

SPIS TREŚCI

PRZEDMOWA	5
WYKAZ OZNACZEŃ.....	7
Część I – PRZYRZĄDY POMIAROWE	11
1. Manometry.....	11
1.1. Manometry cieczowe.....	12
1.2. Manometry mechaniczne.....	23
1.3. Manometry elektryczne – przetworniki ciśnienia.....	24
2. Sondy ciśnieniowe.....	25
2.1. Sonda Pitota.....	26
2.2. Sonda ciśnienia statycznego.....	28
2.3. Sonda Prandtla.....	29
2.4. Sondy kierunkowe.....	33
3. Zwężki pomiarowe.....	37
3.1. Kryzy.....	39
3.2. Dysze.....	44
3.3. Zwężki Venturiego.....	46
3.4. Zwężki specjalne.....	47
4. Rotametry.....	48
5. Anemometry.....	53
6. Termoanemometry.....	56
7. Anemometry laserowe.....	60
8. Przepływomierze.....	62
8.1. Przepływomierze mechaniczne.....	63
8.2. Przepływomierze cieplne.....	73
8.3. Przepływomierze elektryczne.....	74
9. Wizualizacja przepływów.....	77
9.1. Metody kontaktowe.....	77
9.2. Metody bezkontaktowe.....	80
9.3. Rejestracja obrazów.....	83

10. Tunele aerodynamiczne	85
10.1. Tunele poddźwiękowe	85
10.2. Tunele naddźwiękowe	89
10.3. Rury uderzeniowe	90

Część II – INSTRUKCJE ĆWICZEŃ LABORATORYJNYCH.....93

Ćwiczenie nr 1. Równowaga względna cieczy w naczyniu wirującym wokół osi pionowej	93
Ćwiczenie nr 2. Reakcja hydrodynamiczna	103
Ćwiczenie nr 3. Krytyczna liczba Reynoldsa Re_{kr}	113
Ćwiczenie nr 4. Rozkład prędkości w kanale podczas ruchu turbulentnego	118
Ćwiczenie nr 5. Struga swobodna	127
Ćwiczenie nr 6. Straty ciśnienia wskutek tarcia	137
Ćwiczenie nr 7. Straty ciśnienia wskutek oporów miejscowych	144
Ćwiczenie nr 8. Wizualizacja opływu ciał	154
Ćwiczenie nr 9. Przelewy	161
Ćwiczenie nr 10. Współczynnik wypływu z otworu ostrokrawędziowego	167
Ćwiczenie nr 11. Dyfuzor poddźwiękowy – warstwa przyścienna	175
Ćwiczenie nr 12. Metody określania strumienia objętości cieczy	186
Ćwiczenie nr 13. Ruch spokojny i rwący	193
Ćwiczenie nr 14. Zjawiska falowe w rurze uderzeniowej	201
Ćwiczenie nr 15. Badanie rozpylacza cieczy	218
Ćwiczenie nr 16. Charakterystyki wentylatora promieniowego oraz współpraca układu wentylatorów promieniowych	229
Ćwiczenie nr 17. Badania złoza fluidalnego	259
Ćwiczenie nr 18. Niestalony wypływ cieczy i gazów ze zbiorników	271
LITERATURA	289
SKOROWIDZ RZECZOWY	291

PRZEDMOWA

Skrypt niniejszy wraz ze skryptami "Mechanika płynów" i "Ćwiczenia audytoryjne z mechaniki płynów" zamyka cykl materiałów pomocniczych dla dyscypliny mechanika płynów. Skrypt składa się z dwóch części: część I zawiera opis podstawowych przyrządów wraz z ich zastosowaniem w pomiarach przepływowych, a część II – instrukcje ćwiczeń laboratoryjnych.

Zebranie w jednej publikacji informacji o przyrządach pomiarowych pozwala na przypomnienie i zapoznanie się z nimi w sposób systematyczny oraz na uniknięcie powtarzania tych informacji w poszczególnych instrukcjach. Znaczna część opisanych przyrządów znajduje zastosowanie w istniejących lub przygotowywanych ćwiczeniach. Zamieszczenie materiału o przyrządach pomiarowych pozwoli wyłączyć wszelkie informacje na ten temat z dalszych wydań skryptu "Mechanika płynów" na korzyść umieszczenia innych materiałów podstawowych.

Celem niniejszego skryptu jest ułatwienie studentom przygotowania się i odrobienia ćwiczeń. Instrukcje zawierają: cel, wprowadzenie teoretyczne, opis stoiska oraz metodykę pomiarów i obliczeń, a więc cały materiał potrzebny do zrozumienia istoty ćwiczenia i wykonania sprawozdania. Główna uwaga została zwrócona na konfrontację wyników pomiarów z wynikami obliczeń lub z danymi literaturowymi oraz na zamieszczenie własnych uwag i spostrzeżeń.

Skrypt zawiera instrukcję osiemnastu ćwiczeń o charakterze podstawowym dla studentów Wydziału Mechanicznego i Wydziału Budownictwa Lądowego (kierunek Inżynieria Środowiska) Politechniki Łódzkiej.

Skrypt ten powstał w wyniku wieloletniej pracy wszystkich członków Zakładu Mechaniki Płynów Instytutu Maszyn Przepływowych.

