

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

gdzie:

- $h$  - wysokość słupa cieczy manometrycznej, mm,  
 $\rho_m$  - gęstość cieczy manometrycznej (wody),  $\text{g/cm}^3$ ,  
 $\rho_i$  - gęstość płynu impulsowego,  $\text{g/cm}^3$ ,  
 $g$  - przyspieszenie ziemskie,  $\text{m/s}^2$ .

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  $\varphi$ . Różnica wysokości cieczy w obu ramionach  $h$  równoważy przyłożoną różnicę ciśnień, tzn.

$$\Delta p = p_1 - p_2 = h(\rho_m - \rho_1)g, \quad \text{Pa.} \quad (3.17)$$

Ponieważ manometry pierścieniowe są zasadniczo przeznaczone do pomiaru różnicy ciśnień gazów, zatem  $\rho_1 \ll \rho_m$  i można stosować wzór uproszczony

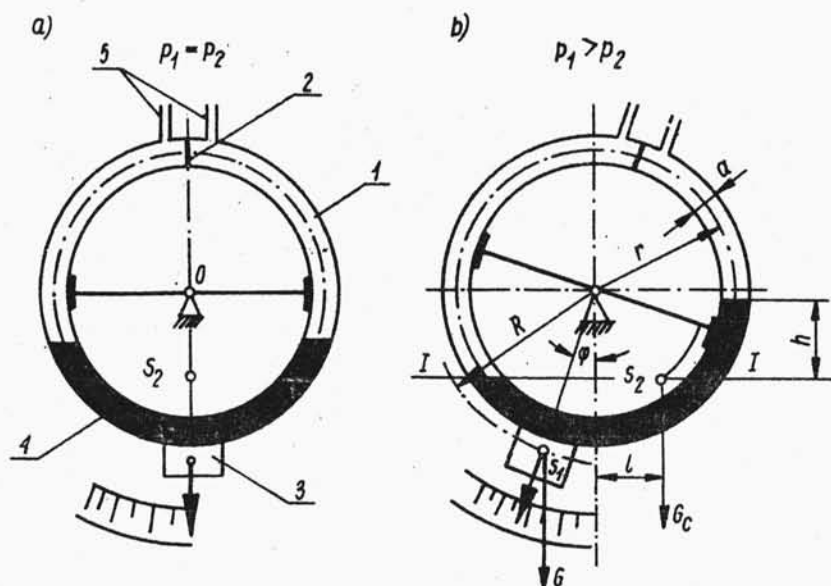
$$\Delta p = h \rho_m g, \quad \text{Pa,}$$

gdzie:

$h$  - różnica poziomów cieczy, m,

$\rho_m$  - gęstość cieczy manometrycznej,  $\text{kg/m}^3$ ,

$g$  - przyspieszenie ziemskie,  $\text{m/s}^2$ .



Rys.3.10. Manometr pierścieniowy: 1 - pierścień, 2 - szczelna przegroda, 3 - obciążniki dodatkowe, 4 - ciecz manometryczna, 5 - przewody impulsowe

Obrót pierścienia o kąt  $\varphi$  wywołany jest parciem płynów, wypełniających przyrząd, na wewnętrzną powierzchnię jego ścianek. Wypadkowa siła parcia  $G_c$  jest równa ciężarowi cieczy wypełniającej przyrząd, przechodzi przez środek ciężkości cieczy  $S_2$  i jest skierowana ku dołowi (rys.3.10b). Moment wywołany przez tę siłę można wyrazić równaniem

$$M_c = m_c g l = m_{c1} g l_1 + m_{c2} g l_2, \quad (3.18a)$$

gdzie:

$m_{c1}$  - masa cieczy znajdującej się w pierścieniu poniżej poziomu I - I,

$m_{c2}$  - masa cieczy powyżej poziomu I - I,

$l_1$  - odległość środka ciężkości cieczy o masie  $m_{c1}$  od osi pionowej,

$l_2$  - odległość środka ciężkości cieczy o masie  $m_{c2}$  od osi pionowej.

Jak wynika z rysunku odległość  $l_1 = 0$ , zatem

$$M_c = m_{c2} g l_2 = h a \varrho_m g \frac{r}{k}, \quad (3.18b)$$

gdzie:  $q$

$a$  - pole przekroju poprzecznego pierścienia,

$\varrho_m$  - gęstość cieczy manometrycznej,

$r$  - promień pierścienia,

$k$  - współczynnik,  $k = f(\varphi)$ .

Pod wpływem działania momentu  $M_c$  pierścień obraca się, dzięki czemu pojawia się moment równoważący  $M_s$  układu sztywnego, tj. pierścienia z obciążnikami dodatkowymi (bez cieczy manometrycznej)

$$M_s = G R \sin \varphi = m g R \sin \varphi, \quad (3.19)$$

gdzie:

$m$  - masa układu sztywnego,

$R$  - odległość środka ciężkości  $S_1$  układu sztywnego od osi obrotu,

$\varphi$  - kąt obrotu pierścienia.

