



MINISTERSTWO EDUKACJI
NARODOWEJ



Alina Jakska

Pomiary parametrów procesowych 311[31].Z2.04

Poradnik dla ucznia

Wydawca
Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy
Radom 2006

Recenzenci:

mgr inż. Jacek Malec

mgr Barbara Przedlacka

Opracowanie redakcyjne:

mgr inż. Małgorzata Urbanowicz

Konsultacja:

dr inż. Bożena Zając

Poradnik stanowi obudowę dydaktyczną programu jednostki modułowej 311[31].Z2.04 „Pomiary parametrów procesowych” zawartego w modułowym programie nauczania dla zawodu technik technologii chemicznej 311[31].

Wydawca

Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom 2006

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE	3
2. WYMAGANIA WSTĘPNE	5
3. CELE KSZTAŁCENIA	6
4. Materiał nauczania	7
4.1. Klasyfikacja przyrządów, metod, błędów pomiaru. Pomiar wielkości elektrycznych	7
4.1.1. Materiał nauczania	7
4.1.2. Pytania sprawdzające	12
4.1.3. Ćwiczenia	13
4.1.4. Sprawdzian postępów	13
4.2. Pomiar temperatury i ciśnienia	14
4.2.1. Materiał nauczania	14
4.2.2. Pytania sprawdzające	34
4.2.3. Ćwiczenia	34
4.2.4. Sprawdzian postępów	36
4.3. Pomiar poziomu cieczy i natężenia przepływu płynów	37
4.3.1. Materiał nauczania	37
4.3.2. Pytania sprawdzające	48
4.3.3. Ćwiczenia	49
4.3.4. Sprawdzian postępów	50
4.4. Pomiar wilgotności, lepkości, składu gazów	51
4.4.1. Materiał nauczania	51
4.4.2. Pytania sprawdzające	57
4.4.3. Ćwiczenia	57
4.4.4. Sprawdzian postępów	58
5. Sprawdzian osiągnięć	59
6. Literatura	64

1. WPROWADZENIE

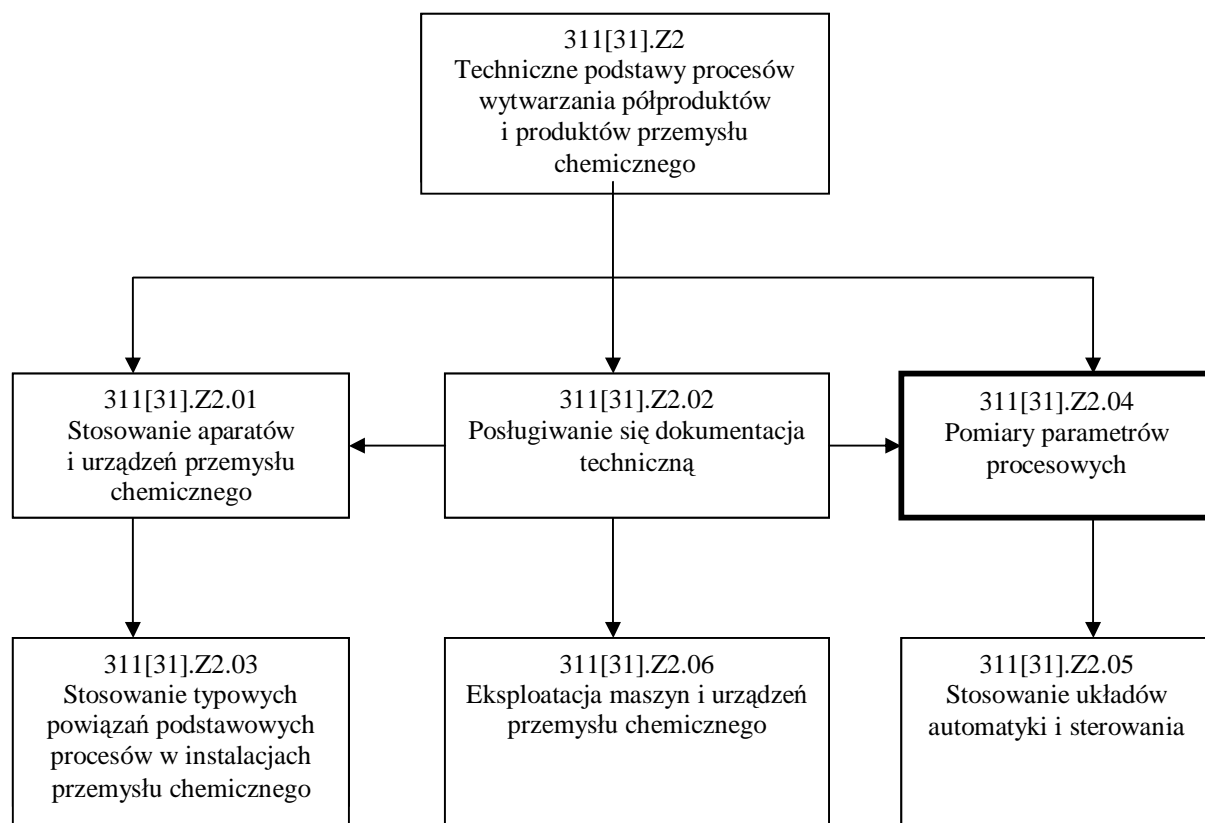
Poradnik ułatwi Ci przyswajać wiedzę z zakresu pomiarów parametrów procesowych. Poznasz budowę, zasady działania różnych rodzajów przyrządów pomiarowych.

W poradniku umieszczono :

- wymagania wstępne, wykaz umiejętności, jakie powinieneś posiadać przed rozpoczęciem pracy z poradnikiem,
- cele kształcenia, wykaz umiejętności, jakie opanujesz w wyniku procesu kształcenia,
- materiał nauczania, informacje niezbędne do opanowania treści zawartych w jednostce modułowej i realizacji celów kształcenia,
- pytania sprawdzające wiedzę niezbędną do wykonania ćwiczeń,
- ćwiczenia kształtujące umiejętności praktyczne,
- sprawdzian postępów, umożliwiający określenie poziomu wiedzy po wykonaniu ćwiczenia,
- sprawdzian osiągnięć, umożliwiający sprawdzenie wiadomości i umiejętności opanowanych podczas realizacji programu jednostki modułowej,
- literaturę uzupełniającą.

Bezpieczeństwo i higiena pracy

W czasie pobytu w pracowni musisz przestrzegać regulaminów, przepisów bhp oraz instrukcji przeciwpożarowych, wynikających z rodzaju wykonywanych prac. Przepisy te poznasz podczas trwania nauki.



Schemat układu jednostek modułowych

2. WYMAGANIA WSTĘPNE

Przystępując do realizacji programu jednostki modułowej, powinieneś umieć:

- korzystać z różnych źródeł informacji,
- czytać tekst ze zrozumieniem,
- odczytywać rysunki techniczne,
- zorganizować stanowisko pracy laboratoryjnej,
- wykorzystywać znajomość praw fizyki dotyczących elektryczności,
- zastosować zasady bezpiecznej pracy podczas styczności z urządzeniami elektrycznymi,
- zinterpretować wyniki pomiarów.

3. CELE KSZTAŁCENIA

W wyniku procesu kształcenia, powinieneś umieć:

- rozróżnić bezpośrednio i pośrednio rodzaje pomiarów,
- scharakteryzować pojęcia: klasa dokładności przyrządu, czułość przyrządu,
- rozróżnić rodzaje błędów: systematyczny, przypadkowy, grubo, bezwzględny, względny,
- scharakteryzować metody pomiarów parametrów procesowych,
- dobrać przyrządy do parametrów badanego układu i założonej dokładności,
- posłużyć się instrukcjami obsługi podczas użytkowania przyrządów pomiarowych,
- obsłużyć przyrządy pomiarowe wskazówkowe, elektryczne i elektroniczne,
- zastosować sondy pomiarowe, stanowiące wyposażenie przyrządów pomiarowych,
- obliczyć i oszacować błędy pomiarów,
- rozpoznać na uproszczonych schematach punkty pomiarów parametrów procesowych: temperatury, ciśnienia, strumienia objętości lub masy, poziomu cieczy i innych,
- zmierzyć podstawowe wielkości elektryczne: napięcie, natężenie prądu, moc i rezystancję,
- zmierzyć wielkości charakteryzujące proces technologiczny: temperaturę, ciśnienie, poziom cieczy, natężenie przepływu cieczy i gazów, wilgotność, lepkość,
- dokonać analizy składu reagentów,
- wyjaśnić przyczyny powstawania błędów w pomiarach parametrów procesowych,
- zastosować komputer do obróbki wyników pomiarów,
- wykorzystać interfejsy przyrządów uniwersalnych do obróbki wyników i pomiarów za pomocą komputera,
- wykorzystać w sposób racjonalny substancje i czynniki energetyczne,
- sporządzić dokumentację pomiarową,
- zinterpretować wyniki pomiarów,
- przeprowadzić konserwację przyrządów kontrolno-pomiarowych oraz przechowywać je w odpowiednich warunkach,
- zorganizować stanowisko pracy laboratoryjnej,
- zastosować przepisy bhp oraz ochrony przeciwpożarowej podczas wykonywania prac pomiarowych.

4. MATERIAŁ NAUCZANIA

4.1. Klasyfikacja przyrządów, metod, błędów pomiaru. Pomiar wielkości elektrycznych

4.1.1. Materiał nauczania

Wielkość mierzona jest cechą układu dającą się zmierzyć, np. ciśnienie, gęstość. Pomiar wielkości polega na porównaniu jej z inną wielkością tego samego rodzaju, umownie przyjętą za jednostkę miary. Każda mierzona wielkość przedstawiana jest jako iloczyn wartości liczbowej i jednostki miary. Wymagania dotyczące procesów pomiarowych i wyposażenia pomiarowego ujmuje polska norma PN-EN ISO 10012:2004, a urządzenia do pomiarów i sterowania procesami przemysłowymi – polska norma PN-EN 61298-4:1999.

Wykonanie pomiaru obejmuje następujące etapy:

- przyjęcie odpowiedniej jednostki miary,
- wybór metody pomiaru,
- wybór narzędzia pomiarowego,
- wykonanie samego pomiaru i uzyskanie wartości liczbowej,
- ocena dokładności pomiaru.

Jednostka miary, w jakiej jest wyrażana wartość mierzonej wielkości, musi być zgodna z obowiązującym układem jednostek miar – SI.

Jednostkami podstawowymi w układzie SI są: metr, kilogram, sekunda, amper, kelwin, mol, candela. Jednostkami uzupełniającymi – radian i steradian. Do zapisu bardzo dużych lub bardzo małych miar wprowadzono jednostki wielokrotne i podwielokrotne. Dopuszcza się również tzw. jednostki pozaukładowe, np. stopień Celsjusza.

Czynności związane z ustaleniem wartości liczbowej wielkości nazywa się pomiarem. Rozróżnia się dwa rodzaje pomiarów:

- pomiar bezpośredni, w którym szukaną miarę wielkości otrzymuje się z pomiaru przyrządem wywzorcowanym w danych jednostkach, np. pomiar gęstości areometrem,
- pomiar pośredni, w którym szukaną miarę wielkości otrzymuje się na podstawie przeliczeń innych wielkości uzyskanych w wyniku pomiarów bezpośrednich, np. pomiar masy i objętości, aby obliczyć gęstość.

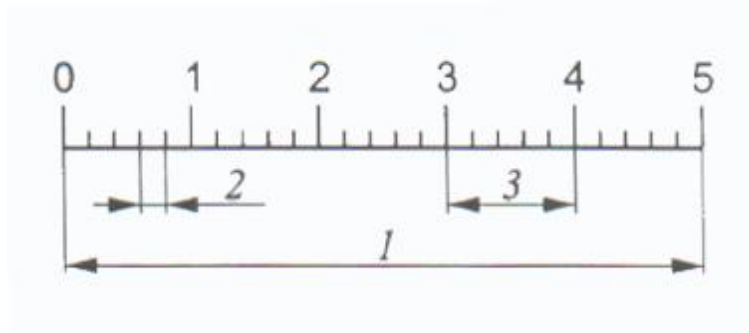
Przyrządy pomiarowe zazwyczaj składają się z następujących elementów:

- czujnika, który odbiera informacje o wielkości mierzonej,
- linii przesyłowych, przekazujących sygnały od czujnika do miernika,
- miernika, podającego wynik pomiaru.

Mierniki ze względu na sposób wskazywania wyników dzielą się na analogowe i cyfrowe. W miernikach cyfrowych jeden odczyt odpowiada pewnemu zakresowi zmian wartości mierzonej, wskazania miernika zmieniają się skokowo. W miernikach analogowych wskazania zmieniają się w sposób ciągły. Miernik analogowy posiada podziałkę naniesioną na podzielnik oraz wskazówkę lub płamkę świetlną. Podziałka jest uporządkowanym zbiorem znaków zwanych wskazami (wręby, kreski, punkty).

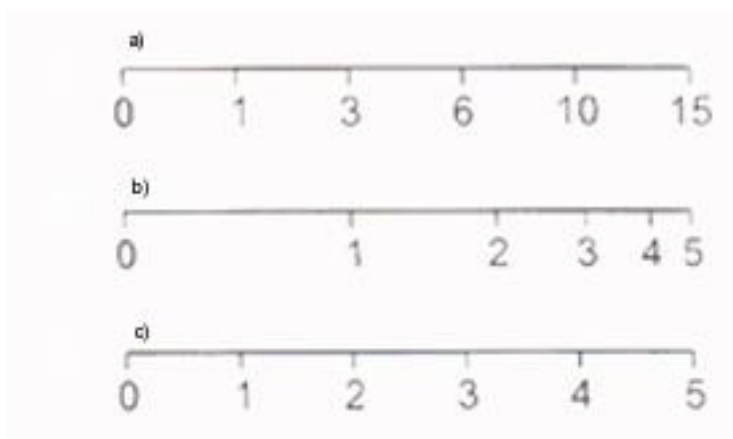
Wielkościami charakteryzującymi podziałkę są:

- działka elementarna – odległość między dwoma sąsiednimi wskazami,
- działka podstawowa – odległość między dwoma wskazami oznaczonymi liczbami,
- długość podziałki – odległość między wskazami ograniczającymi podziałkę.



Rys. 1. Podziałka przyrządu pomiarowego: 1 – długość podziałki, 2 – działka elementarna, 3 – działka podstawowa [5]

Podziałki mogą być prostoliniowe lub krzywoliniowe. Podziałki o stałej długości wszystkich działek nazywa się jednostajnymi, o stałej wartości wszystkich działek - równomiernymi. Jeżeli podziałka jest równocześnie równomierna i jednostajna nazywa się podziałką regularną.



Rys. 2. Rodzaje podziałek: a) jednostajna, b) równomierna, c) regularna [5]

Błędy pomiarów

Każdy pomiar jest obarczony błędem. Błędy można podzielić biorąc pod uwagę przyczyny powstawania lub ich charakter. Do pierwszej grupy należą błędy, które mogą być związane z przyrządem pomiarowym (niedokładność wykonania, tarcie, poślizgi i zużycie mechanizmów itp), metodą pomiaru (np. nieznanomość warunków pomiaru, źle dobrany miernik), obserwacji lub odczytu – najczęściej występujący tu błąd to błąd paralaksy).

Do drugiej grupy należą błędy: systematyczne, przypadkowe i grube.

Błąd systematyczny powstaje przy wykonywaniu wielu pomiarów tej samej wartości wielkości mierzonej w tych samych warunkach. Ma on na ogół wartość stałą, może się jednak zmieniać, jeżeli zmieniają się warunki pomiaru.

Błędy systematyczne można wyznaczyć. Można je wyeliminować lub wprowadzić poprawki. Po uwzględnieniu poprawki otrzymaną wartość przyjmuje się za wartość poprawną.

Błędem bezwzględnym przyrządu lub bezwzględnym błędem wskazania Δ nazywa się różnicę między wartością nominalną tj. odczytaną na przyrządzie x a wartością dokładną n

$$\Delta = x - n$$

Błąd względny

$$\delta = \frac{\Delta}{n} \quad \text{lub w } \% \quad \delta = \frac{\Delta}{n} \cdot 100$$

Błąd zmieniający się w sposób nieprzewidywany, zarówno co do wartości bezwzględnej, jak i co do znaku, przy wykonywaniu serii pomiarów tej samej wartości wielkości mierzonej w niezmiennych warunkach nazywa się błędem przypadkowym. Przyczyny powstawania błędów przypadkowych nie są znane. Aby otrzymać najbardziej prawdopodobną wartość poprawną wielkości mierzonej, należy obliczyć średnią arytmetyczną z kilku wyników pomiaru, uwzględniając błąd systematyczny w postaci poprawek. Błędów przypadkowych nie można wyeliminować, można jedynie z dużym prawdopodobieństwem określić przedział, w jakim znajduje się wartość poprawna wielkości mierzonej, obliczając błąd średni kwadratowy i błąd średni średniej arytmetycznej.