Do większości ćwiczeń laboratoryjnych (oprócz ćwiczeń nr 8, 9, 13, 14, 15) zostały napisane programy komputerowe w języku FORTRAN, f-90, wspomagające studentów przy wykonywaniu poszczególnych ćwiczeń. Formy egzekucyjne tych programów zawarto w folderze „Laboratorium”, zachowując numerację ćwiczeń ze skryptu. Zachowano również w większości oznaczenia wielkości fizycznych oraz układ tabel pomiarowych i obliczeniowych (w kilku przypadkach było to niemożliwe). Wszystkie w/w programy działają według następującego schematu:

- Wprowadzenie wyników pomiarów.
- Potwierdzenie poprawności wpisanych wyników. W przypadku pomyłki należy w następnym kroku poprawić błąd.
- Wykonanie przez studentów obliczeń i wprowadzenie ich do programu dla pierwszego punktu pomiarowego. Program uznaje wyniki obliczeń za poprawne, jeżeli mieszczą się one w zakresie założonego dopuszczalnego błędu. W przypadku poprawności obliczeń program wykonuje obliczenia pozostałych punktów pomiarowych. Jeżeli obliczenia są błędne, to należy je powtórzyć.
- Wyniki obliczeń są przedstawione na ekranie monitora w postaci tabel i wykresów. Tabele wyników pomiarów i obliczeń drukujemy, natomiast wykresy są tylko do obejrzenia na ekranie monitora (należy je w sprawozdaniu wykonać samodzielnie).

Do większości ćwiczeń studenci otrzymują gotowe wzory sprawozdań, które wypełniają korzystając z wydruków komputerowych i wykonują polecane wykresy.

Programy zostały opracowane i uruchomione przez wieloletniego kierownika laboratorium inż. Jacka Gibkiego przy współudziale dr inż. Janusza Trojnarzkiego.

WYKAZ OZNACZEŃ

A	m^2	powierzchnia,
C	-	współczynnik przepływu,
c_x	-	współczynnik oporu profilowego,
d	m	średnica,
D	m	średnica,
F	N	siła,
Fr	-	liczba Froude'a,
f_t	-	współczynnik tarcia,
g	$\frac{m}{s^2}$	przyspieszenie ziemskie
G	N	siła,
h	m	wysokość,
H	m	wysokość,
k	-	przełożenie mikromanometru,
k	m	chropowatość bezwzględna,
l	m	długość,
L	m	długość,
\dot{m}	$\frac{kg}{s}$	strumień masy płynu,
Ma	-	liczba Macha,
n	$\frac{obr}{min}$	częstość obrotów,
p	Pa	ciśnienie,
Δp	Pa	różnica ciśnień, spadek ciśnienia,
r	m	promień,
R	m	promień,
R	N	reakcja,
R	$\frac{J}{kg \cdot K}$	stała gazowa,
Re	-	liczba Reynoldsa,

t	s	czas,
T	K	temperatura,
u	$\frac{m}{s}$	prędkość,
v	$\frac{m}{s}$	prędkość,
v_{∞}	$\frac{m}{s}$	prędkość przepływu niezakłóconego,
V	m^3	objętość,
\dot{V}	$\frac{m^3}{s}$	strumień objętości płynu,
z	m	wysokość, wysokość słupa cieczy, spiętrzenie manometru,
α	-	współczynnik wypływu, współczynnik przelewu,
β	-	przewężenie zwężki pomiarowej,
δ	m	grubość warstwy przyściennej,
δ^*	m	liniowa miara zmniejszenia strumienia masy w warstwie przyściennej,
ε	-	liczba ekspansji,
ε	-	porowatość,
ζ	-	współczynnik straty miejscowej,
η	$\frac{kg}{m \cdot s}$	lepkość dynamiczna,
κ	-	wykładnik izentropy,
μ	-	współczynnik kontrakcji,
ν	$\frac{m^2}{s}$	lepkość kinematyczna,
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	gęstość,
ρ_m	$\frac{kg}{m^3}$	gęstość cieczy manometrycznej,
φ	-	współczynnik straty prędkości,
ω	$\frac{rad}{s}$	prędkość kątowna,

Indeksy

a	-	atmosferyczny,
c	-	parametry całkowite,
d	-	dynamiczny,
gr	-	graniczny,
kr	-	krytyczny,
m	-	miejscowy,
max	-	maksymalny,
min	-	minimalny,
n	-	nadciśnienie,
rz	-	rzeczywisty,
str	-	dotyczy strat,
śr	-	średni,
t	-	tarcie

CZEŚĆ I

PRZYRZĄDY POMIAROWE

Celem ćwiczeń laboratoryjnych jest poznanie w drodze obserwacji i pomiarów różnych zjawisk przepływowych. Ze względów dydaktycznych jest pożądane oparcie pomiarów na podstawowych przyrządach, co zapewnia maksymalną prostotę i przejrzystość metod pomiarowych.

W mechanice płynów wielkościami mierzonymi najczęściej są:

- ciśnienie,
- prędkość przepływu (wartość, kierunek i zwrot),
- strumień objętości lub masy płynu,
- opór przepływu i opływu ciał.