W stanie równowagi zachodzi zależność

$$M_c = M_s,$$

lub

$$h a \varrho_m g \frac{r}{k} = m g R \sin \varphi,$$

ponieważ

$$h \varrho_m g = \Delta p,$$

zatem

$$\Delta p = \frac{m g R}{a r} k \sin \varphi = Q k \sin \varphi. \quad (3.20)$$

Iloraz  $\frac{m g R}{a r} = Q$  nazywa się stałą przyrządu.

Ponieważ manometry pierścieniowe stosuje się do pomiaru niewielkich różnic ciśnienia oraz ciecz manometryczna wypełnia prawie połowę pierścienia, współczynnik  $k$  ma wartość zbliżoną do jedności. Wielkość różnicy ciśnień  $\Delta p$  jest proporcjonalna do stałej przyrządu  $Q$  i sinusa kąta obrotu  $\varphi$ .

Zmianę zakresu pomiarowego manometrów pierścieniowych uzyskuje się przez zwiększenie lub zmniejszenie masy obciążników dodatkowych  $\Sigma$ . Jako ciecze manometryczne stosuje się: naftę, wodę lub rtęć. Zaletą manometrów pierścieniowych jest duży moment obrotowy, który powstaje w czasie pomiaru, dzięki czemu przyrządy te bywają stosowane w rejestratorach z mechanicznym przekazywaniem wskazań. Niektóre przyrządy wyposażone są w mechaniczne urządzenia pierwiastkujące, które w przypadku pomiaru natężenia przepływu metodą zwężkową umożliwiają stosowanie równomiernej podziałki.

Budowane obecnie manometry pierścieniowe mają górną granicę zakresu pomiarowego od 150 Pa do 25 kPa; dokładność rejestracji wskazań wynosi  $\pm 0,5\%$ . Ze względu na dokładność, zakres roboczy przyrządu wynosi  $30 \div 100\%$  górnej granicy zakresu wskazań.

### 3.2.2. OBLICZENIOWE POPRAWKI DLA MANOMETRÓW CIECZOWYCH HYDROSTATYCZNYCH

Na dokładność pomiaru ciśnienia manometrami cieczowymi mają największy wpływ zmiany temperatury, wartość przyspieszenia ziemskiego w miejscu pomiaru oraz napięcie powierzchniowe cieczy manometrycznej. Zmiany temperatury wpływają na zmianę gęstości cieczy manometrycznej  $\rho_m$ , płynu impulsowego  $\rho_i$  oraz zmianę długości podzielnicy, na której odczytuje się wysokość lub długość słupa cieczy. W bardzo dokładnych pomiarach, oraz przy zastosowaniu mikromanometrów jako przyrządów wzorcowych, należy przy obliczaniu różnicy ciśnienia  $\Delta p$  za pomocą wzorów (3.15) oraz (3.16) gęstość cieczy manometrycz-

nej  $\vartheta_m$  i płynu impulsowego  $\vartheta_i$  przyjmować z tablic dla temperatury pomiaru  $t$ . Wpływ temperatury na rozszerzalność podzielnia oraz wpływ rzeczywistej wartości przyspieszenia ziemskiego ujmuje współczynnik  $A$ , przez który należy przemnożyć otrzymane wyniki ze wzorów (3.15) i (3.16). Wartość współczynnika obliczamy z zależności

$$A = [1 + \alpha(t - 20)] \frac{g}{g_0}, \quad (3.21)$$

gdzie:

$\alpha$  - współczynnik liniowej rozszerzalności termicznej materiału, z którego wykonana jest podzielnia do pomiaru wysokości słupa cieczy manometrycznej,  $K^{-1}$ ,

dla:

stali	$\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,
mosiądzu	$\alpha = 18,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,
duraluminium	$\alpha = 23,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .
szkła laboratoryjnego	$\alpha = 9,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

$t$  - temperatura otoczenia,  $^{\circ}\text{C}$

$g_0$  - wartość przyspieszenia ziemskiego przyjęta do obliczeń różnicy ciśnień,  $\text{m/s}^2$ ,

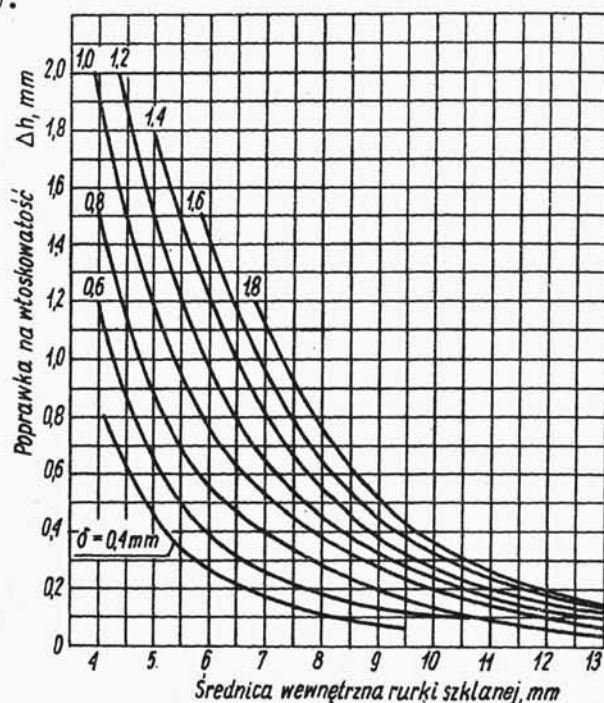
$g$  - przyspieszenie ziemskie w miejscu pomiaru,  $\text{m/s}^2$ , np. dla Warszawy  $g = 9,81227 \text{ m/s}^2$ .