Błędy grube powstają w wyniku np. pomyłki w zapisie, błędnego odczytu spowodowanego zmęczeniem, złym oświetleniem. Ponieważ takie wyniki pomiaru znacznie różnią się od pozostałych odrzuca się je.

Każdy przyrząd pomiarowy ma określoną dokładność, wynikającą z jego konstrukcji. Często dokładność przyrządu określa się za pomocą klasy dokładności. Klasa dokładności jest liczbą niemianowaną, np. 0,1, 0,5, 1,5. Oznacza dopuszczalny % błędu obliczonego z całej długości podziałki, jaki można popełnić, dokonując pomiaru tym przyrządem.

Czułość przyrządu jest definiowana jako najmniejsza wartość przyrostu wielkości mierzonej, przy której wskazania przyrządu ulegną zmianie.

Przyrządy pomiarowe zgodnie z obowiązującymi przepisami muszą być okresowo poddawane sprawdzeniu i posiadać aktualne świadectwo legalizacji wydane przez Urząd Miar. Wyniki pomiarów często przedstawia się w postaci graficznej. Ponieważ zazwyczaj istnieje pewien rozrzut wartości zmierzonych, należy przeprowadzić interpolację tak, aby otrzymać kształt krzywej zbliżony do rzeczywistej.

Obróbki wyników pomiaru można dokonać komputerowo. Wyniki pomiarów za pomocą odpowiednich łącz przesyłane są do komputera. Obróbka wyników następuje np. w programach MS Excel, Lotus 1, 2, 3, które generują wykresy, analizują je, opisują, drukują i archiwizują.

Przyrządy do pomiaru wielkości elektrycznych

Przyrządy te, podobnie jak i inne przyrządy pomiarowe, ze względu na charakter pracy, dzielą się na:

- wskaźniki – stwierdzają jedynie obecność lub zanik napięcia, prądu itp.,
- mierniki – mierzą określoną wielkość elektryczną,
- liczniki – zliczają (np. liczniki energii elektrycznej).

Ze względu na zasadę działania można je podzielić m.in. na:

- magnetoelektryczne,
- elektromagnetyczne,
- elektrodynamiczne,
- ferrodynamiczne.

Mierniki magnetoelektryczne

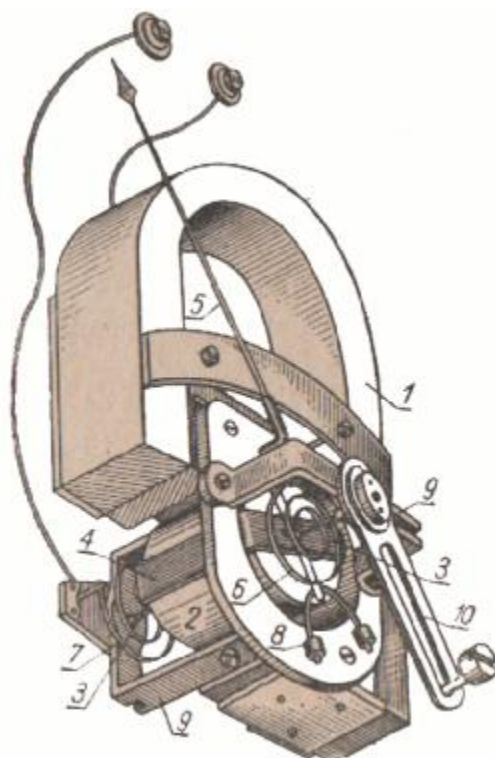
Działają na zasadzie oddziaływania pola magnetycznego magnesu na przewód, w którym płynie prąd.

W polu silnego magnesu trwałego umieszczona jest prostokątna mała zwojnica z drutu miedzianego, nawinięta na ramce aluminiowej. Ramka może obracać się na metalowych czopach opartych w łożyskach. Do jednego czopa przymocowana jest wskazówka. Zwojnica obejmuje nieruchomy walec z miękkiej stali, przymocowany do trzymacza, w którym osadzone są także łożyska. Zwojnica wraz z ramką, osiami i wskazówką tworzy układ ruchomy mogący obracać się w granicach 90° . Prąd do zwojnicy doprowadzają dwie spiralne sprężynki, które równocześnie wytwarzają moment zwrotny, przeciwdziałający odchyleniu układu ruchomego z położenia zerowego. Pod wpływem płynącego przez zwojnicę prądu i pola magnetycznego wytworzonego przez magnes, układ ruchomy obraca się do chwili, gdy moment obrotowy ramki zostanie zrównoważony przez moment odporowy sprężynki. Ciężarki służą do zrównoważenia układu ruchomego.

Kąt odchylenia wskazówki zależy od natężenia prądu płynącego przez zwojnicę.

Mierniki magnetoelektryczne służą do pomiarów bardzo małych natężeń prądu stałego do 10^{-1} A. Zakres pomiarowy można zwiększyć przez bocznikowanie.

Mierniki magnetoelektryczne buduje się również jako woltomierze, różnią się od amperomierzy rezystancją uzwojenia.



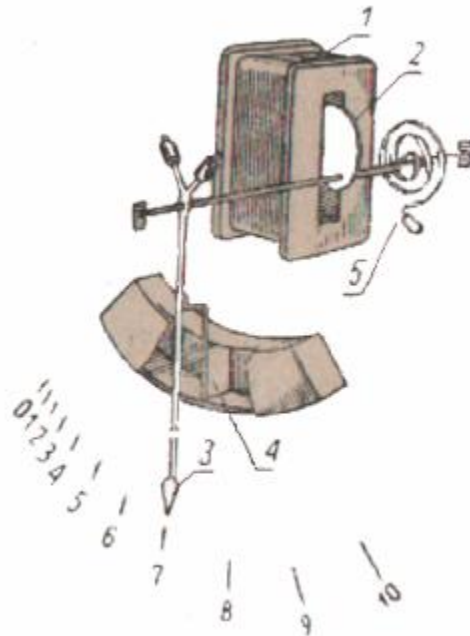
Rys.3. Miernik magnetoelektryczny z ruchomą cewką:

1 – magnes trwały, 2 – nieruchomy walec, 3 – czopy stalowe, 4 – zwojnica, 5 – wskazówka, 6, sprężynki spiralne, 8 – ciężarki, 9 – trzymacz, 10 – zerownik [4]

Mierniki elektromagnetyczne

Zasada działania tych mierników opiera się na zasadzie oddziaływania pola magnetycznego wytworzonego przez prąd mierzony, na rdzeń z miękkiej stali. Miernik składa się z cewki nieruchomej i płaskiej płytki z miękkiej stali, umocowanej mimośrodowo na osi wraz ze wskazówką. Na osi jest też osadzone skrzydełko tłumika powietrznego, składającego

się z komory tłumikowej, w której porusza się skrzydełko. Moment tłumiący powstaje podczas ruchu elementu ruchomego na skutek oporu powietrza wytwarzanego w czasie ruchu skrzydełka w komorze. Prąd płynący przez zwoje cewki wywołuje pole magnetyczne, które wciąga płytkę żelazną do wnętrza cewki. Wytwarza się moment napędowy, a moment zwrotny wytwarza sprężynka. Moment napędowy oraz odpowiadające mu przesunięcie wskazówki, zależą od kwadratu natężenia płynącego prądu oraz indukcyjności własnej cewki. Podziałki tych mierników nie są regularne.



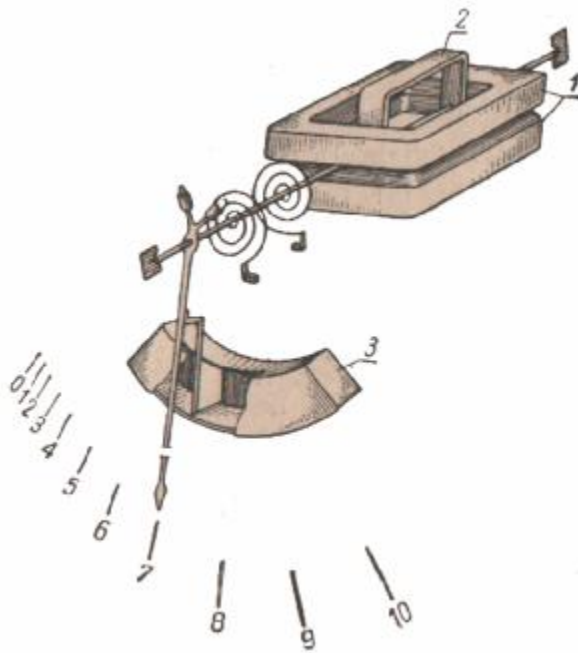
Rys. 4. Miernik elektromagnetyczny 1 – cewka nieruchoma, 2 – płytkę, 3 – wskazówka, 4 – skrzydełko, 5 – sprężynka zwrotna [4]

Mierniki elektromagnetyczne są budowane jako amperomierze i woltomierze prądu stałego i przemiennego.

Mierniki elektrodynamiczne

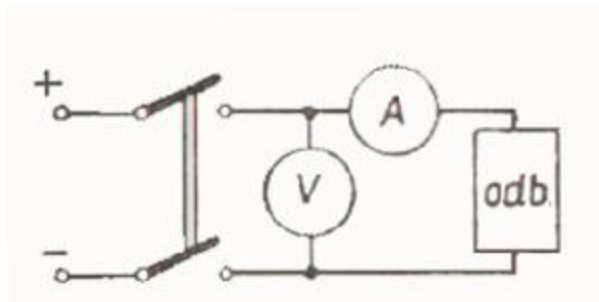
Działanie tych mierników opiera się na zasadzie wzajemnego oddziaływania przewodów, w których płynie prąd.

Miernik składa się z dwóch cewek: nieruchomej i ruchomej. Cewka ruchoma umieszczona na osi ze wskazówką i skrzydełkiem tłumika powietrznego stanowi układ ruchomy miernika. Do ruchomej cewki prąd doprowadzany jest za pośrednictwem sprężynek. Prądy płynące przez cewki wytwarzają pole magnetyczne. Cewka ruchoma dąży do zajęcia położenia, w którym obydwa pola magnetyczne będą miały taki sam zwrot. Powstały moment napędowy powoduje obrót ruchomej cewki trwającej do czasu zrównoważenia przez moment zwrotny sprężynek. Mierniki elektrodynamiczne stosuje się do pomiarów prądu stałego jak i zmiennego. Buduje się je jako amperomierze, woltomierze lub watomierze [E. Nieciejowski].



Rys. 5. Miernik elektrodynamiczny: 1 – cewka nieruchoma, 2 – cewka ruchoma, 3 – tłumik powietrzny [4]

Moc prądu można zmierzyć bezpośrednio za pomocą watomierza elektrodynamicznego lub za pomocą amperomierza i woltomierza.



Rys. 6. Pomiar mocy prądu stałego za pomocą amperomierza i woltomierza [4]

4.1.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania sprawdzisz czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Co to jest błąd paralaksy?
2. Która działka jest większa podstawowa czy elementarna?
3. Czym różnią się: podziałka równomierna i regularna?
4. Jakie mogą być przyczyny powstawania błędów systematycznych?
5. Na czym polega pomiar pośredni wielkości mierzonej?
6. Na jakiej zasadzie działa miernik magnetoelektryczny?
7. W jaki sposób można zmierzyć moc urządzenia elektrycznego?

4.1.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie1

Określ moc grzejnika, dysponując miernikiem uniwersalnym. Zakładana sprawność urządzenia wynosi 90%.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) przygotować stanowisko pracy,
- 2) zmierzyć napięcie,
- 3) zmierzyć natężenie,
- 4) obliczyć moc urządzenia,
- 5) obliczyć całkowitą moc urządzenia, uwzględniając jego sprawność.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- miernik uniwersalny,
- urządzenie, którego moc należy wyznaczyć (np. grzejnik elektryczny),
- instrukcja bezpiecznej pracy.

4.1.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:	Tak	Nie
1) obliczyć błędy: bezwzględny i względny?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2) wyjaśnić pojęcie „nieczułość” przyrządu pomiarowego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3) wyjaśnić o czym informuje klasa dokładności przyrządu pomiarowego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) obliczyć moc odbiornika elektrycznego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5) określić przyczyny powstawania błędów pomiaru?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6) wymienić z jakich elementów składa się miernik elektrodynamiczny?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7) wyjaśnić zasadę działania mierników elektrodynamicznych?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4.2. Pomiar temperatury i ciśnienia

4.2.1. Materiał nauczania

Podstawowymi parametrami warunkującym prawidłowy przebieg procesu technologicznego w przemyśle chemicznym jest temperatura i ciśnienie. Temperatura oddziałuje na kierunek, szybkość i wydajność reakcji. Dlatego niezmiernie ważna jest jej ciągła kontrola.

Temperatura jest wielkością określającą stopień ogrzania ciała. Nie można jej zmierzyć bezpośrednio. Wobec tego dokonuje się pomiaru innych wielkości fizycznych, które zależą od temperatury i dają się łatwo zmierzyć. Do takich wielkości należą: rozszerzalność cieplna, rezystancja, natężenie promieniowania, ciśnienie pary nasyconej itp.

Pomiary temperatury ze względu na sposób prowadzenia pomiaru dzieli się na stykowe i bezstykowe.

W pomiarach stykowych czujnik termometru dotyka badanego ciała i wymiana ciepła zachodzi bezpośrednio.

Natomiast w pomiarach bezstykowych, temperaturę ciała ocenia się na podstawie pomiaru wielkości dającej się mierzyć bez dotyku czujnika do badanego ciała.

Ze względu na zasadę działania termometry dzieli się na:

- termometry działające na zasadzie rozszerzalności cieplnej cieczy, ciał stałych i gazów. Najczęściej spotykane są termometry cieczowe szklane wypełnione cieczą, która zmienia swoją objętość pod wpływem zmian temperatury. Ciało stałe zmienia swoje wymiary, a gaz zamknięty w stałej objętości zmienia ciśnienie – tak działają termometry bimetalowe i manometryczne;
- termometry rezystancyjne działające na zasadzie zmian rezystancji wraz ze zmianą temperatury;
- termometry termoelektryczne, w których wykorzystuje się powstawanie różnicy potencjałów elektrycznych między dwoma spoinami dwóch różnych metali znajdujących się w różnych temperaturach. Pomiar sprowadza się do pomiaru SEM zależnej od różnicy temperatur obu złączy i rodzaju użytych metali;
- termometry optyczne, w których wykorzystuje się zależność między temperaturą rozżarzonego ciała a wysyłanym przez nie promieniowaniem.

Skale termometryczne

1. Skala termodynamiczna Kelwina. Jednostką jest kelwin (K), definiowany jako $1/273,16$ część temperatury termodynamicznej punktu potrójnego wody. Punkt zerowy tej skali odpowiada najniższej temperaturze, jaką można uzyskać, w której zanika wszelki ruch postępowy i drgający atomów i cząsteczek. Jest to temperatura zwana zerem bezwzględnym.
2. Międzynarodowa praktyczna skala temperatur – MPST, która tym się różni od skali Celsjusza, że opiera się na większej ilości łatwo odtwarzalnych punktów, nie tylko na temperaturze krzepnięcia i wrzenia wody. Przykładowe punkty pokazano w tabeli 1.

Tabela 1. Definicyjne punkty MPST [5]

Rodzaj punktu	Przypisane wartości temperatury wg MPST	
	T (K)	t (°C)
Punkt wrzenia neonu	27,102	-246,048
Punkt wrzenia tlenu	54,361	-182,962
Punkt potrójny wody	273,16	0,01
Punkt wrzenia wody	373,15	100
Punkt krzepnięcia cynku	692,73	419,58
Punkt krzepnięcia srebra	1235,08	961,93
Punkt krzepnięcia złota	1337,58	1064,43

Jednostką temperatury w tej skali jest °C.

3. Skala Celsjusza – opiera się tylko na dwóch odtwarzalnych punktach: temperaturze krzepnięcia i temperaturze wrzenia wody (0 i 100 °C).
4. Skala Fahrenheita opierająca się również na dwóch odtwarzalnych punktach: temperaturze krzepnięcia i wrzenia wody (32 i 212°F).