Podstawowe przyrządy stosowane w tych pomiarach są następujące:

- manometry,
- sondy ciśnieniowe,
- zwężki pomiarowe,
- rotametry,
- anemometry,
- termoanemometry,
- przepływomierze.

Główna uwaga w niniejszym skrypcie będzie poświęcona wymienionym przyrządom, przy czym dla uzupełnienia zostaną podane metody wizualizacji przepływów oraz informacje na temat tuneli aerodynamicznych.

1. MANOMETRY

Manometry są to przyrządy do pomiaru ciśnień, a w zasadzie – różnicy ciśnień. Wynik pomiaru jest wyrażony najczęściej w postaci **nadciśnienia** lub **podciśnienia**, czyli różnicy ciśnień w górę lub w dół względem ciśnienia atmosferycznego p_a . Jeżeli jest potrzebna znajomość ciśnienia absolutnego, czyli ciśnienia odniesionego do absolutnej próżni, wówczas do ciśnienia

atmosferycznego należy dodać wartość nadciśnienia lub odjąć wartość podciśnienia. Do pomiarów ciśnień niższych od ciśnienia atmosferycznego stosuje się tzw. **wakuometry**, których konstrukcja i zasada działania, w niczym nie różni się od manometrów.

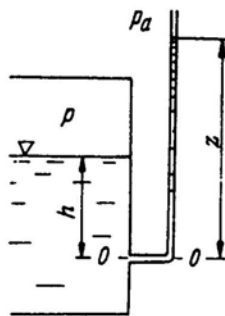
Klasyfikacja manometrów może być dokonana w oparciu o takie kryteria, jak zasada działania, rodzaj mierzonych ciśnień, zakres ciśnień, dokładność pomiaru itp. W niniejszym skrypcie zostanie wykorzystane kryterium zasady działania, co pozwala wyodrębnić następujące typy manometrów:

- manometry cieczowe,
- manometry mechaniczne,
- manometry elektryczne.

Główna uwaga będzie poświęcona manometrom cieczowym, gdyż znajdują one największe zastosowanie w praktyce laboratoryjnej.

1.1. Manometry cieczowe

Manometry cieczowe są to przyrządy o wyjątkowo prostej budowie, a jednocześnie wysokiej dokładności wskazań. Wskazanie manometru wynika z warunku równowagi cieczy w naczyniu połączonym. Ciecz która stanowi ruchomą przegrodę przyjmuje takie położenie, jakie wynika z różnicy ciśnień po obu stronach tej przegrody. Obserwacja tych położenia wymaga stosowania przezroczystych - najczęściej szklanych - rurek lub naczyń.



Rys. 1. Piezometr

Warunki stawiane **cieczom manometrycznym** są następujące: wyraźny menisk, całkowita odporność na mieszanie lub tworzenie roztworów z badanym płynem, nieprzezroczystość, niska parowalność. Ciecze manometryczne dobiera się

również z uwagi na wielkość mierzonych ciśnień, to znaczy przy wyższych ciśnieniach (różnicach ciśnień) stosuje się cieczy o większej gęstości, co pozwala zmniejszyć wymiary manometru. W praktyce cieczami manometrycznymi są rtęć, woda i alkohol. Ostatnie dwie cieczy stosuje się w postaci zabarwionej.

Manometry cieczowe mogą być w zasadzie **jedno-** lub **dwuramienne**. Najprostszym manometrem jednoramiennym jest **piezometr** (rys. 1.) Piezometr jest to rurka u góry otwarta, a u dołu połączona z obszarem mierzonego ciśnienia. Piezometry służą do pomiaru ciśnienia cieczy, przy jednoczesnym wykorzystaniu tej cieczy jako cieczy manometrycznej. Nadciśnienie cieczy na poziomie 0-0 względem ciśnienia atmosferycznego p_a jest proporcjonalne do z [mm słupa cieczy]. Ciśnienie p wynika z warunku równowagi na poziomie 0-0

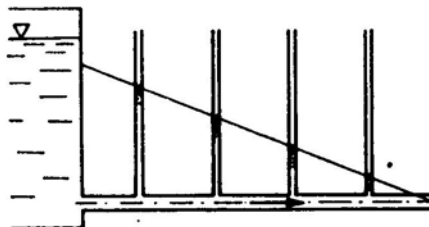
$$p + \rho g h = p_a + \rho g z,$$

stąd

$$p = p_a + \rho g(z - h) \text{ [Pa]}, \quad (1)$$

gdzie: ρ – gęstość cieczy [kg/m^3],
 z, h – wysokość słupów cieczy [m].

W przypadku równości ciśnień $p = p_a$ wynika z równania (1) równość słupów $h = z$, czyli piezometr wskazuje wówczas poziom cieczy w zbiorniku. Oprócz warunków $z > h$ i $z = h$ może również zachodzić warunek $z < h$, co odpowiada przypadkowi podciśnienia w zbiorniku, czyli $p < p_a$.