Napięcie powierzchniowe wywołuje zjawisko zwane włoskowatością cieczy. Dokładne ustalenie wielkości błędu wywołanego tym zjawiskiem jest trudne, ponieważ wielkość menisku zależy od stopnia zanieczyszczenia cieczy oraz ścianek manometru w miejscu odczytu. W przypadku zwilżania ścianek manometru przez ciecz tworzy się menisk wklęsły, gdy ciecz nie zwilża ścianek - powstaje menisk wypukły. Ażeby zmniejszyć wpływ zjawiska włoskowatości na pomiar zaleca się stosowanie do budowy manometrów cieczowych rurki o odpowiednio dużych średnicach wewnętrznych:

- dla wody  $d_w \geq 8 \text{ mm}$ ,
- dla alkoholu  $d_w \geq 4 \text{ mm}$ .

W manometrach z rurką pochyłą, ze względu na trudności w odczycie, przyjmuje się  $d_w = 1,5 \div 2 \text{ mm}$ .

W przypadku manometrów cieczowych dwuramiennych wpływ zjawiska włoskowatości może ulec skompensowaniu, wówczas gdy obydwie ramiona mają tę samą średnicę wewnętrzną. Wpływ zjawiska włoskowatości na odczyt w manometrach wypełnionych rtęcią można określić posługując się nomogramem (rys.3.11).



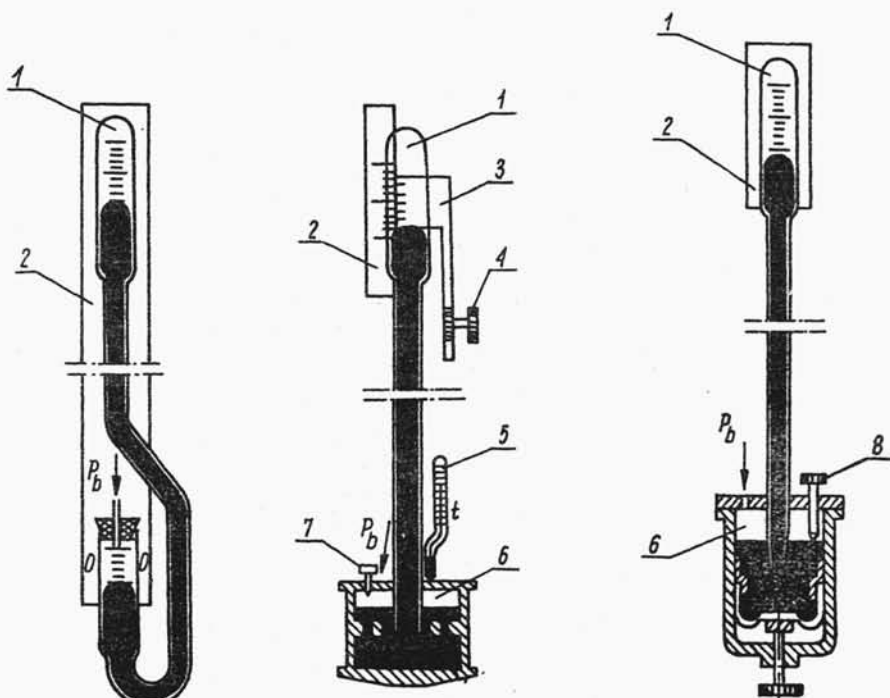
Rys.3.11. Nomogram do określania wartości kapilarnego obniżenia poziomu rtęci w rurkach szklanych:  $\delta$  - wysokość menisku rtęci, mm

Wielkość kapilarnego obniżenia poziomu rtęci w rurkach szklanych zależy od wysokości menisku  $\delta$ . Na wysokość tę ma wpływ czystość rtęci oraz powierzchni wewnętrznej rurki. W pomiarach laboratoryjnych przy zastosowaniu rtęci jako cieczy manometrycznej i dokładności pomiaru rzędu 0,1 mm zaleca się wykonanie manometru z rurki szklanej o średnicy wewnętrznej ok. 15 mm, wówczas błąd wynikający ze zjawiska włoskowatości jest mniejszy od dokładności odczytu. Jako zasadę przyjmuje się, że menisk wklęsły (ciecze zwilżające) odczytuje się w najniższym punkcie, zaś menisk wypukły w najwyższym (ciecze niezwilżające).

### 3.2.3. BAROMETRY

Ciśnienie atmosferyczne  $p_b$  wpływa w istotny sposób na dokładność wielu pomiarów, a ponadto jego znajomość jest często niezbędna do obliczenia bezwzględnej wartości ciśnienia. Z powyższych powodów ciśnienie atmosferyczne określa się przy większości pomiarów bilansowych. Pomiar polega na określeniu wysokości równoważnego słupa cieczy manometrycznej, najczęściej rtęci w przyrządach zwanych barometrami. W przestrzeni zamkniętej nad rtęcią panuje tzw. próżnia rtęciowa. Ciśnienie rtęci w tej przestrzeni jest pomijalnie małe, ponieważ wynosi ok. 0,002 mm Hg, a zatem jest mniejsze od dokładności pomiaru.