Termometry rozszerzalnościowe

Termometry cieczowe są dwojakiego rodzaju: rurkowe i pałeczkowe.

Termometry rurkowe składają się z cienkościennej rurki kapilarnej połączonej ze zbiorniczkiem z cieczą termometryczną, podzielną z mlecznego szkła z naniesioną podziałką i rurki szklanej stanowiącej osłonę. Przemysłowe termometry rurkowe w zależności od sposobu mocowania w rurociągu czy zbiorniku wykonywane są jako proste lub kątowe. W celu zabezpieczenia przed uszkodzeniami mechanicznymi są obudowane metalowymi osłonami.

Pomiędzy osłoną a termometrem powinna się znajdować substancja bardzo dobrze przewodząca ciepło, np. olej mineralny. Termometry przemysłowe mają najmniejszą działkę 0,5, 1 lub 5°C. Termometry laboratoryjne są bardziej dokładne i najmniejsze działki wynoszą 0,1, 0,05, 0,02, 0,00°C.

Termometr pałeczkowy zwany też bagietkowym wykonany jest z grubościenną kapilary, która na dole rozszerza się w zbiorniczek wypełniony cieczą termometryczną. Na powierzchni kapilary wytrawiona jest podziałka.

Ciecze termometryczne powinny odznaczać się:

- wysoką temperaturą wrzenia,
- niską temperaturą krzepnięcia,
- liniową zależnością rozszerzalności objętościowej od temperatury,
- niezmiennością własności fizycznych i chemicznych w zakresie mierzonych temperatur.

Tabela 2 Ciecze termometryczne [5]

Ciecz	Zakres stosowania (°C)	
	od	do
Rtęć w szkle	- 35	+650
Rtęć w kwarcu	- 35	+800
Alkohol etylowy	- 80	+ 70
Toluen	- 90	+100
Pentan	-200	+ 30

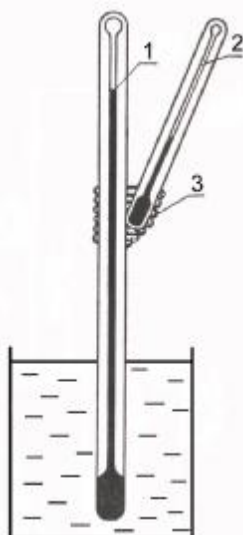
Najszerze zastosowanie znajdują termometry rtęciowe. Rtęć krzepnie w temperaturze $38,86^{\circ}\text{C}$, wrze w temperaturze $356,7^{\circ}\text{C}$ i dlatego zamknięta w zbiorniczku pod normalnym ciśnieniem umożliwia pomiary w zakresie od -35 do 350°C . W celu przedłużenia zakresu pomiarowego kapilarę nad rtęcią napełnia się obojętnym gazem pod zwiększonym ciśnieniem. Zalety rtęci to: duża różnica pomiędzy temperaturą wrzenia i topnienia, prawie proporcjonalna rozszerzalność cieplna w granicach $0 - 200^{\circ}\text{C}$, niskie ciepło właściwe, dobre przewodnictwo cieplne, niezwilżanie szkła.

Pomiar termometrem cieczowym jest obarczony błędem, jeżeli:

- nie uwzględni się bezwładności termometru (należy odczytywać wskazania z pewnym opóźnieniem),
- nie ustawi się oka na wysokości menisku – błąd paralaksy,
- nie uwzględni się takiego zanurzenia termometru, aby słupek cieczy w kapilarze nie wystawał ponad środowisko, którego temperaturę się mierzy,
- źle dobrano termometr (np. o wiele za duży zakres pomiarowy).

Termometry szklane wzorcuje się zwykle przy całkowitym zanurzeniu. Jeżeli przy pomiarze termometr jest zanurzony częściowo, należy wyznaczyć poprawkę na wystający słupek cieczy termometrycznej.

Na rysunku pokazano zestaw do wyznaczania tej poprawki.



Rys. 7. Zestaw do wyznaczania poprawki na wystający słupek cieczy termometrycznej: 1 – termometr mierzący temperaturę, 2 – termometr mierzący średnią temperaturę wystającego słupka cieczy termometrycznej, 3 – izolacja [1]

Dodatkowy termometr umieszcza się na wysokości odpowiadającej połowie wystającego słupka cieczy termometrycznej. Poprawkę oblicza się ze wzoru:

$$\Delta t = n \cdot \alpha (t - t_s)$$

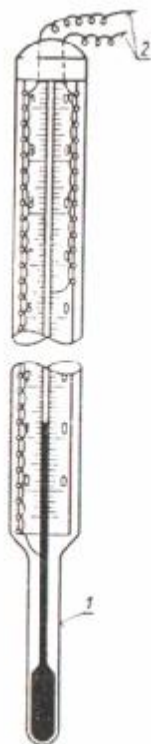
gdzie:

- t – zmierzona temperatura,
- t_s – średnia temperatura wystającego słupka cieczy termometrycznego,
- n – wysokość wystającego słupka cieczy termometrycznej wyrażona w stopniach podziałki,
- α – współczynnik rozszerzalności rtęci w szkłe (zależy od rodzaju szkła i rodzaju termometru, np. dla rtęci w szkłe wynosi $0,000156^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Poprawkę dodaje się do zmierzonej temperatury, jeżeli wystający słupek znajduje się w wyższej temperaturze niż temperatura zmierzona, odejmuje w przeciwnym przypadku. Temperatura rzeczywista jest równa:

$$t_{rz} = t \pm \Delta t$$

Termometry szklane służą nie tylko do odczytu temperatury, ale mogą ją też regulować. W tym celu w kapilarę poniżej podziałki wtapia się drucik platynowy, drugi ruchomy wpuszczony jest w kapilarę i można go ustawiać na głębokości odpowiadającej zadanej temperaturze. Obydwa wyprowadzone są na zewnątrz i połączone np. z układem grzejnym suszarki. Jeśli słupek rtęci podniesie się do zadanej temperatury, to zostanie zamknięty obwód elektryczny i wyłączy ogrzewanie.



Rys. 8. Termometr kontaktowy: 1 – termometr, 2 – druciki platynowe [1]

Termometry metalowe

Stosuje się dwa rodzaje termometrów, w których wykorzystuje się rozszerzalność ciał stałych. Są to termometry prętowe (dylatometryczne) i bimetaliczne.

Czujnik termometru prętowego wykonany jest w postaci rurki z materiału o dużym współczynniku rozszerzalności liniowej, np. miedzi, z umocowanym do jej dna prętem z materiału o małym współczynniku rozszerzalności cieplnej np. porcelany. Różne wydłużenie pręta i rurki powoduje przesunięcie swobodnego końca pręta, które poprzez przekładnię przenoszone jest na wskazówkę.

Czujnik termometru bimetalicznego jest zbudowany z taśmy wykonanej z dwóch pasków metali połączonych trwale na całej długości i dobranych tak, aby ich współczynniki rozszerzalności cieplnej jak najbardziej różniły się. Zmiana temperatury wywołuje różną zmianę długości, w wyniku czego czujnik się wygina i przesunięcie poprzez przekładnię przenoszone jest na wskazówkę.

Termometry metalowe mają ograniczone zastosowanie jako mierniki temperatury ze względu na małą dokładność i dużą bezwładność. Z powodzeniem natomiast stosuje się je do sygnalizacji i regulacji temperatury.

Termometry manometryczne

Czujnikiem jest metalowy zbiorniczek napełniony gazem lub cieczą. Jest on połączony za pośrednictwem miedzianej lub stalowej kapilary z ciśnieniomierzem sprężynowym z rurką Bourdona. Przy zmianie temperatury czujnika zmienia się ciśnienie wewnątrz układu, co powoduje odkształcenie rurki. Pomiar temperatury sprowadza się więc do pomiaru ciśnienia.

Termometry manometryczne można stosować w zależności od użytego czynnika termometrycznego od -50 do $+550^{\circ}\text{C}$. Posiadają znaczą wytrzymałość mechaniczną, łatwo je obsługiwać, można je łączyć z urządzeniami sygnalizacyjnymi i regulującymi temperaturę.

Natomiast wadą jest znaczny wpływ temperatury otoczenia na wskazania oraz trudności przy naprawie uszkodzonych kapilar.

Termometry rezystancyjne

Działają na zasadzie zmiany rezystancji przewodników i półprzewodników przy zmianie temperatury. Większość czystych metali przy ogrzaniu o 1° powiększa swoją rezystancję od 0,4 do 0,6%, natomiast półprzewodniki zmniejszają od 2 do 5,5%.

Termometr rezystancyjny składa się z czujnika, którym jest odpowiednio dobrany rezystor i układu elektrycznego (miernik rezystancji, źródło prądu stałego i przewody łączące czujnik z miernikiem). Pomiar temperatury sprowadza się do pomiaru rezystancji.

Termometry rezystancyjne stosuje się w przemyśle do pomiarów temperatury w zakresie od -200 do 660°C . Charakteryzują się dużą dokładnością pomiaru, możliwością przenoszenia wskazań na znaczne odległości. Wadą jest konieczność zasilania z obcego źródła prądu.

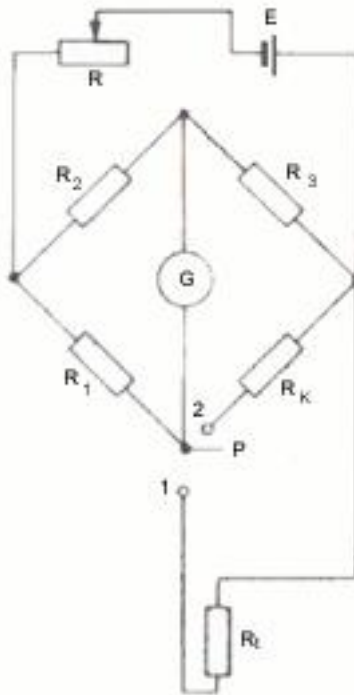
Materiały stosowane na czujniki termometrów rezystancyjnych powinny spełniać następujące warunki:

- zmianom temperatury powinny towarzyszyć znaczne zmiany rezystancji,
- zmiana rezystancji powinna być proporcjonalna do zmiany temperatury,
- w warunkach roboczych nie powinny zmieniać własności fizycznych i chemicznych,
- temperatura topnienia lub przemian alotropowych powinna znacznie przekraczać górną granicę podziałki.

Powyższe wymagania spełnia czysta platyna w zakresie temperatur -200 do 850°C . Jednak ze względu na wysoką cenę ogranicza się jej stosowanie i zastępuje np. nikiem ($-70 \div 250^{\circ}\text{C}$) lub miedzią ($-50 \div 250^{\circ}\text{C}$). Czujniki wykonuje się z drutu lub taśmy nawiniętej na ogniotrwały korpus (mika, porcelana, topiony kwarc). Zabezpiecza się je przed uszkodzeniami mechanicznymi, chemicznymi, zwarciem umieszczając w osłonie.

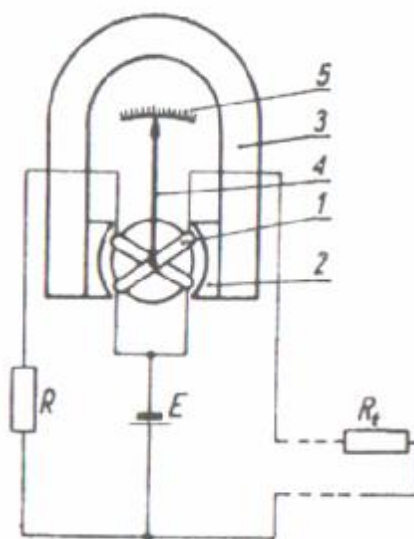
Czujniki rezystancyjne wykonuje się również z półprzewodników tzw. termistorów. Są to tlenki metali takich, jak: nikiel, kobalt, miedź, mangan, żelazo. Używa się ich do pomiaru temperatur nieprzekraczających 300°C . Zaletą ich jest dziesięciokrotnie większa zmiana rezystancji, przypadająca na zmianę temperatury równą 1°C , w porównaniu z czujnikami metalowymi oraz małe rozmiary. Czujniki te wykonuje się w postaci krążków, perełek o średnicy do 6mm.

Do pomiaru rezystancji czujnika stosuje się mostki zrównoważone, niezrównoważone lub logometry. Do pomiarów przemysłowych często stosuje się układ mostka niezrównoważonego (metoda wychyłowa).



Rys. 9. Mostek niezrównoważony [5]

W jedno ramię mostka włączony jest rezystor termometryczny R_t . Rezystory R_1 , R_2 , R_3 mają stałą rezystancję. Mostek zasilany jest prądem stałym z ogniwa E . Rezystor R służy do utrzymywania stałego napięcia źródła prądu. Zmian dokonuje się przy włączeniu w obwód rezystora R_k , który posiada stałą rezystancję równą rezystancji czujnika w temperaturze 0 lub 20°C . Po doprowadzeniu mostka do równowagi opornikiem R (przez galwanometr nie płynie prąd) w obwód włącza się czujnik R_t . Wychylenie wskazówki galwanometru zależy od wartości temperatury. Galwanometr jest wywzorcowany w jednostkach temperatury. Innym często stosowanym miernikiem jest miernik magnetoelektryczny zwany logometrem.



Rys. 10. Logometr: 1 – cewka, 2 – nabiegunniki, 3 – magnes, 4 – wskazówka, 5 – podziałka [5]

Jego zasadniczą częścią są dwie cewki skrzyżowane pod kątem około 40° , osadzone sztywno na ruchomym rdzeniu. Do układu cewek przymocowana jest wskazówka. Cewki znajdują się w polu magnetycznym magnesu stałego. Kierunki uzwojeń są tak dobrane, że momenty obrotowe zwojnic są skierowane przeciwnie. Kąt wychylenia układu jest proporcjonalny do stosunku natężeń prądów płynących w cewkach. W czasie pomiarów do zacisków logometru przyłącza się źródło prądu stałego E, czujnik rezystancji R_t oraz stały rezystor porównawczy R. Jedna cewka znajduje się w obwodzie elektrycznym: źródło prądu E i czujnik R_t . Druga w obwodzie tego samego źródła E i rezystora R. Jeżeli zmieni się temperatura, to zmieni się rezystancja czujnika R_t i zmieni się natężenie prądu w tym obwodzie, podczas, gdy w drugim pozostanie stałe. Zmianie ulegnie kąt wychylenia rdzenia i wskazówka wskaże wartość temperatury na podziałce.

Termometry termoelektryczne

Zasada pomiaru temperatury termometrem termoelektrycznym polega na pomiarze siły elektromotorycznej, jaka powstaje w układzie zamkniętym, utworzonym przez spojenie dwóch różnych metali, a powstałe złącza mają różne temperatury. Spojone metale tworzą ogniwo termoelektryczne zwane termoelementem, a powstająca SEM powodująca przepływ prądu

w obwodzie nosi nazwę siły termoelektrycznej – STE. Wartość tej siły zależy od różnicy temperatur obu złączy i rodzaju metali tworzących termoelement. Aby zmierzyć siłę termoelektryczną, przecina się jedną spoinę lub jeden z drutów i łączy z miliwoltomierzem.



Rys. 11. Obwód termoelektryczny z miliwoltomierzem: 1– gorąca spoina, 2 – zimna spoina [5]

Jeśli rozwarte złącze (nazywane spoinami odniesienia lub spoinami zimnymi)) będzie znajdowało się w stałej temperaturze t_0 (0 lub 20°C), to wówczas dla określonej pary metali wartość STE będzie zależała tylko od temperatury t złącza 1 (nazwanego spoiną pomiarową lub spoiną gorącą).

Materiał na termoelementy powinien się charakteryzować:

- odpornością chemiczną,
- wysoką temperaturą topnienia,
- dużą siłą termoelektryczną,

- możliwie liniową zależnością STE od temperatury,
- dobrym przewodnictwem i jak najmniej zależnym od temperatury,
- niezależnością STE od czasu używania i warunków ogrzewania,
- niską ceną,
- dużą czystością chemiczną.