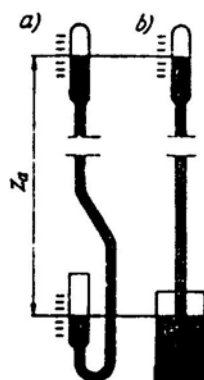


Rys.2. Linia piezometryczna

Piezometry mogą być również użyte do pomiaru ciśnień podczas przepływu cieczy w kanale (rys. 2). Linia łącząca poziomy cieczy w piezometrach, czyli **linia piezometryczna**, wskazuje ciśnienie (nadciśnienie) statyczne w poszczególnych przekrojach kanału.

Barometry służą do pomiaru absolutnego ciśnienia atmosferycznego, czyli tzw. ciśnienia barometrycznego. Barometr powstaje przez napełnienie rtęcią półotwartej rurki i odwrócenie jej dnem do góry. Nad poziomem rtęci tworzy się tzw. próżnia Torricellego, w której ciśnienie par rtęci wynosi zaledwie 0,002 mmHg (przy 20°C), a więc jest pomijalnie małe. Dolny koniec rurki będący pod

działaniem ciśnienia atmosferycznego jest zagięty do góry lub zanurzony w naczyniu z rtęcią (rys. 3). W pierwszym przypadku jest to barometr dwuramienny, tzw. lewarowy, w drugim – barometr jednoramienny, tzw. naczyniowy. Różnica poziomów z_a [mm Hg] jest miarą ciśnienia atmosferycznego. Barometr lewarowy wymaga odczytu obu poziomów rtęci, barometr naczyniowy – tylko odczytu górnego poziomu rtęci. W tym ostatnim przypadku jest jednak pożądaną uwzględnienie poprawki na zmianę poziomu rtęci w naczyniu. Tę właściwość posiadają fabryczne barometry laboratoryjne. Inna poprawka dotycząca obu rodzajów barometrów winna uwzględniać odmienną rozszerzalność cieplną rtęci i podziałki.



Rys. 3. Barometry: a) lewarowy, b) naczyniowy

Różnica ciśnień jest najczęściej mierzona za pomocą dwuramiennego manometru cieczowego zwanego **manometrem różnicowym** lub **U-rurką** (rys. 4). Różnica wysokości słupów cieczy manometrycznej $z = z_2 - z_1$, zwana **spiętrzeniem manometru**, jest miarą różnicy ciśnień Δp

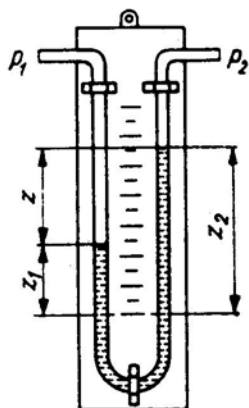
$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho_m g(z_2 - z_1) = \rho_m g z \text{ [Pa]}, \quad (2)$$

lub

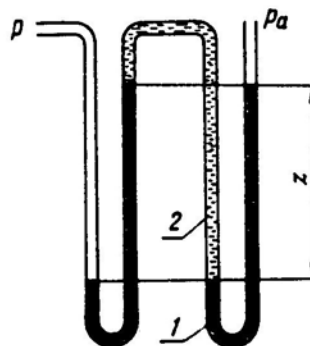
$$\Delta p = p_1 - p_2 = g z(\rho_m - \rho) \text{ [Pa]}, \quad (3)$$

gdzie: ρ_m – gęstość cieczy manometrycznej [kg/m³],
 ρ – gęstość cieczy znajdującej się nad cieczą manometryczną [kg/m³],
 z – spiętrzenie manometru [m].

U-rurka jest przyrządem bardzo prostym, dokładnym i dogodnym w użyciu. Wady U-rurki są następujące: trudności odczytu, ograniczony zakres pomiarowy, wrażliwość na uszkodzenie mechaniczne.



Rys. 4. Manometr U-rurkowy



Rys. 5. Manometr szeregowy

1 – ciecz manometryczna
2 – ciecz pośrednicząca

Trudności odczytu wynikają z istnienia menisku cieczy, błędów paralaksy, wahań poziomów cieczy i konieczności odczytu obu poziomów cieczy. Przy menisku wklęsłym należy odczytać najniższy, a przy wypukłym najwyższy jego punkt. Błąd bezwzględny pomiaru poziomu cieczy należy ocenić na $\pm 0,5$ mm, a obu poziomów na

$$\sqrt{0,5^2 + 0,5^2} \approx \pm 0,7 \text{ mm}.$$

Błąd paralaksy można usunąć przez prawidłową obserwację wskazań. Błąd wskutek występujących czasami wahań poziomu cieczy można zmniejszyć przez zastosowanie suwaka pomiarowego, który ułatwia ustalenie tego poziomu. Konieczność odczytu obu poziomów cieczy jest nieaktualna, o ile dwuramienny manometr U-rurkowy zastąpi się podobnie działającym jednoramiennym manometrem naczyniowym; błąd wskazań takiego manometru patrz [17 s.31].