Przyrządy do pomiaru ciśnienia atmosferycznego można podzielić na:



Rys.3.12. Barometry rtęciowe: a) lewarowy, b) naczyniowy - statyczny, c) naczyniowy Fortina. Oznaczenia: 1 - próżnia rtęciowa, 2 - podzielnia, 3 - noniusz, 4 - pokrętło noniusza, 5 - termometr, 6 - zbiornik rtęci, 7 - zamknięcie otworu impulsowego, 8 - wskaźnik poziomu.

- barometry lewarowe,
- barometry naczyniowe stacyjne,
- barometry naczyniowe Fortina.

Barometr lewarowy (rys.3.12a) jest najmniej dokładnym przyrządem. Określenia ciśnienia atmosferycznego dokonuje się na podstawie pomiaru różnicy poziomów cieczy. Średnica rurki w miejscu odczytów jest znacznie powiększona w celu ograniczenia do minimum wpływu zjawiska włoskowatości na wynik pomiaru. Niektóre przyrządy mają przesuwaną podzielną i wówczas kreskę zerową ustawia się na wysokości poziomu rtęci w zbiorniku dolnym. Dokładność odczytu nie przekracza 1 mm (0,15 kPa).

Barometr naczyniowy stacyjny (rys.3.12b) jest przyrządem znacznie dokładniejszym. Pomiar długości słupka cieczy dokonuje się za pomocą noniusza z dokładnością 0,1 mm (0,015 kPa). Przyrząd ten działa na podobnej zasadzie jak manometr jednoramienny. Ponieważ w barometrze tym nie określa się obniżenia poziomu cieczy w naczyniu dolnym, zatem pomiar obarczony jest błędem. Błąd ten można określić za pomocą odpowiednich wzorów. Niektóre przyrządy, jak np. barometr stacyjny Fuessa, mają zastosowaną podzielną o skróconej działce elementarnej, uwzględniającą zmianę poziomu cieczy w naczyniu dolnym. Podzielnia ta nosi nazwę zredukowanej. Wadą barometrów stacyjnych jest konieczność utrzymywania stałej ilości cieczy w przyrządzie. Np. ubytek 3,5 g rtęci powoduje powstanie błędu systematycznego o wielkości 0,1 mm. W przypadku stwierdzenia ubytku rtęci przyrząd należy oddać ponownie do sprawdzenia.

Barometr naczyniowy Fortina (rys.3.12c) różni się od barometru stacyjnego odmienną budową naczynia. Dno naczynia wykonane jest z elastycznej przepony, dzięki czemu można regulować poziom rtęci w naczyniu. Każdorazowo przed pomiarem należy doprowadzić poziom rtęci do kreski zerowej milimetrowej podzielnicy barometru. Kreskę tę określa wskaźnik poziomu 8 znajdujący się wewnątrz naczynia. Opisana budowa przyrządu eliminuje wady, które ma barometr stacyjny z podzielną zredukowaną.

Zasadę działania barometrów sprężynowych podano w p. 3.2.5.



### Błędy wskazań barometrów rtęciowych

Barometry cieczowe są przyrządami dokładnymi, lecz ze względu na skomplikowaną obsługę bywają stosowane jedynie w laboratoriach.

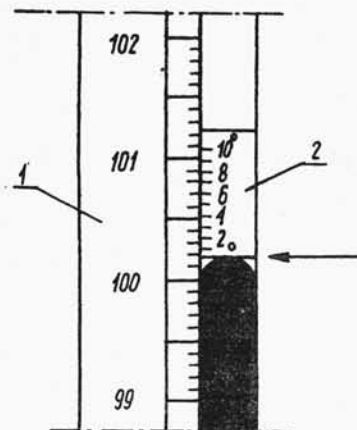
Pomiar ciśnienia atmosferycznego może być obarczony błędami, które są powodowane:

- zapowietrzeniem barometru,
- brakiem położenia pionowego,
- niedokładnym ustawieniem podzielnia,

oraz wpływami:

- kapilarnego obniżenia poziomu rtęci,
- temperatury,
- szerokości geograficznej,
- wysokości położenia nad poziomem morza.

Sprawdzenie czy manometr jest zapowietrzony wykonuje się po zdjęciu przyrządu ze stanowiska i zamknięciu otworu łączącego naczynie z atmosferą. Otwór uszczelnia się przez dokładne zakręcenie śruby 7 (rys.3.12b). Przechylając łagodnie barometr, powinien być słyszany metaliczny dźwięk w momencie uderzenia rtęci o zatopiony koniec rurki. Jeżeli dźwięk jest przytłumiony, głuchy, to w rurze znajduje się powietrze i przyrząd należy oddać do remontu. Barometry stacyjne powinny być mocowane pionowo. Ewentualne odchylenie nie powinno przekraczać  $17,5'$ , co ogranicza błąd



