieczy podany jest na podzielnii przyrządu. Do regulacji położenia zerowego służy śruba adiustacyjna 4 przesuwająca podzielnę 2 względem rurki manometrycznej 3.

Mikromanometr Recknagla jest dokładnym przyrządem laboratoryjnym o zmiennym przełożeniu n . Schemat przyrządu pokazano na rys.3.8. Przyrząd napełnia się najczęściej alkoholem etylowym. Gęstość alkoholu określa się doświadczalnie, np. za pomocą wagi Mohra (p.9.2.1). W praktyce nie ma możliwości otrzymania bezwodnego alkoholu; jego gęstość jest zmienna i zależy od zawartości wody. Z tego powodu gęstość alkoholu nie jest podawana w tablicach, a wyznacza się ją doświadczalnie. Duży wpływ na dokładność pomiaru, szczególnie przy dużych przełożeniach (np. 1:50), ma wstępne poziomowanie przyrządu za pomocą poziomnicy pudełkowej 2 i śrub nastawczych 3. Kurek rozdzielczy 5 ma trzy położenia: Z - zamknięty dopływ ciśnienia do manometru, 0 - pozycja w czasie zerowania przyrządu, P - pomiar.

Do dokładnego nastawiania zera w przyrządzie przy wyrównanych ciśnieniach (kurek w pozycji 0) służy śruba adiustacyjna 6. Klasa dokładności i zakres manometru z rurką pochyłą zależy od przełożenia n . Dane techniczne dla mikromanometru



Rys.3.8. Schemat ideowy mikromanometru Recknagla MPR-4: 1 - zbiornik cieczy manometrycznej, 2 - poziomiczna pudełkowa, 3 - śruba nastawcza, 4 - rurka pochyła, 5 - kurek rozdzielczy, 6 - śruba adiustacyjna

tru MPR-4 napełnionego alkoholem etylowym przy zachowaniu warunków $t = 20^{\circ}\text{C}$, $g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$ podano w tablicy 3.2.

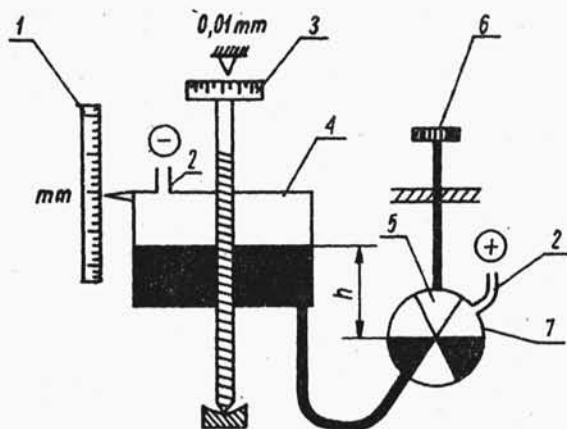
Tablica 3.2

Dane techniczne mikromanometru z rurką pochyłą MPR-4

Przełożenie n	Zakres pomiarowy Pa	Klasa dokładności %
1:1	1600	0,5
1:2	800	
1:5	320	
1:10	160	1,0
1:25	64	1,5
1:50	32	2,5

Mikromanometr kompensacyjny (typu Askania) służy do pomiaru bardzo małych różnic ciśnień. Schemat ideowy przyrządu pokazano na rys.3.9. Jest to manometr cieczowy dwuramienny,

w którym rurki zostały zastąpione dwoma zbiornikami walcowymi (o osi pionowej 4 i osi poziomej 7). Zbiorniki te są połączone elastycznym przewodem. Poziom wody w zbiorniku prawym



Rys.3.9. Mikromanometr kompensacyjny
Askania

7 jest ustalany przez podnoszenie lub opuszczanie zbiornika 4 za pomocą śruby mikrometrycznej 3. Stały poziom w tym naczyniu jest ustawiany za pomocą ostrza 5. Przy zetknięciu ostrza z powierzchnią cieczy obserwator widzi w zwierciadle dwa trójkąty stykające się wierzchołkami. W momencie tym odczytuje się wysokość cieczy h , która równoważy różnicę ciśnień przyłożoną do króćców 2. Odczyt wykonuje się z dokładnością do 1 mm za pomocą podzielnicy pionowej oraz z dokładnością do 0,01 mm za pomocą śruby mikrometrycznej 3. Przed przystąpieniem do pomiarów i przyłączeniem przewodów impulsowych należy ustawić przyrząd poziomo, korzystając z poziomnicy pudełkowej oraz przeprowadzić adiustację. Czynność tę wykonuje się śrubą adiustacyjną 6, przy uprzednim zerowym nastawieniu wskazań na podzielnicy pionowej i śrubie mikrometrycznej. Adiustacja jest zakończona, gdy ostrze 5 zetknie się z powierzchnią cieczy.

Mikromanometr kompensacyjny Askania napełnia się wodą destylowaną i dlatego otrzymane wyniki określają wysokość równoważnego słupa wody ($\text{mm H}_2\text{O}$). Wielkość różnicy ciśnień można obliczyć za pomocą wzoru

$$\Delta p = h(\rho_m - \rho_i)g, \quad \text{Pa}, \quad (3.16)$$

gdzie:

- h - wysokość słupa cieczy manometrycznej, mm,
 ρ_m - gęstość cieczy manometrycznej (wody), g/cm^3 ,
 ρ_i - gęstość płynu impulsowego, g/cm^3 ,
 g - przyspieszenie ziemskie, m/s^2 .

Przy bardzo dokładnych pomiarach należy przy obliczaniu różnicy ciśnień uwzględnić poprawki omówione w p.3.2.2. Zakresy pomiarowe mikromanometrów kompensacyjnych oraz dokładność wskazań podano w tablicy 3.3.

Tablica 3.3

Dane techniczne mikromanometrów kompensacyjnych MK1 i MK2

Typ przyrządu	Zakres pomiarowy Pa	Błąd maksymalny Pa
MK1	1500	0,2
MK2	2500	0,2

Wysoką dokładność pomiaru w mikromanometrach kompensacyjnych uzyskano drogą zwiększenia pola przekroju poprzecznego słupa cieczy manometrycznej, dzięki czemu zmniejszył się wpływ napięcia powierzchniowego cieczy. Wadą tych mikromanometrów jest konieczność ręcznego regulowania przyrządu przy każdym odczycie i dlatego stosuje się je głównie do pomiarów ciśnień stałych lub wolnozmiennych w laboratoriach.

Manometry pierścieniowe - wagi pierścieniowe

Ideowy schemat manometru pierścieniowego pokazano na rys. 3.10. Elementem pomiarowym przyrządu jest pierścień podzielony na dwie części za pomocą szczelnej przegrody oraz cieczy manometrycznej, która spełnia rolę zaworu hydraulicznego. W górnej części komór powstałych w wyniku podziału przyłącza się elastyczne przewody impulsowe. Pierścień jest podparty w punkcie O za pomocą łożyska nożowego. Pod wpływem przyłożonej różnicy ciśnień nastąpi przesunięcie cieczy manometrycznej oraz obrót pierścienia o kąt φ . Różnica wysokości cieczy w obu ramionach h równoważy przyłożoną różnicę ciśnień, tzn.