Zakres pomiarowy manometrów U-rurkowych jest nieduży i wynosi w przybliżeniu od 70 do 1000 mm. Dolna granica wynika z przyjęcia błędów względnego $\pm 1\%$, gdyż

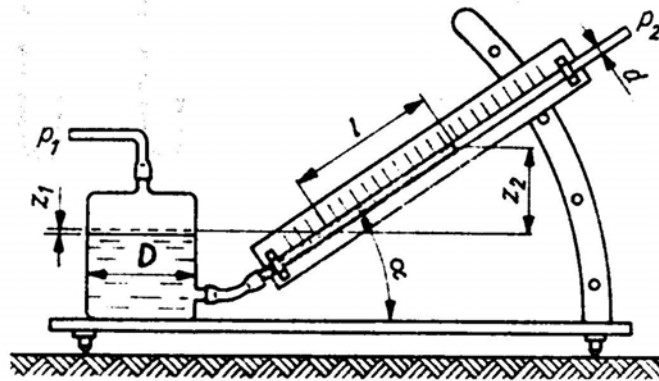
$$\frac{\pm 0,7}{70} 100 = \pm 1\%.$$

Górna granica wynika ze względów wytrzymałościowych, tak więc dla $z = 1000$ mm Hg wartość zmierzonego nadciśnienia wynosi $p \approx 0,136$ MPa. Można

mierzyć większe nadciśnienia przy użyciu manometru szeregowego (rys. 5), który składa się z kilku U-rurek z cieczą manometryczną, np. rtęcią, i cieczą pośredniczącą, np. wodą. Ciśnienie p wynosi [17, s. 34]

$$p = p_a + n g z \left(\rho_1 - \frac{n-1}{n} \rho_2 \right), \quad (4)$$

gdzie: n – liczba U-rurek ($n = 2$ na rys. 5),
 ρ_1 – gęstość cieczy manometrycznej,
 ρ_2 – gęstość cieczy pośredniczącej.



Rys. 6. Mikromanometr z rurką pochyłą

W praktyce pomiarowej jest często wymagany pomiar małych lub bardzo małych spięrzeń. Zwykle manometry cieczowe nie mogą być stosowane, gdyż dają zbyt duży błąd względny. Stosuje się w tym celu tzw. **mikromanometry**. Na rysunku 6 pokazano **mikromanometr z rurką pochyłą**, której kąt pochylenia α może być zmieniany. Jest to, jak widać, manometr jednoramienny (naczyniowy). Różnica ciśnień wynosi

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho_m g(z_1 + z_2) = \rho_m g z, \quad (5)$$

gdzie: ρ_m – gęstość cieczy manometrycznej,
 z_1 – obniżenie poziomu cieczy manometrycznej w naczyniu,
 z_2 – podniesienie poziomu cieczy manometrycznej w rurce pochyłej

$$z = z_1 + z_2.$$

Uwzględniając równość objętości

$$\frac{\pi D^2}{4} z_1 = \frac{\pi d^2}{4} l$$

oraz zależność

$$z_2 = l \sin \alpha,$$

otrzymuje się po podstawieniach

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho_m g l \left[\left(\frac{d}{D} \right)^2 + \sin \alpha \right].$$

Oznaczając przez k **przełożenie mikromanometru**

$$k = \frac{1}{\left(\frac{d}{D} \right)^2 + \sin \alpha},$$

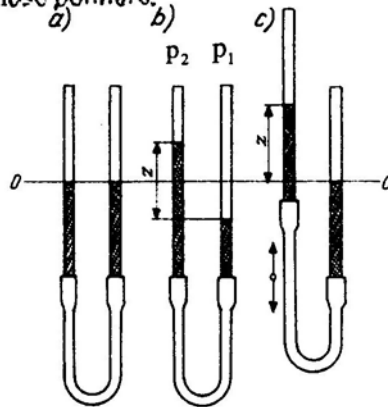
otrzymuje się

$$\Delta p = \rho_m g \frac{l}{k}.$$

Porównując tę zależność z zależnością (5) mamy

$$z = \frac{l}{k}. \quad (6)$$

Oznacza to, że wysokość słupa cieczy „ z ” wynika z podzielenia długości słupa cieczy l przez przełożenie mikromanometru k . Korzyść ze stosowania takiego mikromanometru polega na tym, że odczytuje się większą wartość $l > z$, co polepsza dokładność pomiaru.



Rys. 7. Zasada działania mikromanometru kompensacyjnego gdy:

a) $p_2 = p_1$, b) $p_2 < p_1$, c) $p_2 < p_1$

Z uwagi na małe spiętrzenia, w mikromanometrach z rurką pochyłą stosuje się alkohol lub ciecze specjalne. Woda jest nieodpowiednia, gdyż zbyt silnie zwilża szkło i dla małych kątów α nie tworzy wyraźnego menisku. Mikromanometry z rurką pochyłą są szeroko stosowane jako przyrządy laboratoryjne i techniczne, w tym ostatnim przypadku głównie jako ciągomierze do pomiaru podciśnień w kanałach paleniskowych. Przy bardzo małych spiętrzeniach jest wymagane dokładne wypoziomowanie podstawy mikromanometru.

Najbardziej dokładnym mikromanometrem cieczowym jest **mikromanometr kompensacyjny typu Askania**. Zasada działania tego manometru jest przedstawiona na rys. 7. Gdy w obydwu ramionach U-rurki panuje to samo ciśnienie, tj. $p_1 = p_2$, ciecz manometryczna znajduje się w obu ramionach na poziomie 0-0 (rys. 7a). W przypadku różnicy ciśnień $p_1 > p_2$ (rys. 7b), poziomy cieczy są różne. Aby przy stanie $p_1 > p_2$ ciecz w prawej rurce sprowadzić do poziomu 0-0, należy podnieść lewą rurkę (rys. 7c). To podniesienie rurki ponad poziom 0-0 kompensuje oczywiście różnicę ciśnień $p_1 - p_2$.