Rys.3.13. Zasada odczytu ciśnienia atmosferycznego na podzielnia z noniuszem ( $p_b = 100,16$  kPa): 1 - podzielnia, 2 - noniusz

do  $1,3$  Pa. Niedokładne ustawienie podzielnia powoduje, że wyniki są obarczone błędem systematycznym, wielkość tego błędu jest określana w czasie legalizacji barometru i nosi nazwę poprawki instrumentalnej  $\Delta$ . Poprawka ta uwzględnia również wpływ kapilarnego obniżenia rtęci w rurze barometrycznej. W celu zmniejszenia tego błędu w miejscu odczytu rurka jest znacznie szersza niż na całej długości, zaś wynik pomiaru określa zawsze

najwyższy punkt menisku (rys.3.13). Szerokość geograficzna i wysokość położenia nad poziomem morza wpływają na zmianę przyspieszenia ziemskiego, a tym samym zmieniają wysokość równoważnego słupa cieczy manometrycznej. Wielkość poprawek określają wzory

$$\Delta_{\varphi} = -0,00264 p_0 \cos 2\varphi, \quad \text{kPa}, \quad (3.22)$$

$$\Delta_h = -0,196 \cdot 10^{-6} p_0 h, \quad \text{kPa}, \quad (3.23)$$

gdzie:

$p_0$  - odczyt ciśnienia na barometrze, kPa,

$\varphi$  - szerokość geograficzna w miejscu pomiaru,  $^\circ$ ,

$h$  - wysokość położenia nad poziomem morza, m.

Poprawka  $\Delta_{\varphi}$  ma znak ujemny (-) dla  $\varphi < 45^\circ$  i dodatni (+) dla  $\varphi > 45^\circ$ . Poprawka  $\Delta_h$  jest ujemna dla  $h > 0$ , tzn. punktów położonych nad poziomem morza.

Temperatura ma istotny wpływ na zmianę gęstości rtęci wypełniającej barometr oraz rozszerzalność szkła i podzielní. Pomiaru temperatury dokonuje się za pomocą termometru umieszczonego na barometrze. Wielkość poprawki temperaturowej określa wzór

$$\Delta_t = -0,000163 p_0 t, \quad \text{kPa}, \quad (3.24)$$

gdzie:  $t$  - temperatura wnętrza barometru,  $^\circ\text{C}$ .

Poprawioną wartość ciśnienia atmosferycznego obliczamy ze wzoru

$$p_b = p_0 + \Delta + \Delta_{\varphi} + \Delta_h + \Delta_t = p_0 + \Delta_s + \Delta_t, \quad \text{kPa} \quad (3.25)$$

Wielkość  $\Delta_s$  została wprowadzona w celu uproszczenia obliczeń. Ma ona wartość stałą w miejscu zamontowania barometru. Wyrażenie to nosi nazwę poprawki stałej i oblicza się ze wzoru

$$\Delta_s = \Delta + \Delta_{\varphi} + \Delta_h. \quad (3.26)$$

Dokładne wyprowadzenie powyższych wzorów znajduje się w literaturze [20].

### Przykład

Temperatura wnętrza barometru wynosi  $19^{\circ}\text{C}$ . Przyrząd wskazuje ciśnienie  $p_0 = 100,65 \text{ kPa}$  i ma poprawkę instrumentalną  $\Delta = +0,005 \text{ kPa}$ .

Szerokość geograficzna miejsca pomiaru wynosi  $\varphi = 62^{\circ}$ , zaś wysokość nad poziomem morza  $h = 132 \text{ m}$ .

Poprawki wynoszą

$$\Delta = +0,005 \text{ kPa},$$

$$\begin{aligned}\Delta_{\varphi} &= -0,00264 p_0 \cos 2\varphi = -0,00264 \cdot 100,65 \cos(2 \cdot 62) = \\ &= 0,149 \text{ kPa},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta_h &= -0,196 \cdot 10^{-6} p_0 h = -0,196 \cdot 10^{-6} \cdot 100,65 \cdot 132 = \\ &= -0,003 \text{ kPa}.\end{aligned}$$

Zatem poprawka stała ma wielkość

$$\Delta_s = +0,005 + 0,149 - 0,003 = +0,157 \text{ kPa}.$$

Poprawka uwzględniająca wpływ temperatury

$$\Delta_t = -0,000163 p_0 t = -0,000163 \cdot 100,65 \cdot 19 = -0,312 \text{ kPa}$$

Poprawną wartość ciśnienia atmosferycznego oblicza się z zależności (3.25)

$$p_b = p_0 + \Delta_s + \Delta_t = 100,65 + 0,157 - 0,312 \approx 100,49 \text{ kPa}.$$

### **3.2.4. MANOMETRY OBCIĄŻNIKOWO-TŁOKOWE**

Zasada działania manometru obciążnikowo-tłokowego polega na równoważeniu siły spowodowanej działaniem ciśnienia na tłok za pomocą obciążników. Ideowy schemat zespołu tłok - cylinder pokazano na rys.3.14. Ponieważ wnętrze cylindra wypełnia ciecz, zatem zgodnie z prawem Pascala ciśnienie na całej powierzchni czynnej tłoka ma jednakową wartość i wynosi

$$p = \frac{F}{A_{cz}} = \frac{G_t + G_o - T - W}{A_{cz}}, \quad \text{Pa}, \quad (3.27)$$

gdzie:

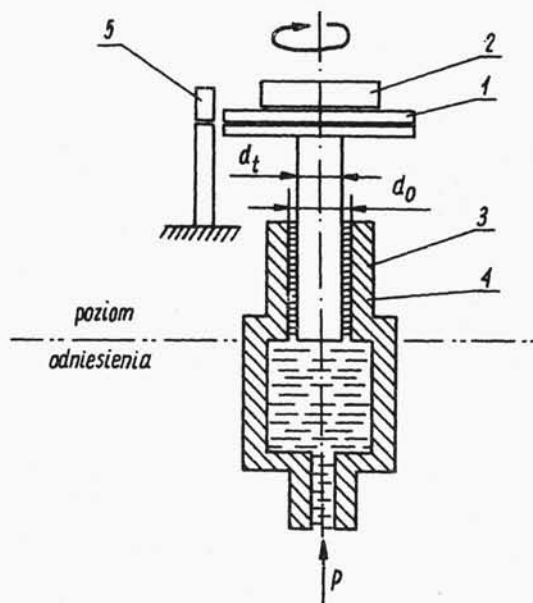
$G_t$  - ciężar tłoka, N,

$G_o$  - ciężar obciążników, N,

$T$  - siła tarcia tłoka w cylindrze, N,

$W$  - siła wyporu cieczy wypełniającej układ i powietrza, N,

$A_{cz}$  - pole powierzchni czynnej tłoka,  $\text{m}^2$ .



Rys.3.14. Schemat ideowy zespołu tłok-cylinder: 1 - obciążnik podstawowy, 2 - obciążnik dodatkowy, 3 - cylinder, 4 - tłok

Pole powierzchni czynnej tłoka można obliczyć za pomocą wzoru

$$A_{cz} = \pi \left[ d_t^2 + d_t(d_o - d_t) + \frac{(d_o - d_t)^2}{2} \right], \quad \text{m}^2, \quad (3.28)$$

gdzie:

$d_o$  - średnica wewnętrzna cylindra, m,

$d_t$  - średnica zewnętrzna tłoka, m.

Wzór na powierzchnię czynną tłoka został sprawdzony doświadczalnie i jest słuszny przy ciśnieniach nie przekraczających 10 MPa.

W celu ograniczenia do minimum wpływu tarcia  $T$ , obciążnik wraz z tłokiem wprowadza się w ruch obrotowy w czasie pomiaru. W ten sposób zamiast tarcia mechanicznego uzyskuje się tarcie hydrauliczne, które ma mniejszą wartość. Wypór spowodowany działaniem płynów na tłok jest w rzeczywistości pomijalnie mały i dlatego można go nie uwzględniać.

Na podstawie zależności (3.27) obciążniki opisane są w jednostkach ciśnienia najczęściej przy założeniu, że przyspieszenie ziemskie jest równe  $g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$ . Jeżeli w miejscu pomiaru panuje inna wartość przyspieszenia ziemskiego, to ciśnienie oblicza się za pomocą wzoru

$$p = p_0 \frac{g}{g_n}, \quad (3.29)$$

gdzie:

$p_0$  - wartość ciśnienia opisana na obciążniku,

$g$  - przyspieszenie ziemskie w miejscu pomiaru,  $\text{m/s}^2$ ,  
(dla Warszawy  $g = 9,81227 \text{ m/s}^2$ ),

$g_n$  - przyspieszenie ziemskie normalne,  $g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$ .

Manometry działające na podstawie opisanej zasady są używane jako wzorce ciśnienia klasy  $\delta_{\text{max}} = 0,05$  lub  $\delta_{\text{max}} = 0,02$ . Ponieważ na klasę dokładności mają wpływ również elementy pomocnicze (szczelność prasy olejowej, zaworów odcinających itp.), zatem pojęcie manometru obciążnikowo-tłokowego zostało przyjęte dla całego zespołu urządzeń potrzebnych do wytwarzania i utrzymywania ciśnienia. Zasadę działania manometru obciążnikowo-tłokowego jako wzorca ciśnienia omówiono w p.3.4.

### 3.2.5. CIŚNIENIOMIERZE Z ELEMENTAMI SPRĘŻYSTYMI

Przyrządy te zwane są popularnie manometrami sprężynowymi. Ze względu na typ elementu sprężystego, ciśnieniomierze można podzielić na: rurkowe, przeponowe i mieszkowe (syfonowe).

Ze względu na dokładność pomiaru rozróżnia się ciśnieniomierze:

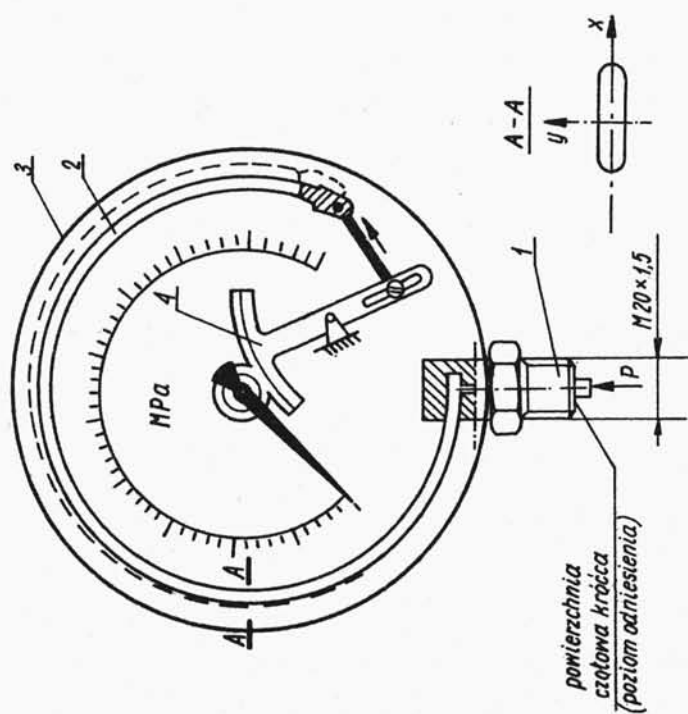
- przemysłowe o klasie dokładności 0,6; 1; 1,6; 2,5; 4,
- kontrolne o klasie dokładności 0,25; 0,4; 0,6.

Przy pomiarze ciśnienia należy pamiętać, że wskazywana wartość jest słuszną na poziomie odniesienia przyrządu. Dla ciśnieniomierzy z elementem sprężystym jest to środek płaszczyzny czołowej króćca impulsowego (rys.3.15).

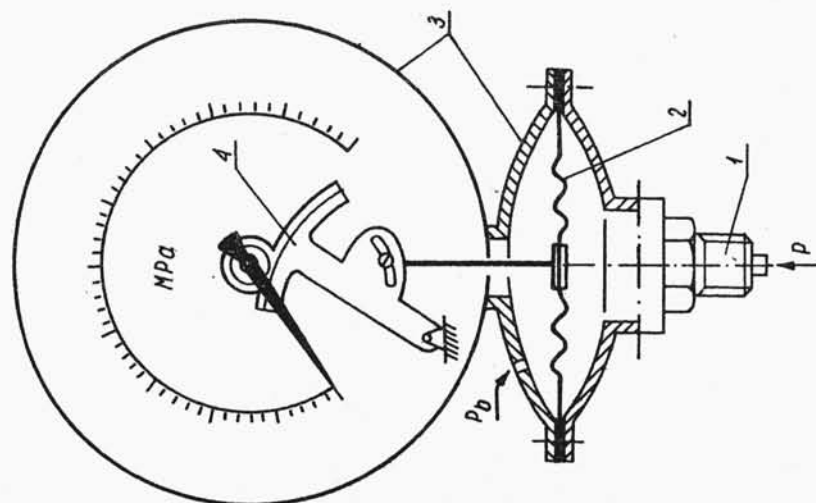
Ciśnieniomierze rurkowe są najbardziej rozpowszechnione w użyciu ze względu na prostą budowę, niskie koszty i dużą niezawodność w działaniu. Najmniejsze zakresy budowanych przyrządów wynoszą  $0 \div 0,06$  MPa, największe natomiast  $0 \div 400$  MPa. (niekiedy do 1000 MPa). Elementem pomiarowym jest rurka Bourdona (rys.3.15) wykonana w zależności od zakresu pomiarowego ze stopów miedzi lub stali. Wolny koniec rurki przemieszcza się pod wpływem przyłożonego ciśnienia w płaszczyźnie y-y, gdyż wskaźnik wytrzymałości przekroju poprzecznego rurki  $W_x$  ma wartość najmniejszą. Koniec rurki połączony jest z układem mechanicznym przekazującym wskazania na podzielną. Najczęściej jest to przekładnia zębata lub dźwigniowa.

Ciśnieniomierze membranowe (rys.3.16) składają się z membrany 2 zamocowanej pomiędzy kołnierzami, układu przekazującego odkształcenia z przekładnią zębatą 4 i obudowy 3. Membrana może być umieszczona prostopadle do podzielną (jak na rysunku) lub równolegle, z tyłu za podzielną. Zakres stosowania tego typu ciśnieniomierzy jest znacznie mniejszy niż przy zastosowaniu rurki Bourdona i wynosi około 2,5 MPa. Sposób wykonania membrany - tzw. "gęstość fal" ma wpływ na czułość przyrządu i zakres proporcjonalności wskazań. Ciśnieniomierze membranowe są szczególnie zalecane do pomiaru ciśnienia cieczy gęstych i lepkich, które mogłyby zapchać rurkę Bourdona. Istnieje możliwość zastosowania tych przyrządów do pomiaru ciśnienia cieczy agresywnych, po wykonaniu dodatkowej membrany z materiału odpornego na korozję, jak np. cienkiej folii aluminiowej. Tę dodatkową membranę umieszcza się jako "izolację" od strony czynnika agresywnego.