Tabela 3. Najczęściej stosowane termoelementy [5]

Skład termoelementu		Granica stosowania °C			Zmiana STE na 100°C (w granicach temperatur 0-100°C) mV
termoelektroda +	termoelektroda -	dolna	górną		
			trwała	chwilowa	
Platyna-rod	Platyna	0	1300	1600	0,64
Chromel	Alumel	0	1200	1300	4,10
Nikiel-chrom	Nikiel	0	1000	1100	4,04
Żelazo	Konstantan	-200	500	600	5,28
Miedź	Konstantan	-200	400	500	4,28

Skład stopów:

platyna-rod - 90% Pt i 10% Rh,

chromel - 90% Ni i 10% Cr,

alumel - 94% Ni i 6% (Al + Si + Mn),

nikiel-chrom – 80% Ni i 20% Cr,

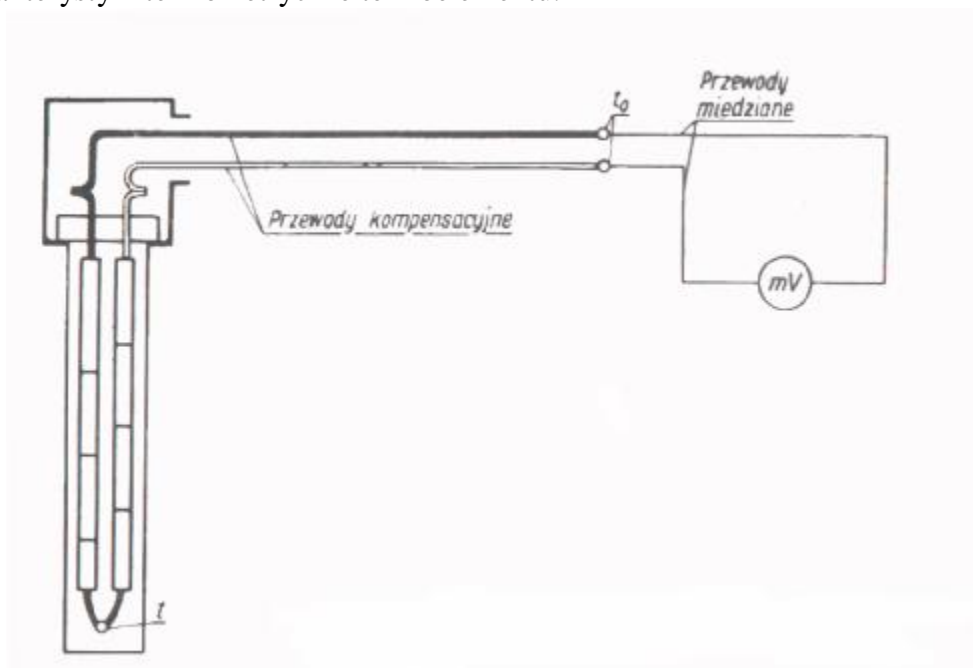
konstantan – 60% Cu i 40% Ni.

Termoelement wykonany ze stopu platyna-rod – platyny odznacza się dużą dokładnością. Wykorzystuje się go do pomiaru wysokich temperatur oraz do wzorcowania i sprawdzania innych termometrów. Najlepszym termoelementem wykonanym z metali nieszlachetnych jest chromel-alumel. Jest odporny na korozję i utlenianie, posiada prostoliniową charakterystykę termometryczną [STE = f(t)]. Nikiel-chrom – nikiel posiada podobne właściwości lecz nie jest odporny na działanie gazów zawierających siarkę. Żelazo-konstantan posiada prawie liniową charakterystykę termometryczną, dużą wartość STE, w wyższych temperaturach łatwo się utlenia, podobnie jak miedź-konstantan. Do bardzo wysokich temperatur używa się termoelementów: iryd-iryd-ruten (2000°C) lub wolfram-wolfram – molibden (2800°C).

Końce drutów lub rzadziej taśm łączone są za pomocą lutowania lub spawania. Ramiona termoelementu są odizolowane od siebie za pomocą koralików, rurek wykonanych z porcelany, szamotu lub korundu. Całość umieszczona jest w osłonie ochronnej, która powinna być odporna na korozję, wysokie temperatury, posiadać bardzo dobre przewodnictwo cieplne, strukturę zapewniającą nieprzepuszczalność gazów. Najczęściej wykonane są ze stali, miedzi, mosiądźów. Przy pomiarze wysokich temperatur stosuje się osłony ceramiczne.

Dokładność pomiaru temperatury za pomocą termoelementów zależy od stałości temperatury spoiny odniesienia. Wpływ wysokiej temperatury środowiska na temperaturę zimnych końców eliminuje się przez zastosowanie przewodów kompensacyjnych, które przedłużają termoelement do miejsca, w którym temperatura jest ustalona. Przewody

kompensacyjne wykonuje się z takich samych metali lub stopów co termoelement lub z innych zwykle tańszych. Muszą jednak mieć takie same charakterystyki temperaturowe, jak charakterystyki termometryczne termoelementu.



Rys. 12. Układ mierniczy termoelementu z przewodami kompensacyjnymi [5]

Siłę termoelektryczną można mierzyć metodą wychyleniową za pomocą miliwoltomierza wywzorcowanego w jednostkach temperatury lub metodą kompensacyjną. Metoda wychyleniowa ze względu na szybki i wygodny sposób pomiaru znalazła zastosowanie w pomiarach przemysłowych. Każdy miliwoltomierz jest wzorcowany dla określonych wartości rezystancji termoelementu i przewodów łączących termoelement z miliwoltomierzem. Na podzielni miernika umieszczona jest sumaryczna wartość tych rezystancji i rodzaj termoelementu, z którym może być połączony.

Metoda kompensacyjna jest bardziej dokładna. Powstającą przy pomiarze STE równowagę się przeciwnie skierowaną SEM źródła prądu stałego.

Pirometry

Pomiar temperatury pirometrami oparty jest na zależności między temperaturą ciała, a ilością energii wypromieniowanej przez to ciało. Energia wypromieniowana przez nagrzane ciało ma postać fal o różnej długości. Zakres wykorzystania długości tych fal decyduje o rodzaju pirometru. Pirometry, pracujące na podstawie pomiaru całkowitej energii promienistej emitowanej przez nagrzane ciało, noszą nazwę pirometrów radiacyjnych lub pirometrów całkowitego promieniowania. Natomiast pirometry wykorzystujące tylko pewien zakres długości fal promieniowania, nazywa się pirometrami fotoelektrycznymi lub pirometrami monochromatycznymi.

Stosunek natężenia promieniowania ciała rzeczywistego E do natężenia promieniowania ciała doskonale czarnego E_c nazywany jest współczynnikiem emisji ϵ :

$$\epsilon = \frac{E}{E_c}$$

Dla wszystkich ciał rzeczywistych ε jest zawarty w granicach

$$0 < \varepsilon < 1$$

Analogicznie stosunek natężeń promieniowania ciał rzeczywistego i doskonale czarnego dla danej długości fali λ nazwany jest współczynnikiem emisji monochromatycznej ε_λ .

Pirometry są skalowane dla ciał idealnie czarnych. Dlatego zmierzoną wartość temperatury dla ciał nieczarnych, z którymi ma się do czynienia, należy przeliczyć na wartość rzeczywistą wg wzorów:

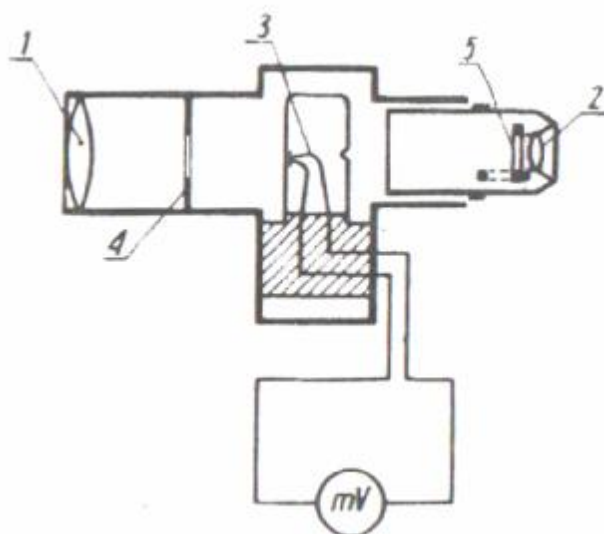
$$T = T_p \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}} \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_p} - \frac{I}{c_2} \ln \frac{1}{e_I}} \quad (2)$$

Według wzoru (2) oblicza się temperaturę rzeczywistą dla pirometru z zanikającym włóknem (w jednej długości fali). Wzór (1) określa temperaturę rzeczywistą dla pirometru całkowitego promieniowania.

- T_p – temperatura zmierzona pirometrem (K),
- T – temperatura rzeczywista (K),
- ε – współczynnik emisji całkowitego promieniowania,
- ε_λ – współczynnik emisji promieniowania dla jednej długości fali,
- λ – długość fali światła (m),
- c_2 – stała (0,0143 m · K),
- \ln – logarytm naturalny ($\ln 1/\varepsilon_\lambda = 2,3 \log 1/\varepsilon_\lambda$).

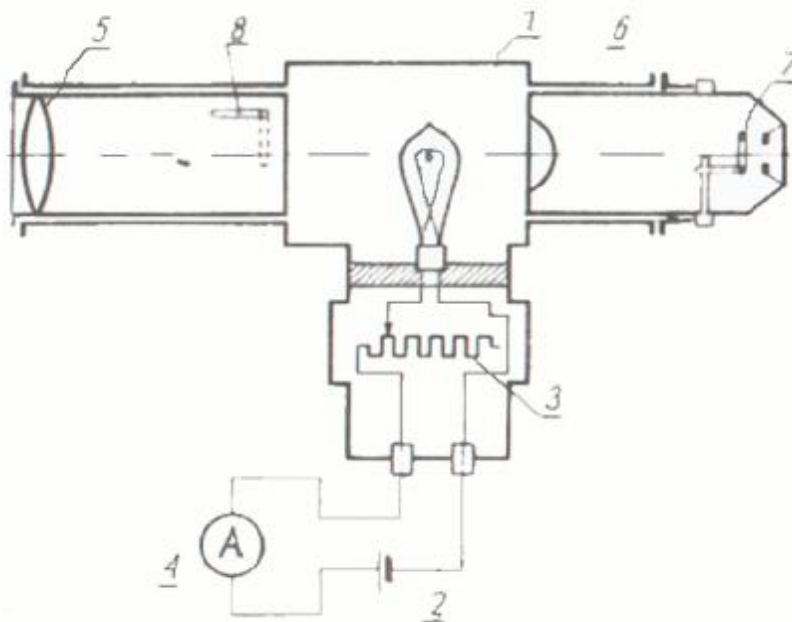
Pirometr radiacyjny składa się z lunety z dwiema soczewkami: obiektywem i okulem. Wewnątrz lunety w ognisku soczewki obiektywu umieszczony jest czujnik, który ogrzewa się wskutek pochłaniania skupionego na nim promieniowania. Czujnikami najczęściej są baterie termoelementów połączonych szeregowo (termostos). Spoiny pomiarowe są przyspawane do zaczernionej płytki platynowej. Aby uniknąć strat cieplnych i uszkodzeń mechanicznych, czujnik jest osłonięty szklaną bańką. Miernikiem najczęściej jest miliwoltomierz wyskalowany w stopniach Celsjusza. Soczewka okularu służy do ustawiania przyrządu względem źródła promieniowania. Barwny filtr służy do ochrony oczu. Pirometrami radiacyjnymi można mierzyć temperatury w granicach od 100 do 4000°C



Rys. 13. Pirometr całkowitego promieniowania: 1 – soczewka obiektywu, 2 – soczewka okularu, 3 – termostos, 4 – przesłona, 5 – filtr [5]

Pirometr optyczny o zanikającym włóknie składa się z żarówki z włóknem wolframowym, źródła prądu, rezystora suwakowego i amperomierza. Natężenie prądu płynącego przez żarówkę, a więc zależną od niego barwę promieniowania drucika żarówki, reguluje się, zmieniając położenie styku rezystora. Żarówka jest umieszczona pomiędzy obiektywem

a okulem w lunetce. Aby dokonać pomiaru, ustawia się obiektyw przyrządu w kierunku przedmiotu, którego temperaturę należy zmierzyć. Koniec lunetki, w którym znajduje się okular, przykłada się do oka i włącza prąd płynący przez żarówkę. W lunetce widać rozżarzone włókno wolframowe na tle promieniowania wysyłanego przez ciało. Za pomocą rezystora reguluje się jasność włókna żarówki tak długo, aż włókno zniknie z pola widzenia i w tym momencie odczytuje się temperaturę badanego ciała na podziałce amperomierza wywzorcowanej w stopniach Celsjusza. Pirometry monochromatyczne mają zazwyczaj dwa zakresy pomiarowe. Jeden zawiera się w granicach 700 – 1500 °C a drugi 1200 – 3500°C. Drugi zakres pomiarowy uzyskuje się przez wsunięcie do obudowy filtra szarego.



Rys. 14. Pirometr z zanikającym włókem: 1 – żarówka, 2 – źródło prądu, 3 – rezystor suwakowy, 4 – amperomierz, 5 – soczewka obiektywu, 6 – soczewka, 7 – filtr czerwony, 8 – filtr z ciemnego szkła [5]

Ciśnieniomierze

Obowiązująca w układzie SI jednostką ciśnienia jest Pa.

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

Ponieważ jest małą jednostką używa się jej wielokrotności np. hPa = 10^2 Pa, MPa = 10^6 Pa. Spotyka się jeszcze i używa również jednostek poza układowych takich jak:

- atmosfera techniczna $\text{at} = \text{kG/cm}^2 = 98066,5 \text{ Pa}$
- atmosfera fizyczna $\text{atm} = 760 \text{ mmHg} = 101325 \text{ Pa}$
- tor $\text{Tr} = 1 \text{ mm Hg} = 133,322 \text{ Pa}$

W zależności od wielkości ciśnienia przyjętego za umowne zero, rozróżnia się:

- ciśnienie absolutne (bezwzględne), dla którego ciśnieniem zerowym jest próżnia absolutna,
- ciśnienie względne, mierzone najczęściej od wartości ciśnienia barometrycznego (atmosferycznego). Różnica między ciśnieniem absolutnym (większym od barometrycznego) a barometrycznym nazwana jest nadciśnieniem. Podciśnienie jest różnicą między ciśnieniem barometrycznym a mniejszym od niego ciśnieniem absolutnym.

Przyrządy do pomiaru ciśnienia, ze względu na zasadę działania, dzielą się na:

- hydrostatyczne (cieczowe), których działanie polega na równoważeniu mierzonego ciśnienia ciśnieniem hydrostatycznym słupa cieczy,
- hydrauliczne (obciążeniowe), w których wykorzystuje się równowagę hydrauliczną pomiędzy mierzonym ciśnieniem działającym na jedną stronę ruchomej przegrody (tłoka, dzwonu) a siłą zewnętrzną działającą na drugą stronę tej przegrody,

- sprężynowe, których działanie polega na odkształceniu elementu sprężystego pod wpływem ciśnienia,
- elektryczne, w których miarą ciśnienia jest zmiana właściwości elektrycznych pewnych materiałów.

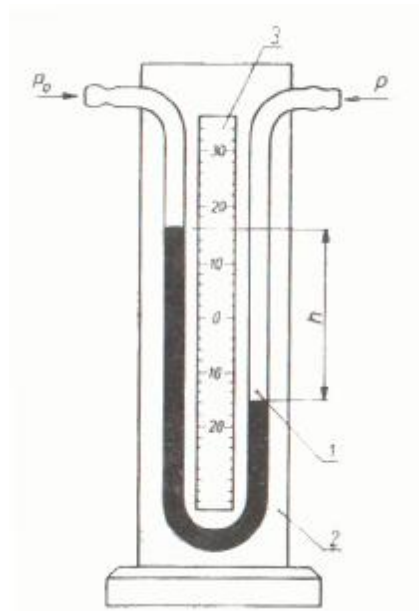
Ciśnieniomierze hydrostatyczne

Mierzone ciśnienie równoważy się ciśnieniem hydrostatycznym słupa cieczy wypełniającej ciśnieniomierz. Ciśnienie hydrostatyczne wyraża się zależnością:

$$p = h \cdot \rho \cdot g$$

- h – wysokość słupa cieczy,
- ρ – gęstość cieczy,
- g – przyspieszenie ziemskie.

Do napełnienia ciśnieniomierzy stosuje się ciecze (manometryczne) niezwilżające szkła, o małym współczynniku rozszerzalności cieplnej w zakresie temperatur pomiaru ciśnienia, niemieszające się i niereagujące z płynem, którego ciśnienie jest mierzone oraz posiadające małą prężność pary. Najczęściej używana jest rtęć, woda nafta.