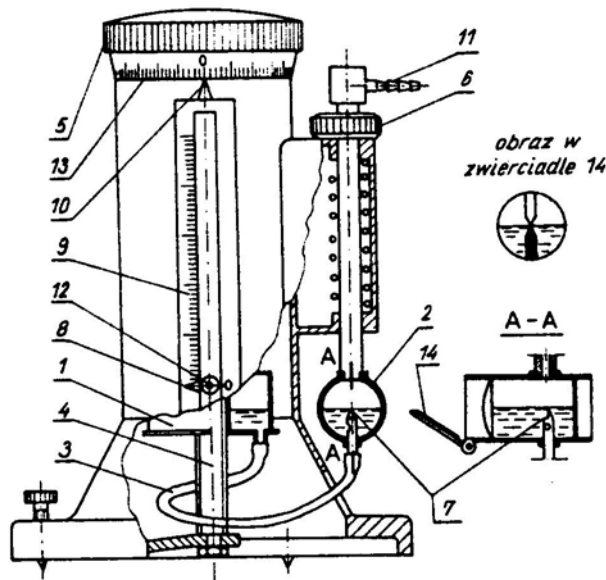
Działanie kompensacyjne w fabrycznym wykonaniu tego mikromanometru polega na zrównoważeniu mierzonego ciśnienia odpowiednim podniesieniem naczynia z cieczą manometryczną. W metodzie tej zastąpiono pomiar położenia menisku cieczy przez znacznie dokładniejszy pomiar położenia naczynia za pomocą mechanizmu śruby mikrometrycznej. Zastosowana metoda pozwala praktycznie wyeliminować niedokładności spowodowane lepkością cieczy, włoskowatością i niejednakową średnicą rurek wzdłuż ich długości, dlatego też służy do najdokładniejszych pomiarów małych różnic ciśnień (rys. 8).

Podczas pomiaru manometrem kompensacyjnym ciecz w naczyniu (2) utrzymujemy na stałym poziomie. Wewnątrz naczynia (2) znajduje się ostrze pomiarowe (7) w kształcie trójkąta. Gdy powierzchnia cieczy w naczyniu dotknie ostrza, wówczas ostrze wraz ze swoim odbiciem w lustrze cieczy ukazuje obraz obserwowany w zwierciadle (14).

Pomiar za pomocą manometru kompensacyjnego odbywa się w następujący sposób: naczynie (1) ustawiamy w położeniu odpowiadającym zerowym nastawom na skalach (9) i (13). Oba króćce (11) i (12) łączymy z atmosferą i doprowadzamy do zetknięcia ostrza (7) z powierzchnią cieczy przez podnoszenie lub opuszczenie naczynia (2) za pomocą śruby (6) lub poprzez dolewanie cieczy.

Zasadą jest, aby większe ciśnienie podłączyć do króćca (11), zaś mniejsze do króćca (12), wskutek czego poziom cieczy w naczyniu (2) opadnie. W celu przywrócenia pierwotnego położenia należy podnieść naczynie (1) przez podkręcenie głowicą (5), aż do zaobserwowania w zwierciadle (14) obrazu pokazanego osobno na rys. 8. Wysokość na jaką należy podnieść naczynie (1), aby skompensować mierzoną różnicę ciśnień, odczytujemy na skali (9)

w milimetrach oraz na skali (13) – naciętej na główicy (5) – w setnych częściach milimetra.



Rys. 8. Mikromanometr kompensacyjny typu Askania
 1, 2 – naczynia, 3 – wąż gumowy, 4 – śruba mikrometryczna, 5 – główica, 6 – śruba regulacyjna, 7 – ostrze pomiarowe, 8 – wskaźnik, 9 – skala milimetrowa, 10 – wskaźnik, 11, 12 – króćce, 13 – skala mikrometryczna, 14 - zwierciadło

W mikromanetrze kompensacyjnym dzięki odczytowi optycznemu uzyskuje się dokładność wskazań $0,02 \pm 0,04$ mm.

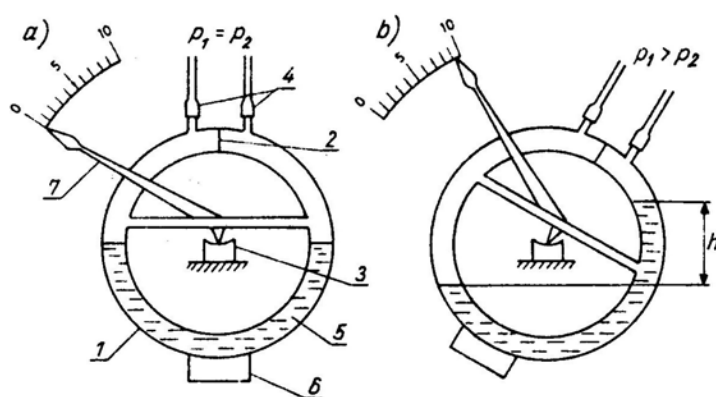
Uwaga. Przyrząd przed przystąpieniem do pomiarów należy dokładnie ustawić według poziomicy wchodzącej w skład przyrządu.