Ciśnieniomierze puszkowe i mieszkowe są stosowane do pomiaru niewielkich różnic ciśnień. Górna granica zakresu wska-



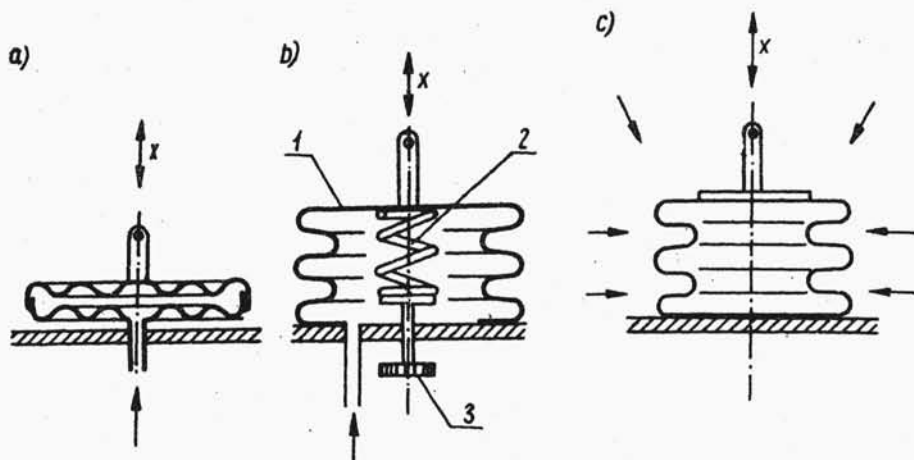
Rys. 3.15. Schemat ciśnieniomierza sprężynowego - rurkowego: 1 - króciec impulsowy, 2 - rurka Bourdona, 3 - obudowa, 4 - przekładnia zębata



Rys. 3.16. Schemat ciśnieniomierza sprężynowego - membranowego: 1 - króciec impulsowy, 2 - membrana, 3 - obudowa, 4 - przekładnia zębata



zań nie przekracza  $0,5 \text{ MPa}$ . Elementem sprężystym ciśnieniomierza puszкового jest zbiornik, zwany puszką manometryczną (rys.3.17a). Zbiornik ten wykonany jest z dwóch lub więcej



Rys.3.17. Schemat działania puszek i mieszków sprężystych: a) puszka manometryczna, b) mieszek sprężysty otwarty, c) mieszek sprężysty zamknięty (aneroid)

membran połączonych szczelnie przez zlutowanie brzegów. Ciśnieniomierze mieszkowe (syfonowe) wykorzystują odkształcenie sprężyste  $x$  mieszka pod wpływem ciśnienia. Mieszek, w przeciwieństwie do puszki, wykonany jest z jednego kawałka materiału sprężystego. Schemat działania mieszka pokazano na rys.3.17b. Pod wpływem ciśnienia  $p$  ulega zmianie długość mieszka. Zmiany te są przekazywane za pomocą przekładni zębatej lub dźwigniowej oraz wskazówki na podzielnicy. Sprężyna 2 ze śrubą regulacyjną 3 służy do odciążenia mieszka i regulacji czułości ciśnieniomierza.

Odmianą ciśnieniomierzy mieszkowych są aneroidy, w których mieszki sprężyste są szczelnie zamknięte po usunięciu powietrza. Aneroidy (rys.3.17c) zmieniają swój kształt pod wpływem zmian ciśnienia zewnętrznego. Znajdują one zastosowanie w barometrach sprężynowych i barografach. Ciśnieniomierze puszkowe i mieszkowe są stosowane do pomiaru oraz rejestracji małych różnic ciśnień. Zaletą ich jest mniejsza bezwładność niż manometrów rtęciowych, lecz są one bardziej wrażliwe na drgania i pulsacje ciśnienia. Klasa dokładności ciśnieniomierzy puszkowych i mieszkowych wynosi 1,5 lub 2,5.



### Błędy pomiarowe manometrów z elementami sprężystymi

Błędy pomiaru ciśnienia mogą powstawać pod wpływem:

- temperatury,
- tarcia,
- histerezy,
- położenia manometru.

Wpływ temperatury na wskazania manometrów rurkowych określa wzór

$$\Delta p_t = -k p_0 \Delta t, \quad \text{MPa}, \quad (3.30)$$

gdzie:

$k$  - współczynnik zależny od rodzaju manometru,  $K^{-1}$ ,

$p_0$  - ciśnienie wskazywane przez manometr, MPa,

$\Delta t$  - różnica pomiędzy temperaturą pomiaru a temperaturą wzorcowania manometru ( $20^\circ\text{C}$ ), K.

Dla manometrów rurkowych współczynnik  $k$  ma wartość  $k = 4 \cdot 10^{-4} K^{-1}$ .

Definicje błędów spowodowanych tarcie, histerezą oraz położeniem manometru jak również sposób ich uwzględniania omówiono w p.3.4, dotyczącym sprawdzania ciśnieniomierzy sprężynowych.

### 3.2.6. MANOMETRY ELEKTRYCZNE

Przyrządy te są stosowane zazwyczaj do pomiaru wysokich ciśnień i dlatego nie znajdują szerszego zastosowania przy pomiarach w inżynierii sanitarnej. Wykorzystują one m.in. zjawisko piezoelektryczne oraz zmianę oporności przewodników w zależności od ciśnienia. Dokładny opis tych przyrządów znajduje się w literaturze [7] i [13].

### 3.3. ZASADY DOBORU I EKSPLOATACJI PRZYRZĄDÓW DO POMIARU CIŚNIEŃ

Przy doborze przyrządu do pomiaru ciśnienia należy kierować się wielkością mierzonego ciśnienia, charakterem zmian impulsów, wymaganą dokładnością pomiaru oraz warunkami pracy przyrządu. Ponadto należy się zastanowić nad sposobem reje-