Rys. 15. Ciśnieniomierz cieczowy dwuramienny: 1 – U-rurka, 2 – deska, 3 – podzielnia [5]

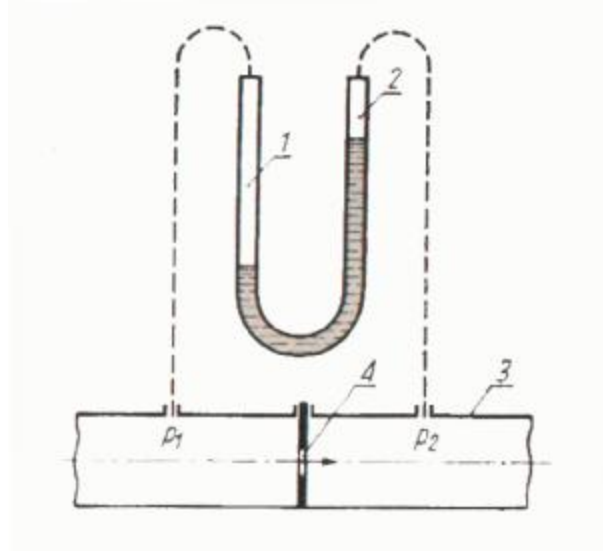
Ciśnieniomierz z U-rurką

Ciśnieniomierz z U-rurką składa się z dwuramiennej rurki, wygiętej w kształcie litery U, napełnionej do połowy cieczą manometryczną. Rurka przymocowana jest do deski. Między ramionami rurki przymocowana jest podzielnia z podziałką, na której wartość odpowiadająca 0 znajduje się w połowie wysokości ramion rurki. Jeżeli ciśnienia panujące w obydwu ramionach są równe, poziomy cieczy będą takie same i będą znajdować się na wysokości 0. Natomiast jeśli ciśnienia będą różne, ciecz przemieści się. Miarą mierzonej różnicy ciśnień będzie ciśnienie hydrostatyczne słupa cieczy manometrycznej o wysokości h (różnica poziomów cieczy w ramionach rurki – patrz rys. 15).

Za pomocą ciśnieniomierzy U-rurkowych można mierzyć: nadciśnienie, podciśnienie. Wówczas jedno ramię jest otwarte (połączone z atmosferą), drugie połączone z przestrzenią, w której mierzone jest ciśnienie.

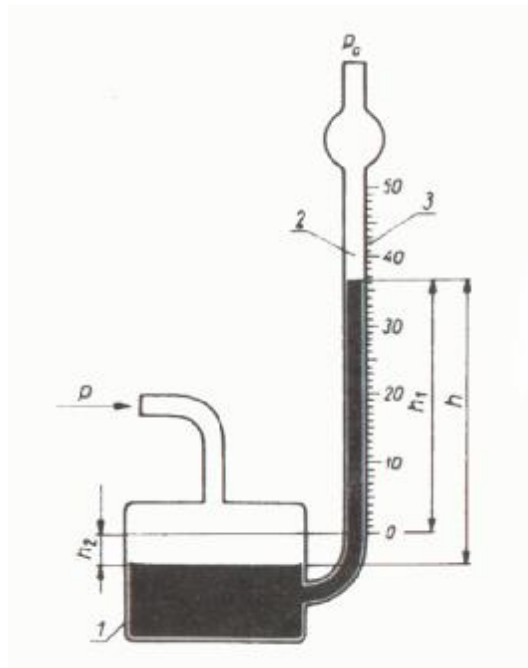
Chcąc zmierzyć różnicę ciśnień, np. w rurociągu, jedno ramię należy podłączyć do obszaru o podwyższonym ciśnieniu, drugie z przestrzenią, gdzie panuje niższe ciśnienie.

Przykładem jest pomiar różnicy ciśnienia wykorzystany do monitoringu natężenia przepływu płynu za pomocą kryzy pomiarowej (przewężenia umieszczonego w przewodzie).



Rys. !6. Pomiar ciśnienia w rurociągu: 1, 2 – ramiona U – rurki, 3 – przewód, 4 – kryza [1]

Odmianą ciśnieniomierza U-rurkowego jest ciśnieniomierz naczyniowy, w którym jedno ramię U-rurki zostało zastąpione naczyniem o znacznie większym przekroju poprzecznym. Naczynie łączy się z przestrzenią, w której panuje większe ciśnienie, rurkę z przestrzenią o mniejszym ciśnieniu.



Rys. 17. Ciśnieniomierz naczyniowy: 1 – naczynie, 2 – rurka, 3 – podzielnia [5]

Poziom cieczy znacznie podwyższa się w rurce o h_1 i nieznacznie obniża w naczyniu o h_2 . Podziałka naniesiona jest na rurce. Aby otrzymać prawidłowy wynik, należy uwzględnić obniżenie poziomu cieczy manometrycznej w naczyniu. Przekrój poprzeczny naczynia S_2 jest kilkadziesiąt razy większy od przekroju rurki S_1 . Zmiany poziomu są odwrotnie proporcjonalne do powierzchni przekroju:

$$h_2 = h_1 \cdot \frac{S_1}{S_2}$$

Różnica ciśnień $p - p_0$ jest równoważona wysokością słupa cieczy:

$$h = h_1 + h_2$$

Po podstawieniu otrzymuje się:

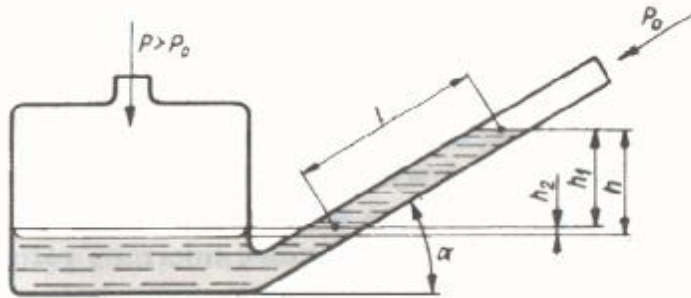
$$h = h_1 \left(1 + \frac{S_1}{S_2} \right)$$

Stosunek S_1/S_2 jest dla danego przyrządu stały i jeśli ma bardzo małą wartość, wysokość obniżenia poziomu cieczy manometrycznej w naczyniu można pominąć i pomiar sprowadzić do odczytu wysokości h_1 na podziałce naniesionej na rurce.

$$\Delta p = p - p_0 = h_1 \cdot \rho \cdot g$$

Ciśnieniomierz z pochyłą rurką

Służy do pomiaru bardzo małych różnic ciśnień rzędu kilkadziesiąt Pa. Składa się z naczynia i połączonej z nim pochyłonej pod kątem rurki. Podziałka naniesiona jest wzdłuż rurki. W ciśnieniomierzu z pochyłą rurką mierzy się długość słupka cieczy l w rurce.



Rys. 18. Ciśnieniomierz z pochyłą rurką [5]

Wysokość h_1 i h_2 wyprowadza się ze wzorów:

$$h_1 = l \cdot \sin \alpha$$

$$h_2 = l \cdot \frac{S_1}{S_2}$$

Całkowita różnica poziomów cieczy h jest równa:

$$h = l \cdot \left(\sin \alpha + \frac{S_1}{S_2} \right)$$

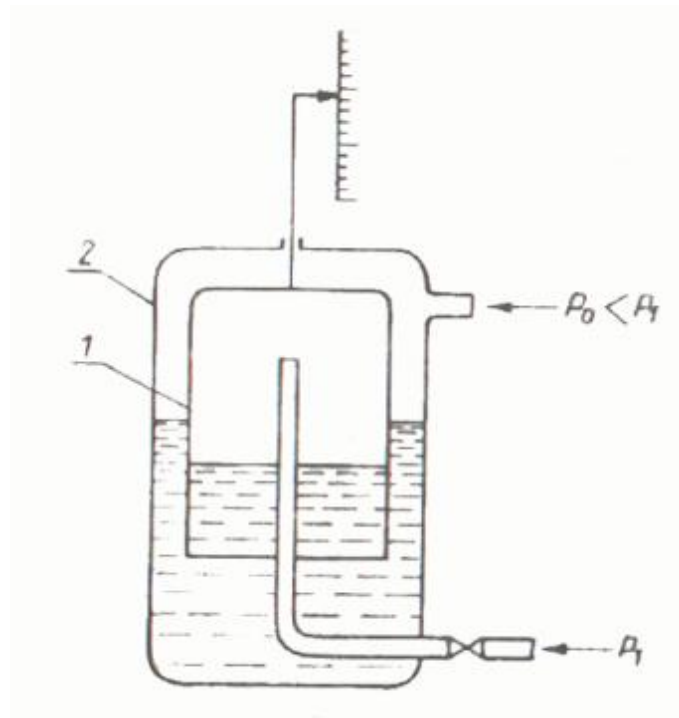
Jeżeli S_1/S_2 jest bardzo małe, mierzona różnica ciśnień będzie równa:

$$\Delta p = p - p_0 = l \cdot \rho \cdot g \cdot \sin \alpha$$

Używa się również ciśnieniomierzy z ruchomą rurką – można zmieniać w nich kąt pochylenia rurki w zależności od wielkości mierzonej różnicy ciśnień.

Ciśnieniomierze hydrauliczne

Do tej grupy przyrządów należy m.in. ciśnieniomierz dzwonowy.

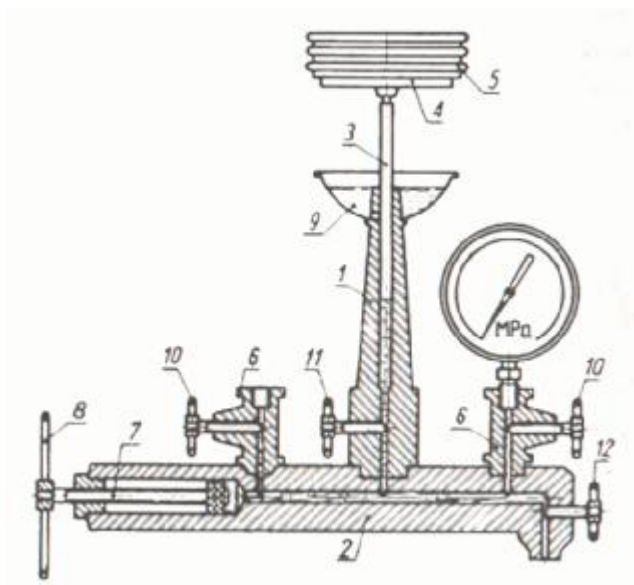


Rys. 19. Ciśnieniomierz dzwonowy: 1– naczynie, 2 – dzwon [1]

Składa się z dzwonu, częściowo zanurzanego w manometrycznej. Ciecz wypełnia naczynie stanowiące obudowę dzwonu. Pod dzwon doprowadza się większe ciśnienie p_1 , nad dzwon ciśnienie mniejsze p_0 . Przesunięcie dzwona do góry następuje pod wpływem działającej na niego różnicy ciśnień i trwa tak długo, aż siła wyporu zostanie zrównoważona przez ciężar dzwona. Wielkość przesunięcia dzwona dla tej samej różnicy ciśnień zależy od rodzaju użytej cieczy manometrycznej oraz wymiarów dzwona.

Ciśnieniomierzem dzwonowym można mierzyć niewielkie różnice ciśnień rzędu 2000 Pa.

Ciśnieniomierz obciążnikowo-tłokowy stosowany jest do wzorcowania i sprawdzania ciśnieniomierzy sprężynowych.



Rys. 20. Manometr obciążnikowo-tłokowy: 1 – cylinder, 2 – korpus manometru, 3 – tłok manometru, 4 – szalka, 5 – obciążniki, 6 – gniazda do wkręcania manometrów, 7 – tłok, 8 – koło zamachowe, 9 – lejek, 10, 11, 12 – zawory [5]

Część miernicza stanowi grubościenny cylinder połączony z korpusem manometru oraz tłok zakończony u góry szalką, służącą do nakładania obciążników. Tłok i cylinder są wypolerowane, luz pomiędzy nimi wynosi kilka mikrometrów.

W korpusie znajdują się dwa gniazda, służące do wkręcania sprawdzanych ciśnieniomierzy, zawory odcinające oraz poziomy tłok z pokrętelem.

Ciśnieniomierz napełnia się olejem mineralnym, wkłada tłok i ustawia go na odpowiedniej wysokości (1/3 tłoka ponad cylindrem) za pomocą poziomego tłoka. Następnie nakłada się na szalkę taką ilość obciążników, aby otrzymać określone ciśnienie. Przed dokonaniem pomiaru tłok wprowadza się w ruch obrotowy, aby zmniejszyć tarcie tłoka w cylindrze.

Ciśnienie cieczy wypełniającej manometr oblicza się ze wzoru:

$$p = \frac{m \cdot g}{S}$$

- m – masa obciążnika i tłoka (kg),
- S – przekrój czynny tłoka (m²),
- g – przyspieszenie ziemskie (9,81m/s²).

Jako przekrój czynny tłoka przyjmuje się średnią arytmetyczną z przekroju cylindra i tłoka.

Barometry rtęciowe

Barometr naczyniowy Fortina składa się z naczynia i rurki szklanej.



Rys. 21. Barometr Fortina: 1 – śruba, 2 – śruba, 3 – membrana gumowa, 4 – rtęć [1]

Rurka ma jeden koniec zatopiony, częściowo wypełniona jest rtęcią, nad którą panuje ciśnienie równe prężności jej pary nasyconej. W temperaturze pokojowej prężność pary rtęci jest bardzo mała rzędu 0,13 Pa (10^{-3} mmHg) i nie wpływa na wynik pomiaru.

Naczynie posiada mały otwór służący do połączenia z atmosferą oraz ruchome dno (skórzane lub kauczukowe). Przed pomiarem poziom rtęci nastawia się według stałego ostrza, które stanowi wskaźnik poziomu zerowego. Do tego celu wykorzystuje się śrubę, która naciskając od dołu na ruchome dno, przesuwa rtęć. Wysokość słupa cieczy odczytuje się w rurce i odpowiada ono ciśnieniu atmosferycznemu, wyrażonemu w mmHg.

Ciśnieniomierze sprężynowe

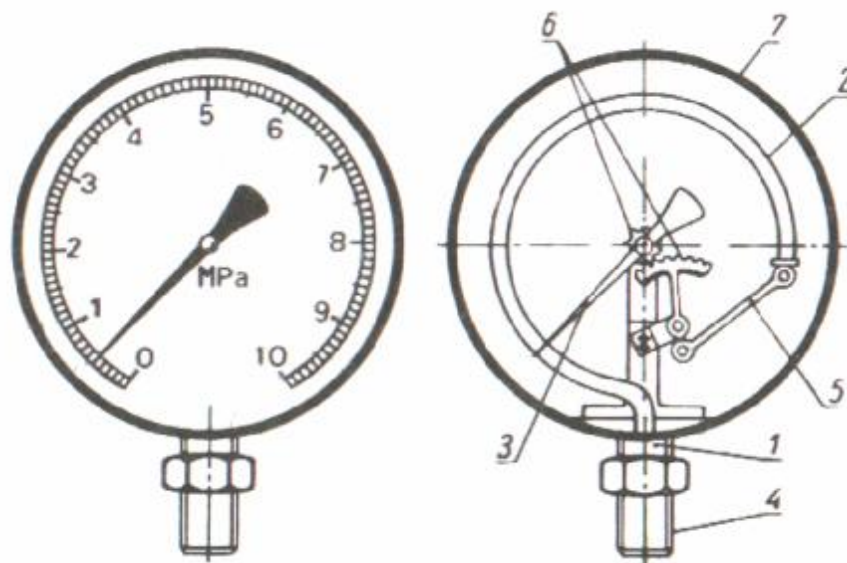
Działanie ciśnieniomierzy sprężynowych opiera się na zasadzie sprężystych odkształceń ciała elastycznego pod wpływem ciśnienia działającego na to ciało.

W zależności od budowy elementu sprężystego ciśnieniomierze sprężynowe dzielą się na rurkowe, przeponowe, puszkowe i mieszkowe.

Element sprężysty ma zwykle niewielkie odkształcenie, dlatego na wskazówkę przenoszone jest ono za pomocą mechanicznego układu zwielokrotniającego (dźwignie, przekładnia zębata).

Ciśnieniomierze rurkowe

Są najczęściej stosowanymi w przemyśle ciśnieniomierzami ze względu na łatwy montaż, odporność mechaniczną oraz szeroki zakres pomiarowy (do 1600 MPa).