Istnieją jeszcze inne manometry cieczowe, które mogą spełniać rolę mikromanometrów. Jednym z nich jest tzw. **waga pierścieniowa** (manometr pierścieniowy). Schemat wagi pierścieniowej przedstawiono na rys. 9. Zasadniczą część tego manometru stanowi zamknięte pierścieniowe naczynie (1), napełnione częściowo cieczą manometryczną (5), przedzielone u góry szczelną przegrodą (2). Naczynie to jest podwieszane na łożysku nożowym (3). Z obu stron przegrody umieszczone są króćce (4) przeznaczone do połączenia z obszarami mierzonego ciśnienia.

W dolnej części naczynia pierścieniowego jest zawieszony obciążnik (6), od ciężaru którego zależy wielkość wychylenia wagi. Jeżeli obydwa ciśnienia działające na naczynie pierścieniowe są równe, $p_1 = p_2$ (rys. 9a), to poziomy

cieczy manometrycznej w obu częściach pierścienia są jednakowe, a wskazówka (7) pokrywa się z zerową kreską skali. Jeżeli $p_1 > p_2$ (rys. 9b), wtedy ciecz w naczyniu przemieści się tak jak w manometrze i utworzy się różnica poziomów h , spełniająca warunek

$$\Delta p = p_1 - p_2 = h \rho g. \quad (7)$$



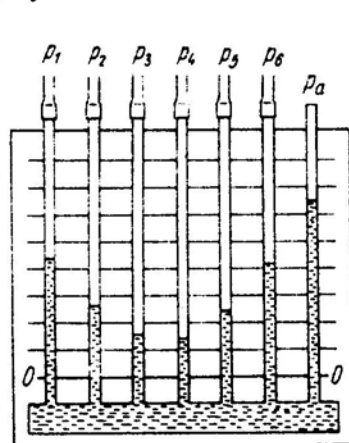
Rys. 9. Waga pierścieniowa: a) $p_1 = p_2$, b) $p_1 > p_2$
 1 – naczynie pierścieniowe, 2 – przegroda, 3 – łożysko, 4 – króćce, 5 – ciecz manometryczna, 6 – obciążnik, 7 – wskazówka

Waga pierścieniowa w specjalnym wykonaniu może mieć zakres od 0 do 10 mm H₂O i dużą czułość i dokładność.

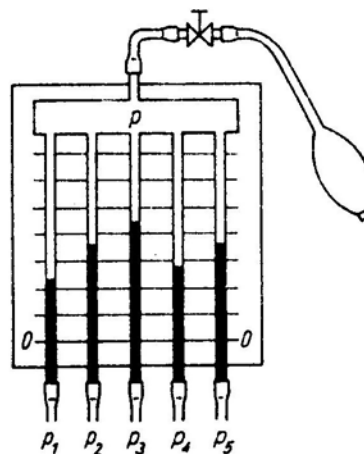
Innym przykładem mikromanometru jest **manometr U-rurkowy dwuczynnikowy** – patrz [17, s. 35]. Wzrost dokładności wskazań w tym przypadku został osiągnięty dzięki użyciu dwóch nie mieszających się cieczy o mało różniących się gęstościach (np. woda i olej).

Należy jeszcze wspomnieć o **manometrze bateryjnym** zwykłym i odwróconym. Manometr bateryjny daje możliwość jednoczesnego pomiaru w wielu punktach. Obecnie manometry bateryjne są stosowane przy umiarkowanej liczbie rurek, głównie w laboratoriach dydaktycznych. Pomiaru ciśnień w bardzo wielu punktach dokonywane dawniej przy użyciu tych manometrów zostały zastąpione przez pewne układy z wykorzystaniem tzw. komutatora i przetworników elektrycznych ciśnienia, co będzie w dalszym ciągu nieco szerzej omówione.

Na rysunku 10 pokazano często stosowany zwykły manometr bateryjny do pomiaru nadciśnienia względem ciśnienia atmosferycznego p_a . W powszechnym użyciu są również mikromanometry bateryjne z rurkami pochyłymi. Odwrócony manometr bateryjny (rys. 11) nie wymaga stosowania dodatkowej cieczy manometrycznej, gdyż opiera się na wskazaniach cieczy będącej przedmiotem badań. Manometr ten bywa stosowany tylko do pomiarów różnicy ciśnień, np. p_2 i p_1 itp., gdyż nie jest wówczas potrzebna znajomość ciśnienia p . Dowolne ciśnienie p można wywołać przez sprężenie powietrza. Zasada odwróconego układu znajduje zastosowanie nie tylko do manometrów bateryjnych, lecz także do zwykłych U-rurek.