Rys. 22 Ciśnieniomierz rurkowy: 1 – obsada przyrządu, 2 – rurka Bourdona, 3 – wskazówka, 5 – dźwignia, 6 – przekładnia zębata, 7 – osłona [5]

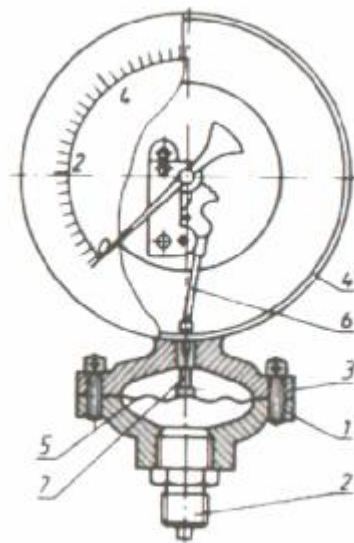
Podstawową częścią przyrządu jest metalowa rurka o przekroju eliptycznym, płaskoowalnym lub okrągłym z niecentrycznie umieszczonym otworem, tzw. rurka Bourdona. Rurka wygięta jest w kształcie łuku. Jeden swobodny koniec rurki, jest zamknięty i połączony z dźwignią i przekładnią zębatą, które przenoszą ruch na wskazówkę. Drugi koniec rurki jest umocowany sztywno w obsadzie przyrządu zakończonej nagwintowanym króćcem, służącym do łączenia ciśnieniomierza z rurociągiem, zbiornikiem itp. Rurka Bourdona umieszczona jest w metalowej osłonie, w której po stronie czołowej znajduje się podziałka i wskazówka, umieszczone za szybką.

Po podłączeniu ciśnieniomierza z przestrzenią, gdzie panuje nadciśnienie, swobodny koniec rurki prostuje się, zwiększając promień krzywizny, pociąga za sobą poprzez dźwignię, przekładnię – wskazówkę. W przypadku połączenia ciśnieniomierza z przestrzenią, gdzie panuje podciśnienie – rurka zmniejsza promień krzywizny, a wskazówka obraca się w przeciwną stronę. Rozwijanie lub zwijanie rurki jest możliwe dzięki specjalnemu kształtowi przekroju rurki.

Ciśnieniomierze przeponowe (membranowe)

Elementem sprężystym jest koncentrycznie pofałdowana membrana. Umocowana jest w środku komory manometrycznej. Dolna część komory połączona jest z nagwintowanym króćcem. Do środka membrany przymocowany jest trzpień połączony z cięgnem, przekładnią zębatą i wskazówką.

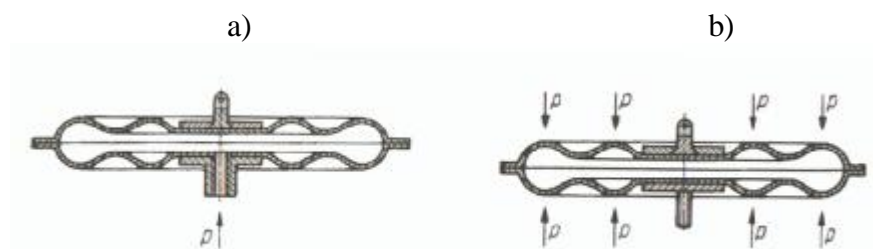
Ciśnieniomierze przeponowe stosowane są jako wakuometry (do mierzenia podciśnienia), manometry (do mierzenia nadciśnienia). Mierzone ciśnienia nie powinny przekraczać 3 MPa. Zaletą ich jest możliwość pomiaru ciśnienia substancji o dużej lepkości, a po odpowiednim zabezpieczeniu – płynów korodujących.



Rys. 23. Ciśnieniomierz przeponowy: 1 – dolna część komory, 2 – króciec, 3 – górna część komory, 4 – osłona, 5 – przepona, 6 – cięgło, 7 – trzpień [5]

Ciśnieniomierze puszkowe

Puszka membranowa utworzona jest przez połączenie ze sobą na obwodzie dwóch cienkich pofałdowanych membran. Ciśnieniomierze te mogą służyć do pomiaru nadciśnienia i podciśnienia lub ciśnienia atmosferycznego.



Rys. 24. Ciśnieniomierze puszkowe: a) puszka membranowa b) puszka aneroidowa [1]

Ciśnienie może być doprowadzone do wnętrza puszki lub działać na zewnętrzne powierzchnie membran. W pierwszym przypadku odkształcenie membran jest spowodowane różnicą ciśnień między wnętrzem puszki a jej otoczeniem. W drugim przypadku puszka jest zamknięta, a powietrze z niej usunięte. Ciśnienie zewnętrzne powoduje odkształcenie puszki, które przenoszone jest poprzez dźwignie, przekładnię zębatą na wskazówkę.

Zamknięta puszka nosi nazwę aneroidu i służy do pomiaru ciśnienia atmosferycznego.

Ciśnieniomierze mieszkowe

Elementem sprężystym jest cylindryczne naczynie z karbowanymi ściankami bocznymi, zwane mieszkem. Dolną podstawą mieszek przymocowany jest do płytki zaopatrzonej w nagwintowany króciec. Górna część mieszka połączona jest za pomocą dźwigni ciężka i zębatki ze wskazówką. Pod wpływem różnicy ciśnień jakie panują wewnątrz i na zewnątrz

mieszka następuje jego odkształcenie. Mieszek rozciąga się lub zmniejsza swoją długość powodując przesunięcie wskazówki.

Ciśnieniomierze mieszkowe stosuje się do pomiaru ciśnienia w granicach 0,025 – 0,4 MPa.

Ciśnieniomierze piezoelektryczne

Do pomiaru szybkozmiennych ciśnień stosuje się ciśnieniomierze z czujnikami wykorzystującymi tzw. efekt piezoelektryczny. Efekt ten polega na występowaniu na przeciwległych ścianach niektórych kryształów ładunków elektrycznych o przeciwnym znaku pod wpływem ciśnienia działającego na ściany kryształu. Własność tę wykazuje i tylko w określonych kierunkach kryształów np. kwarc, turmalin. Kryształ ujęty jest między dwie metalowe płytki. Przyłożenie ciśnienia powoduje zmianę naprężeń piezoelektryka i między płytkami powstaje różnica potencjałów, proporcjonalna do działającego ciśnienia. Po wzmocnieniu zmierzone napięcie jest miarą przyłożonego ciśnienia.

4.2.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania sprawdzisz czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Jaka jest różnica między skalą termometryczną Celsjusza a Międzynarodową Praktyczną Skalą Temperatur?
2. Na jakiej zasadzie działają termometry cieczowe?
3. Jakim warunkom powinna odpowiadać ciecz termometryczna?
4. W jaki sposób można zmierzyć STE?
5. Jakie dodatkowe funkcje mogą spełniać termometry?
6. Co to są wakuometry?
7. Na jakiej zasadzie działają ciśnieniomierze hydrauliczne?
8. Co to jest ciśnienie absolutne?
9. Dlaczego rurka Bourdona odkształca się pod wpływem ciśnienia?

4.2.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Wyznacz poprawkę na wystający słupek cieczy termometrycznej. Ciecz ogrzej do 80°C, termometr zanurz do wysokości odpowiadającej 10°C.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinienes:

- 1) zmontować zestaw do wyznaczania poprawki,
- 2) ogrzać ciecz,
- 3) zmierzyć temperatury,
- 4) obliczyć poprawkę,
- 5) obliczyć temperaturę rzeczywistą.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- dwa termometry,
- zlewka,
- płytka grzejna,
- materiał izolujący,
- instrukcja bezpiecznej pracy.

Ćwiczenie 2

Dysponując różnymi rodzajami termometrów rozszerzalnościowych, zmierz temperaturę tego samego medium ogrzanego do temperatury 75 °C.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) ogrzać wodę do temperatury 75°C (pomiar dokładnym termometrem szklanym) zmierzyć czas po którym ustali się temperatura na badanym termometrze szklanym,
- 2) doprowadzić ponownie temperaturę do 75°C,
- 3) zmierzyć czas, po którym ustali się temperatura na termometrach manometrycznym i bimetalicznym,
- 4) wyciągnąć wnioski z przeprowadzonego ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- termometry szklane,
- termometr bimetaliczny,
- termometr manometryczny,
- zlewka,
- palnik, płytka grzejna,
- stoper,
- instrukcja bezpiecznej pracy.

Ćwiczenie 3

Sprawdź wskazanie ciśnieniomierza sprężynowego z rurką Bourdona za pomocą ciśnieniomierza obciążnikowo-tłokowego.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) wkręcić w gniazdo sprawdzany ciśnieniomierz sprężynowy o zakresie pomiarowym 0 – 1 MPa,
- 2) wyjąć tłok i napełnić manometr olejem,
- 3) włożyć tłok i ustawić go na odpowiedniej wysokości,
- 4) mając podany przekrój czynnika tłoka, obliczyć masę obciążników potrzebnych do uzyskania ciśnienia; 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 MPa,
- 5) nakładać kolejno obciążniki i odczytywać wskazania ciśnieniomierza sprężynowego,
- 6) przed każdym pomiarem wprawiać tłok w ruch obrotowy,
- 7) określić prawidłowość wskazań ciśnieniomierza sprężynowego.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- ciśnieniomierz sprężynowy z rurką Bourdona,
- manometr obciążnikowo-tłokowy,
- olej,
- instrukcja bezpiecznej pracy.

4.2.4. Sprawdźan postępów

Czy potrafisz:	Tak	Nie
1) wyjaśnić, na jakich odtwarzalnych punktach opierają się znane Ci skale termometryczne?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2) określić, jakim warunkom powinien odpowiadać materiał na czujnik termometru oporowego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3) wyjaśnić zasadę działania termometru termoelektrycznego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) określić sposób pomiaru temperatury pirometrem optycznym?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5) wyjaśnić, jak wpływa na dokładność pomiaru kąt pochylenia rurki w ciśnieniomierzu naczyniowym?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6) scharakteryzować elementy sprężyste używane do pomiaru ciśnienia?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7) wyjaśnić zasadę działania ciśnieniomierza dzwonowego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8) podać zalety ciśnieniomierzy hydrostatycznych?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4.3. Pomiar poziomu cieczy i natężenia przepływu płynów

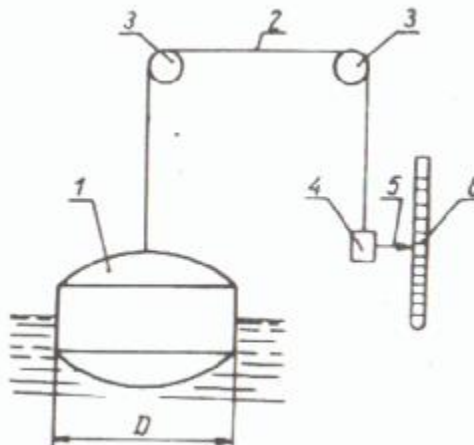
4.3.1. Materiał nauczania

Pomiaru poziomu cieczy dokonuje się w celu określenia ilości cieczy znajdującej się w zbiorniku lub w celu utrzymania poziomu cieczy na określonej wysokości.

Najprostszymi przyrządami do pomiaru poziomu cieczy są rurki cieczowskazowe, działające na zasadzie naczyń połączonych. Poziom cieczy w rurce odpowiada poziomowi cieczy w zbiorniku. W zbiornikach bardzo wysokich stosuje się układ rurek instalowanych na zbiorniku schodkowo. Każda rurka posiada zawory odcinające.

Rurki cieczowskazowe są stosowane do 1,5 MPa. W przypadku większych ciśnień używane są poziomowskazy refleksyjne. Są to szklane, płaskie, mające żłobkowaną powierzchnię płytki, umocowane w metalowej oprawie. W szkle refleksyjnym wyraźnie widać granicę między warstwą cieczy a gazem. Ciecz wydaje się prawie czarna, część zajmowana przez gaz lub parę – srebrzysta. Szklane refleksyjne stosuje się do 2,5 MPa, powyżej używa się płytek z miki w stalowej obudowie.

Poziomowskazy pływakowe



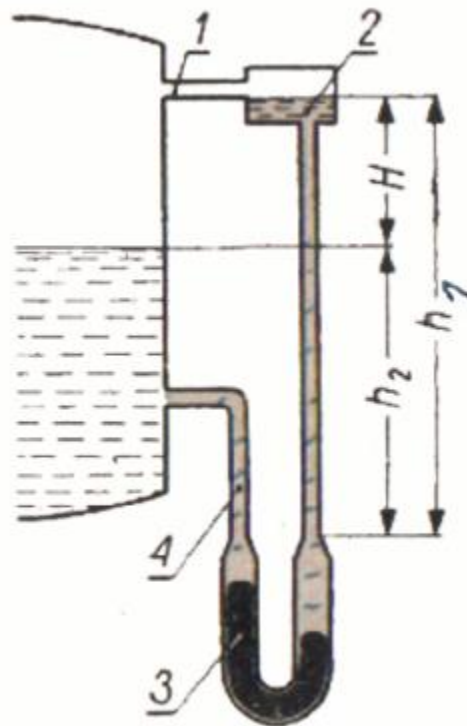
Rys. 25. Poziomowskaz pływakowy: 1 – pływak, 2 – linka, 3 – boczki, 4 – obciążnik, 5 – wskazówka, 6 – podziałka [5]

Zasadniczą częścią tego poziomowskazu jest metalowy, wewnątrz pusty pływak, unoszący się na powierzchni cieczy i wznoszący lub opadający wraz z nią. Pływak zawieszony jest na linie przerzuconej przez krążki. Na drugim końcu linki zawieszony jest obciążnik, który utrzymuje stałe napięcie linki. Przymocowana do ciężarka wskazówka pozwala odczytać poziom cieczy w zbiorniku.

Poziomowskaz pływakowy może być połączony z urządzeniem sygnalizacyjnym lub sterującym.

Poziomowskazy hydrostatyczne

Wykorzystuje się w nich ciśnienie hydrostatyczne słupa cieczy znajdującej się w zbiorniku. Na schemacie pokazano taki poziomowskaz.



Rys. 26. Poziomowskaz hydrostatyczny: 1– górna rurka impulsowa, 2 – naczynie wyrównawcze, 3 – U-rurka, 4 – rurka impulsowa [1]

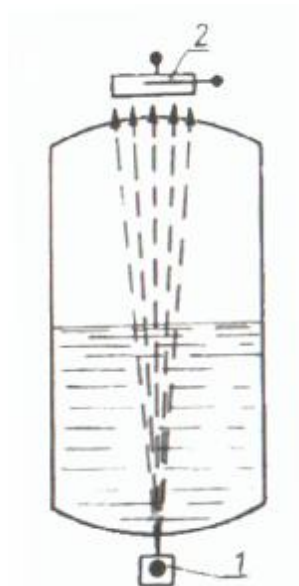
Z dolnej (cieczowej) i górnej (parowej) części zbiornika odprowadza się rurki zwane impulsowymi do manometru różnicowego (zwykle rtęciowego). Górna rurka impulsowa jest połączona z naczyniem wyrównawczym, zapewniającym stałą wysokość słupa cieczy w jednym ramieniu U-rurki. Wysokość słupa cieczy w drugim ramieniu zmienia się wraz ze zmianą wysokości poziomu cieczy w zbiorniku. Manometr różnicowy mierzy różnicę słupów cieczy:

$$H = h_1 - h_2$$

czyli odległość danego poziomu cieczy od poziomu maksymalnego. Przy maksymalnym poziomie cieczy w zbiorniku manometr nie wykaże żadnego wychylenia. Przyrząd wskazuje zmianę poziomu cieczy od pewnego maksymalnego poziomu (wysokość podłączenia górnej rurki impulsowej).

W przypadku pomiaru poziomu w zbiorniku otwartym jedno ramię ciśnieniomierza łączy się z dolną częścią zbiornika, a drugie z atmosferą.

Do pomiaru poziomu cieczy wykorzystuje się również izotopy promieniotwórcze. Zasadniczymi elementami takiego poziomomierza jest źródło promieniowania i licznik Geigera-Müllera mierzący natężenia promieniowania.



Rys. 27. Poziomowskaz z zastosowaniem promieniowania; 1 – źródło promieniowania, 2 – licznik G-M [5]

W przedstawionym poziomomierzu źródło promieniowania umieszczono pod zbiornikiem, licznik tuż nad zbiornikiem. Natężenie promieniowania docierające do licznika zależy od grubości warstwy cieczy w zbiorniku.

W poziomowskazach ultradźwiękowych wykorzystuje się zjawisko odbicia fal dźwiękowych od granicy rozdziału faz. Fale ultradźwiękowe wysyłane z nadajnika po odbiciu od granicy faz: gazowej i ciekłej docierają do odbiornika. Dopływający do odbiornika sygnał jest przetwarzany na impuls elektryczny i po wzmocnieniu kierowany do miernika czasu. Czas opóźnienia τ sygnału odbitego w stosunku do wysłanego jest z poziomem cieczy w zbiorniku H związany zależnością:

$$t = \frac{2H}{u}$$

stąd:
$$H = \frac{t \cdot u}{2}$$

gdzie:

- u – prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w mierzonej cieczy (m/s),
- τ – czas opóźnienia sygnału (s),
- H – wysokość cieczy w zbiorniku (m).

Pomiar natężenia przepływu

Ilość płynu przepływająca przez przekrój poprzeczny przewodu w jednostce czasu nosi nazwę natężenia przepływu. W zależności od tego, w jakich jednostkach wyraża się ilość płynu, natężenie przepływu może być masowe lub objętościowe.

$$Q_m = Q_v \cdot \rho$$

- Q_m – masowe natężenie przepływu (kg/s),
- Q_v – objętościowe natężenie przepływu (m^3/s),
- ρ – gęstość płynu (kg/m^3).

W przypadku pomiaru natężenia przepływu gazów istotne są warunki pomiaru (ciśnienie, temperatura), gdyż mają one wpływ na wartość objętości.

Przepływ płynu przez rurociągi może mieć w uproszczeniu charakter laminarny lub burzliwy. W przepływie laminarnym (uwarstwionym) cząstki płynu poruszają się równoległe do osi przewodu. Największą prędkość mają cząstki płynące środkiem przewodu, bliżej ścianek przewodu prędkość maleje.



Rys. 28. Rozkład prędkości w przepływie a) laminarnym, b) burzliwym [5]

Jeżeli zwiększy się prędkość przepływu powstają poprzeczne do osi przewodu ruchy cząstek i tworzą się wiry. Poza niewielką ilością płynu w pobliżu ścianek pozostała masa porusza się ze stałą prędkością niezależnie od odległości od osi przewodu. Przepływ taki nazywa się burzliwym lub turbulentnym. W obliczeniach technicznych operuje się prędkością średnią:

$$u_{sr} = \frac{Q_v}{F}$$

F – przekrój strumienia płynu (m^2)

Q_v – objętościowe natężenie przepływu (m^3/s)

Rodzaj przepływu zależy od prędkości przepływu, średnicy przewodu, gęstości i lepkości płynu. Parametry te ujmuje liczba Reynoldsa:

$$Re = \frac{u_{sr} \cdot D \cdot \rho}{\mu}$$

gdzie:

$u_{sr} = u$ – średnia prędkość przepływu (m/s),

D – średnica przewodu (m),

ρ – gęstość płynu (kg/m^3),

μ – współczynnik lepkości dynamicznej płynu ($N \cdot s/m^2$).

Przyjmuje się, że przepływ jest laminarny, gdy liczba Reynoldsa $Re < 2100$, a przepływ burzliwy, gdy $Re > 10000$

Równanie Bernoulliego wyraża zależność między ciśnieniem, prędkością i wysokością położenia strumienia cieczy w stosunku do przyjętego poziomu odniesienia:

$$p_1 + \frac{u_1^2 \cdot r}{2} + H_1 \cdot r \cdot g = p_2 + \frac{u_2^2 \cdot r}{2} + H_2 \cdot r \cdot g$$

gdzie:

- p – ciśnienie statyczne,
- $\frac{u^2 \cdot r}{2}$ – ciśnienie dynamiczne,
- $H \cdot r \cdot g$ – ciśnienie niwelacyjne.

Jeżeli $H_1 = H_2$ ciśnienie całkowite w dowolnym przekroju cieczy będącej w ruchu jest równe sumie ciśnienia dynamicznego i statycznego:

$$p_{\text{cał.}} = p + p_d$$

Przepływomierze są przyrządami służącymi do pomiaru ilości przepływającego przez nie płynu. Można je podzielić na:

- przepływomierze silnikowe,
- przepływomierze zwężkowe,
- rotometry,
- rurki spiętrzające.

W przepływomierzach silnikowych zasadniczą częścią jest wirnik obracający się przy przepływie cieczy. Prędkość wirnika jest proporcjonalna do średniej prędkości strumienia przepływającej cieczy:

$$n = c \cdot u$$

$$u = \frac{Q_v}{F}$$

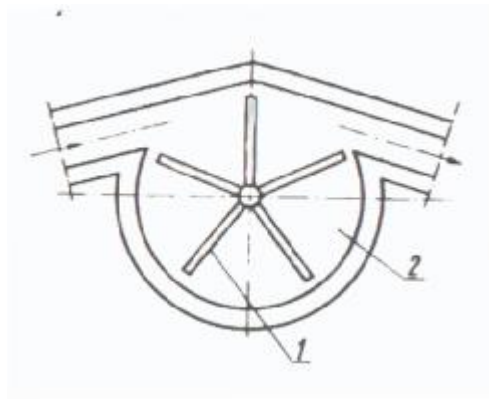
$$n = c \cdot \frac{Q_v}{F}$$

gdzie:

- n – liczba obrotów wirnika na sekundę,
- c – współczynnik uwzględniający mechaniczne i hydrodynamiczne własności przepływomierza,
- F – przekrój strumienia cieczy w m^2 ,
- Q_v – natężenie objętościowe cieczy w m^3/s

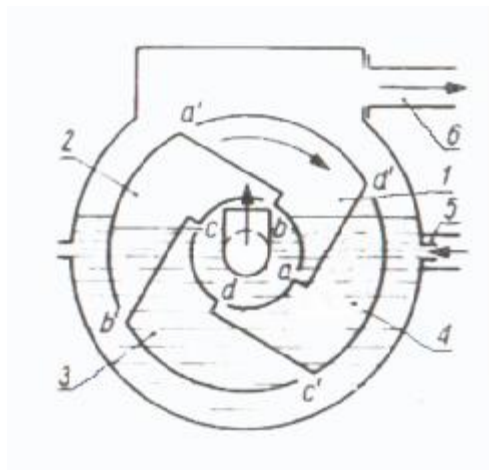
Liczba obrotów wirnika jest więc proporcjonalna do natężenia objętościowego przepływu cieczy.

Rysunek przedstawia przepływomierz wirnikowy. Wirnik posiada nieparzystą liczbę łopatek. Ciecz dopływa do komory ukośnie w stosunku do osi wirnika, wprawia go w ruch obrotowy i odpływa do rurociągu. Ruch obrotowy wirnika przez przekładnię przenoszony jest do licznika.



Rys. 29. Przepływomierz skrzydełkowy: 1 – wirnik, 2 – komora [5]

Gazomierz bębnowy jest również przepływomierzem silnikowym. W korpusie umieszczony jest bęben posiadający cztery komory. Gazomierz do pewnego poziomu wypełniony jest wodą. Dopływający przewodem doprowadzającym gaz przedostaje się szczeliną **b** do komory 2, szczeliną **c** do komory 3. Równocześnie komora 1 połączona jest szczeliną **a** z przewodem odprowadzającym. Ciśnienie gazu w komorach 2 i 3, znajdujących się u wlotu gazu, jest większe niż w komorze 1. Poziom ciecchy w komorze 1 jest więc wyższy niż w komorach 2 i 3, powoduje to zmianę środka ciężkości i obrót bębna. Przy obrocie bębna gaz z komory 1 jest wypychany do przewodu odprowadzającego, a komory 2 i 3 napełniają się gazem. Po napełnieniu gazem komory 2, wynurza się z wody jej szczelina wylotowa **b'** i gaz zostaje wypchnięty do przewodu odprowadzającego. W czasie pełnego obrotu bębna napełniają się i opróżniają 4 komory. Obroty bębna przenoszone są na licznik wywzorcowany w jednostkach objętości.



Rys. 30. Gazomierz bębnowy: a, b, c, d – szczeliny dopływowe, a', b', c', d' – szczeliny wylotowe, 1, 2, 3, 4 – komory, 5 – przewód doprowadzający gaz, 6 – przewód odprowadzający gaz [5]

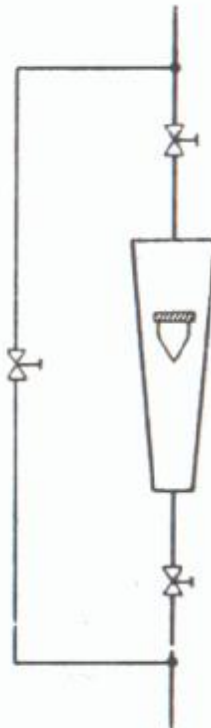
Rotametr składa się z pionowej rury, rozszerzającej się ku górze oraz pływaka. Profil rury jest tak dobrany, aby naniesiona na niej podziałka była równomierna. Przy przepływie przez rotametr płyn przeciska się szczeliną między ścianką rury a pływakiem. Prędkość płynu w szczelinie jest dużo większa w swobodnym przekroju rotametu. Za szczeliną prędkość

spada, wytwarza się różnica ciśnień przed i nad pływakiem równoważąca ciężar pływaka i utrzymująca go na określonej wysokości, zależnej od natężenia przepływu. Jeżeli natężenie przepływu wzrośnie, pływak wzniesie się do góry i zajmie nowe położenie. Szczelina będzie miała inną powierzchnię, przy której powstająca różnica ciśnień zrównoważy ciężar pływaka. Rotametry są wykonywane i wzorcowane dla określonych płynów, temperatury i ciśnienia. Jeżeli temperatura pomiaru jest inna niż temperatura wzorcowania, należy uwzględnić zmianę gęstości, mnożąc wynik odczytu przez poprawkę:

$$c_1 = \sqrt{\frac{(r_{pl} - r_1) \cdot r_1}{(r_{pl} - r_1) \cdot r_1}} \qquad c_2 = \sqrt{\frac{(r_{pl} - r_1) \cdot r_1}{(r_{pl} - r_1) \cdot r_1}}$$

- c_1 – poprawka dla podziałki w jednostkach objętości,
- c_2 – poprawka dla podziałki w jednostkach masy,
- ρ_{pl} – gęstość materiału pływaka,
- ρ_1 – gęstość płynu w temperaturze wzorcowania,
- ρ'_1 – gęstość płynu w temperaturze pomiaru.

Warunkiem prawidłowego pomiaru jest dokładnie pionowe zainstalowanie rotametu. Rotometr nie może być narażony na wstrząsy i drgania, a pływak powinien być wykonany z metalu lub stopu odpornego na działanie przepływającego płynu. Sposób podłączenia rotametu do rurociągu pokazano na rysunku 31.



Rys. 31. Podłączenie rotametu do rurociągu [5]

Przed i za rotametrem umieszczone są zawory odcinające. Zastosowano bocznikowanie z dodatkowym zaworem, który w czasie pomiaru jest zamknięty. W przypadku uszkodzenia

rotametry zamyka się zawory odcinające i otwiera zawór bocznikujący, przez który płyn będzie przepływał. Zastosowanie bocznikowania zapobiega konieczności przerwania procesu produkcyjnego w przypadku awarii rotametry.

Rotametry stosowane są do pomiaru niewielkich wartości natężenia przepływu cieczy i gazów.

Rurki spiętrzające służą do pomiaru prędkości płynów czystych, niezapylnych. Stosuje się je zwykle w rurociągach o dużej średnicy (umieszczenie rurki spiętrzającej nie stwarza większych oporów przepływu płynu).

Całkowite ciśnienie płynu płynącego przewodem poziomym ($H = 0$, ciśnienie niwelacyjne jest równe 0) jest równe sumie ciśnienia dynamicznego i statycznego:

$$p_c = p_d + p_s$$

z równania Bernoulliego:

$$p_d = \frac{\rho \cdot u^2 \cdot r}{2}$$

gdzie:

- p_c – ciśnienie całkowite (Pa),
- p_d – ciśnienie dynamiczne (Pa),
- p_s – ciśnienie statyczne (Pa),
- u – prędkość płynu (m/s),
- ρ – gęstość płynu (kg/m^3),
- c – współczynnik poprawkowy.

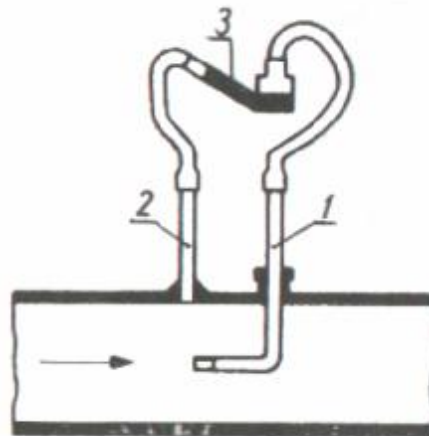
Z zależności tej można wyznaczyć prędkość płynu:

$$u^2 = \frac{2p_d}{r}$$

Po uwzględnieniu zmian strumienia spowodowanych umieszczeniem w nim przyrządu pomiarowego oraz wpływu lepkości płynu, wprowadzony został wyznaczony eksperymentalnie współczynnik poprawkowy c wówczas wzór na prędkość przyjmuje postać:

$$u = c \cdot \sqrt{\frac{2p_d}{r}}$$

Zasadę działania rurki spiętrzającej można przedstawić korzystając z rysunku 32.



Rys. 32. Zasada działania rurki spiętrzającej: 1,2 – rurki, 3 – manometr różnicowy [5]

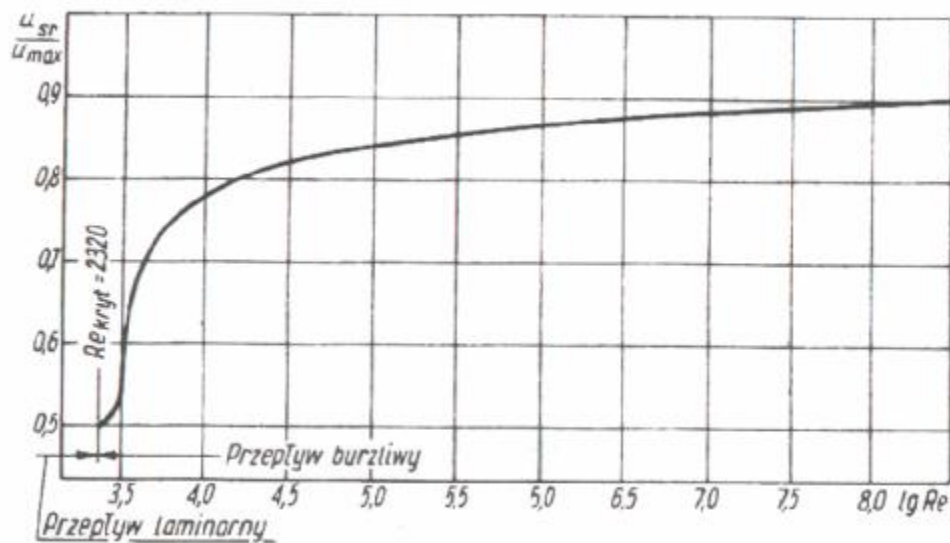
Dwie rurki, z których jedna umieszczona jest w osi przewodu, a druga w jego ścianie połączono z manometrem różnicowym. Na rurkę pierwszą działa ciśnienie całkowite przepływającego płynu, natomiast na drugą ciśnienie statyczne. Manometr mierzy więc różnicę ciśnień pomiędzy nimi, czyli ciśnienie dynamiczne.

Rurka spiętrzająca pozwala określić prędkość maksymalną (w osi przewodu), natomiast do obliczeń natężenia przepływu niezbędna jest prędkość średnia.

Stosunek prędkości średniej do maksymalnej jest funkcją liczby Reynoldsa:

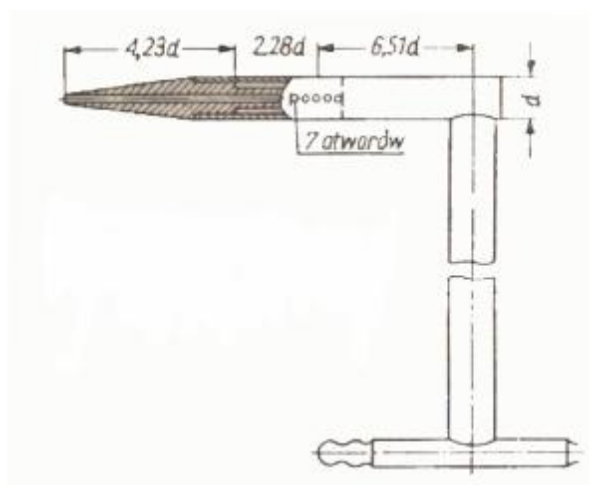
$$f(\text{Re}) = \frac{u_{\text{sr}}}{u_{\text{max}}}$$

Zależność tę wyznaczono doświadczalnie i przedstawiono w postaci wykresu:



Rys. 33. Zależność stosunku prędkości średniej do maksymalnej od Re [5]

Z wyliczonej dla u_{max} liczby Reynoldsa odczytuje się z wykresu wartość $u_{\text{sr}}/u_{\text{max}}$, a następnie, mając wyliczoną na podstawie pomiaru prędkość maksymalną, wyznacza się wartość średnią i natężenie przepływu.