Rys. 10. Zwykły manometr bateryjny



Rys. 11. Odwrócony manometr bateryjny

Manometry cieczowe są bardzo wrażliwe na uszkodzenia mechaniczne, wobec czego mają charakter przyrządów laboratoryjnych. W pomiarach technicznych stosuje się również manometry cieczowe, lecz z przyjęciem odpowiednich zabezpieczeń. Znane są na przykład manometry na normalne spiętrzenia, lecz na wysokie ciśnienia statyczne do około 6,3 MPa, dzięki zastosowaniu grubościennych rurek szklanych osadzonych w blokach metalowych i zaopatrzonych w zawory.

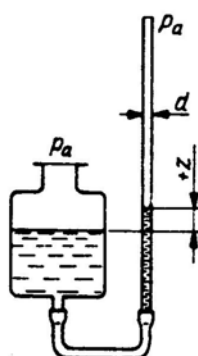
Warto zwrócić uwagę na błąd wskazań manometrów cieczowych wynikający ze zjawiska włoskowatości. Zjawisko to powoduje wzniesienie włoskowatej cieczy zwilżającej $+z$ (rys. 12) lub obniżenie włoskowatej cieczy niezwilżającej $-z$. Wzniesienie lub obniżenie włoskowate zależą głównie od napięcia powierzchniowego cieczy i wewnętrznej średnicy rurki d . Dla wody o temperaturze 15°C w powietrzu obowiązuje przybliżony wzór

$$z \approx \frac{30}{d} [\text{mm}], \quad (8)$$

a dla rtęci w tych samych warunkach

$$z \approx -\frac{12}{d} [\text{mm}], \quad (9)$$

gdzie średnica d jest określona w milimetrach.



Rys. 12. Wzniesienie włoskowate

W literaturze zaleca się stosowanie rurek o minimalnej średnicy $d = 15$ mm dla wody i $d = 8$ mm dla rtęci. Jak wynika z równań (8) i (9), średnice te nie zapewniają dostatecznej dokładności pomiaru. W praktyce, zwłaszcza w mikromanometrach, są stosowane rurki o znacznie mniejszych średnicach, a zatem powstaje każdorazowo potrzeba uwzględnienia wpływu włoskowatości, przy czym dotyczy to tylko piezometrów i manometrów jednoramiennych, gdyż w manometrach dwuramiennych wpływ włoskowatości równoważy się.

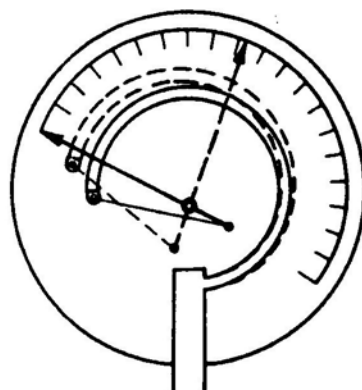
Przy pomiarach ciśnień w bardzo wielu punktach, np. w badaniach aerodynamiki samolotu lub maszyn przepływowych i przesyłaniu sygnałów na duże odległości, stosuje się następujące układy pomiarowe [1]. Sygnały pneumatyczne przez przewody zwane impulsowymi są podawane do tzw. komutatora, który przez bardzo precyzyjny zawór szybkoobrotowy łączy poszczególne punkty pomiarowe z **elektrycznym przetwornikiem ciśnienia**. Przetworniki te będą omówione w p. 1.3. Przetwornik z kolei przetwarza sygnały ciśnieniowe na elektryczne i przesyła na dowolną odległość do urządzenia rejestrującego.

Działanie całego układu jest zwykle zautomatyzowane i sterowane z komputera wyposażonego w odpowiednie programy do akwizycji danych

pomiarowych. Budowane obecnie komutatory ciśnień mają do 96 wejść sygnałów pneumatycznych. Układ taki używa tylko jednego elektrycznego przetwornika ciśnienia, przez co jest stosunkowo tani. Komutacja może następować również po stronie elektrycznej, wymaga to jednak zastosowania wielu przetworników elektrycznych ciśnienia.

1.2. Manometry mechaniczne

Manometry mechaniczne, zwane sprężystymi, działają na zasadzie wykorzystania sprężystych odkształceń proporcjonalnych od wielkości ciśnienia. Jako elementy podlegające odkształceniom są stosowane rurki, membrany, puszki itp., stąd też pochodzą nazwy tych manometrów. Manometry mechaniczne znajdują szerokie zastosowanie w urządzeniach technicznych.



Rys. 13. Manometr z rurką Bourdona

Najczęstsze stosowanie znalazły **manometry z rurką Bourdona** (rys. 13). Otwarty koniec zwiniętej rurki jest zamocowany na stałe do króćca doprowadzającego ciśnienie, zaś zamknięty koniec jest połączony z układem wskazującym. Wzrost ciśnienia powoduje odkształcenie rurki, co przedstawiono liniami przerywanymi. Manometry tego rodzaju są budowane na różne zakresy ciśnień, w zależności od przekroju i materiału rurki. Ogólny zakres stosowalności tych manometrów jest bardzo różny i wynosi od 0 do 1000 MPa. Dokładność wskazań została znormalizowana w sposób następujący: klasa 1,5 i 2,5 – manometry zwykłe, klasa 0,6 – manometry kontrolne, klasa 0,2 do 0,3 – manometry wzorcowe. Klasa 1,5 oznacza przykładowo, że błąd wskazań nie powinien przekraczać $\pm 1,5\%$ zakresu wskazań.