Rys. 34. Rurka spiętrzająca ze stożkową końcówką [5]

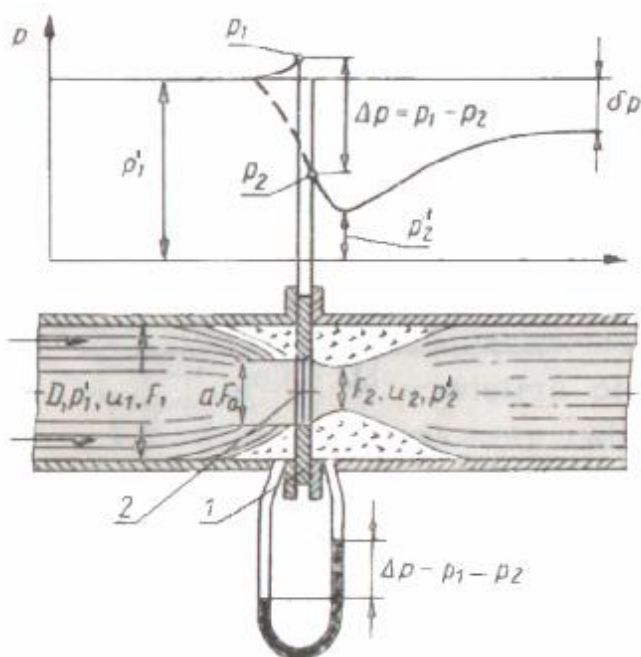
Rurki spiętrzające wykonuje się w postaci dwóch rurek znajdujących się we wspólnej obudowie. Na środku półokrągłej lub stożkowej końcówki znajduje się otworek. Otworek przechodzi w rurkę zgiętą pod kątem prostym i wyprowadzoną do manometru. W pewnej odległości od końcówki znajduje się kilka otworków rozmieszczonych na obwodzie lub wzdłuż obudowy służących do pomiaru ciśnienia statycznego i połączonych z drugą rurką osadzoną w tej samej obudowie. Rurka ta jest połączona z drugim ramieniem manometru. Do wad rurek spiętrzających należy konieczność użycia bardzo dokładnych mikromanometrów różnicowych (ze względu na małe mierzone różnice ciśnień) oraz czasochłonność pomiarów i obliczeń.

Przeływomierze zwężkowe

Przeływomierze zwężkowe składają się ze zwężki (przewężenia) umieszczonej w przewodzie i manometru różnicowego. Przez otwór zwężki musi przepłynąć tyle samo płynu, co przez przekrój rurociągu. Wobec tego wzrasta prędkość przepływu płynu w zwężce i zwiększa się jego energia kinetyczna. Wzrost prędkości i energii kinetycznej odbywa się kosztem jego energii potencjalnej. Zmiana energii potencjalnej powoduje zmianę ciśnienia statycznego. Przyłączony manometr wykaże różnicę ciśnień statycznych przed i za zwężką. Spadek ciśnienia będzie tym większy, im większe będzie natężenie przepływu. Zmierzona różnica ciśnień będzie miarą natężenia przepływającego płynu.

Stosuje się trzy rodzaje zwężek: kryzę, dyszę i zwężkę Venturiego. Kryza jest cienką metalową tarczą z okrągłym otworem w środku.

Rozkład ciśnień w przewodzie w pobliżu wstawionej kryzy przedstawia rysunek:



Rys. 35. Kryza i graficzne przedstawienie zasady jej działania: 1 – tarcza, 2 – otwór [5]

Linia ciągła pokazuje, jak zmienia się ciśnienie statyczne wzdłuż ścianki przewodu, linia przerywana wzdłuż osi. Przed kryzą przy ścianie przewodu ciśnienie zwiększa się od p_1' do

p_1 . Za kryzą ciśnienie spada do p_2 . Najmniejszą wartość ciśnienie osiąga w miejscu, w którym jest najwęższy strumień. Dalej ciśnienie stopniowo rośnie, nie osiągając jednak wartości jaką miało przed kryzą – δp jest stratą ciśnienia płynu, spowodowaną działaniem kryzy.

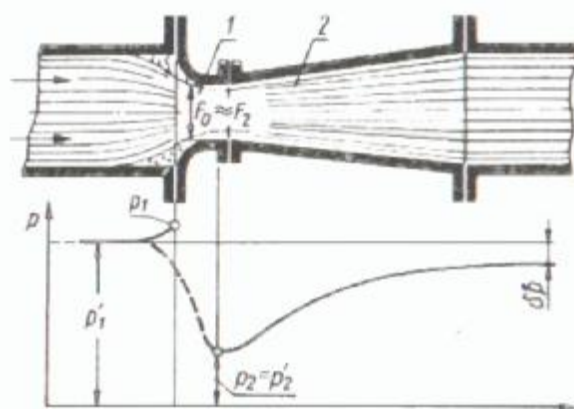
Manometr mierzy różnicę ciśnień:

$$\Delta p = p_1 - p_2$$

Zarówno po stronie wlotu, jak i po stronie wylotu z kryzy przy ścianie przewodu powstają wiry. Po stronie wlotu zajmują mniejszą przestrzeń.

Dysza po stronie wlotu ma specjalnie profilowaną krzywiznę przechodzącą w odcinek cylindryczny. Dzięki temu zwięźlenie strumienia następuje łagodniej, co powoduje zmniejszenie się obszaru wirów po stronie dopływowej zwężki i zmniejszają się straty energii przepływającego płynu. Straty ciśnienia są mniejsze niż przypadku kryzy.

Zwężka Venturiego składa się z dwóch części: jednej profilowanej jak w dyszy i drugiej stopniowo rozszerzającej się aż do wymiaru przewodu, zwanej dyfuzorem.



Rys. 36. Zwężka Venturiego i graficzne przedstawienie zasady jej działania: 1 – część zwężająca, 2 – dyfuzor [5]

Po stronie dopływowej przestrzeń zajmowana przez wiry jest minimalna. Stopniowo rozszerzający się dyfuzor pozwala na całkowite usunięcie wirów po stronie wylotowej zwężki. Przekrój strumienia w jego najwęższym miejscu jest równy przekrojowi cylindrycznej części zwężki, a najmniejsze ciśnienie statyczne również jest najmniejsze w tym miejscu. W przypadku zwężki Venturiego manometr mierzy największą różnicę ciśnień, a straty ciśnienia są najmniejsze.

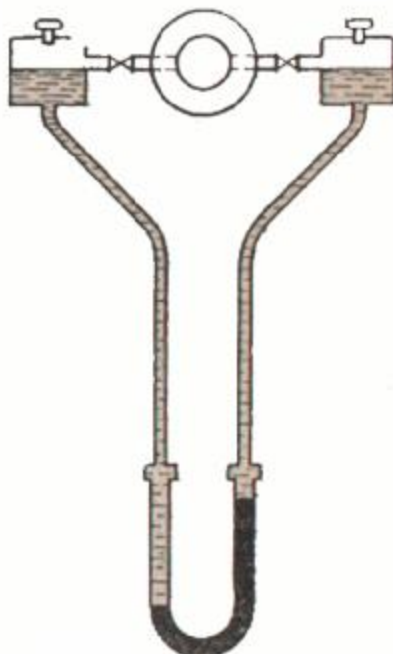
Wprowadzony wzór na obliczenie objętościowego natężenia przepływu ma postać:

$$Q_v = a \cdot F_0 \cdot \sqrt{\frac{2g(p_1 - p_2)}{g}}$$

gdzie:

- γ – ciężar właściwy płynu przepływającego przez zwężkę w N/m^3 ,
- α – współczynnik przepływu wyznaczany eksperymentalnie, zależy od Re i m
(m – moduł zwężki równy: $\frac{F_0}{F_1} = \frac{d^2}{D^2}$, d – średnica otworu zwężki,
 D – średnica przewodu),
- p_1 – ciśnienie tuż przed zwężką (Pa),
- p_2 – ciśnienie w najwęższym miejscu strumienia (Pa),
- F_0 – pole przekroju otworu zwężki (m^2).

Sposób podłączenia manometru różnicowego zależy od płynu jaki przepływa przez rurociąg. Na rysunku pokazano podłączenie manometru w przypadku przepływu pary.



Rys. 37. Schemat podłączenia manometru różnicowego do zwężki w przypadku pomiaru natężenia przepływu pary [5]

Przewody łączące zwężkę z manometrem wypełnione są cieczą powstałą z kondensacji pary. Zwężkę z manometrem łączy się przez naczynia wyrównawcze, zapewnia to stały poziom kondensatu w rurkach impulsowych.

Zwężki normalne to zwężki, których nie potrzeba wzorcować, posiadają doświadczalnie wyznaczoną zależność różnicy ciśnień przed i za zwężką od natężenia przepływu płynu. Zwężki nieznormalizowane zainstalowane na rurociągach gazowych o średnicy < 50 mm należy wzorcować. Ilość płynu płynąca przez zwężkę jest mierzona wzorcowym urządzeniem pomiarowym – stosuje się gazomierze dzwonowe.

4.3.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania sprawdzisz czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Jakie dodatkowe funkcje może spełniać poziomowskaz pływakowy?
2. Z jakich elementów składa się poziomowskaz ultradźwiękowy?
3. Co to jest natężenie przepływu?
4. Co się określa za pomocą liczby Reynoldsa?
5. W jakim celu stosuje się bocznikowanie przy podłączeniu rotametri?
6. Co to są zwężki normalne?
7. Jaka jest różnica między dyszą a zwężką Venturiego?

4.3.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Zmierz poziom wody w zbiorniku poziomowskazem pływakowym. Oblicz objętość cieczy w zbiorniku, jeżeli wiadomo, że jego średnica wynosi 100cm.

Sposób wykonania ćwiczeń

Aby wykonać ćwiczenie, powinienes:

- 1) napełnić zbiornik wodą,
- 2) wyzerować poziomowskaz,
- 3) zmienić wysokość poziomu cieczy,
- 4) dokonać pomiaru wysokości poziomu cieczy w zbiorniku,
- 5) obliczyć objętość cieczy w zbiorniku.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- poziomowskaz pływakowy,
- zbiornik z odpływem.

Ćwiczenie 2

Dokonaj pomiaru natężenia przepływu cieczy rotametrem.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinienes:

- 1) zamocować pionowo rotometr,
- 2) połączyć rotometr z przewodem doprowadzającym i odprowadzającym ciecz,
- 3) sprawdzić temperaturę cieczy i temperaturę wzorcowania rotametru,
- 4) odkręcić zawory i odczytać wartość ustalonego natężenia przepływu,
- 5) obliczyć poprawkę uwzględniającą temperaturę cieczy różną od temperatury wzorcowania rotametru,
- 6) obliczyć natężenie przepływu badanej cieczy.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- rotometr do określonej cieczy,
- termometr
- rurociąg
- tablice fizykochemiczne.

Ćwiczenie 3

Jaki charakter przepływa mają: woda o lepkości 1 cP, olej mineralny o lepkości 114 cP płynące w przewodach o średnicy równej 90 mm, jeżeli ich prędkość przepływu jest równa 1 m/s. Gęstość oleju 910 kg/m^3 . Sprawdź wymiar liczby Reynoldsa.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinienes:

- 1) obliczyć liczbę Re,
- 2) określić charakter przepływu wody i oleju mineralnego,
- 3) sprawdzić wymiar liczby Re.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- materiał dla ucznia pkt 4.3.1,
- literatura pkt 6.

4.3.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

	Tak	Nie
1) wyjaśnić zasadę działania gazomierza bębnowego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2) określić sposób pomiaru poziomu przy użyciu manometru?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3) uzasadnić potrzebę stosowania bocznikowania rotametri?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) wyjaśnić zasadę działania rurki spiętrzającej?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5) obliczyć liczbę Re i określić charakter przepływu płynu?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6) opisać różnice w budowie zwężek?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7) wyjaśnić sposoby podłączenia manometru do zwężki?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8) wyjaśnić pojęcia: natężenie przepływu, ciśnienie statyczne, niwelacyjne, dynamiczne?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

4.4. Pomiar wilgotności, lepkości, składu gazów

4.4.1. Materiał nauczania

Powietrze wilgotne jest mieszaniną powietrza i pary wodnej. Według prawa Daltona ciśnienie mieszaniny gazowej jest równe sumie ciśnień cząstkowych składników mieszaniny. Ciśnienie cząstkowe jest równe ciśnieniu, jakie wywierałby dany składnik, gdyby sam zajmował objętość zajmowaną przez mieszaninę. Ciśnienie wilgotnego powietrza jest więc równe sumie ciśnień cząstkowych powietrza suchego i pary wodnej. I dlatego miarą wilgotności powietrza może być ciśnienie pary wodnej w mieszaninie gazowej. W danej temperaturze zawartość pary wodnej może rosnać do momentu, aż osiągnie tzw. stan nasycenia, któremu odpowiada określone ciśnienie pary wodnej. Ciśnienie pary nasyconej określa więc największą wilgotność, jaką gaz może osiągnąć w danej temperaturze. Ciśnienie pary nasyconej w danej temperaturze jest stałe, a zwiększa się z jej wzrostem.

Wilgotność powietrza można wyrażać jako wilgotność względną lub bezwzględną.

Wilgotność względną definiuje się jako stosunek ciśnienia pary wodnej p zawartej w powietrzu w danej temperaturze i ciśnienia pary nasyconej p_n w tej samej temperaturze. Podaje się ją przeważnie w procentach.

$$\Phi = \frac{p}{p_n} \cdot 100\%$$

- p – ciśnienie pary wodnej zawartej w powietrzu, w danej temperaturze,
 p_n – prężność pary wodnej nasyconej w tej samej temperaturze.

Wilgotność względną Φ określa stopień nasycenia powietrza lub innego gazu parą wodną. Gaz nasycony posiada wilgotność równą 100%.

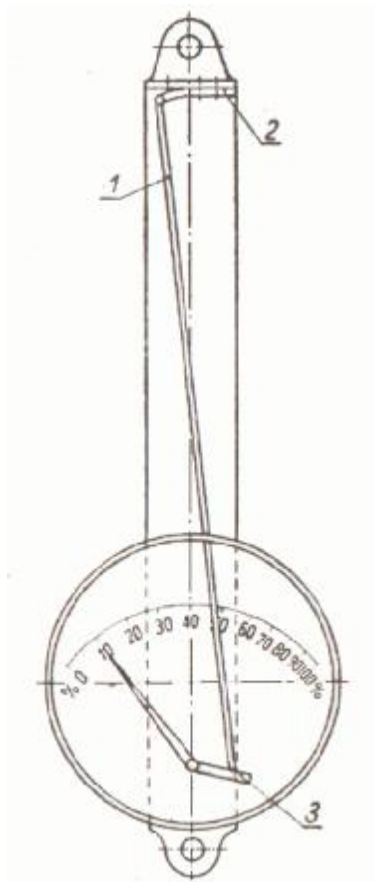
Wilgotność bezwzględna X wyraża, ile kilogramów pary wodnej przypada na 1 kilogram suchego powietrza.

$$X = \frac{p \cdot 18,02}{(P - p) \cdot M}$$

- p – ciśnienie pary wodnej w mieszaninie,
 P – ciśnienie całkowite mieszaniny gazowej,
18,02 – masa cząsteczkowa pary wodnej,
 M – masa cząsteczkowa gazu (dla powietrza $M = 28,97$ g/mol).

Higrometry

Są najprostszymi przyrządami do pomiaru wilgotności powietrza. Wykorzystuje się w nich zjawisko wydłużania się włosów ludzkich, błon, nici syntetycznych lub kurczenie się nici bawełnianych pod wpływem wilgoci. W higrometrze włosowym pęczek odtłuszczonych włosów ludzkich jednym końcem przymocowany jest do sprężyny napinającej, drugim do ruchomej wskazówki. Zmiana wilgotności powietrza powoduje zmianę naprężenia pęczka włosów i w efekcie obrót wskazówki na tarczy pomiarowej.



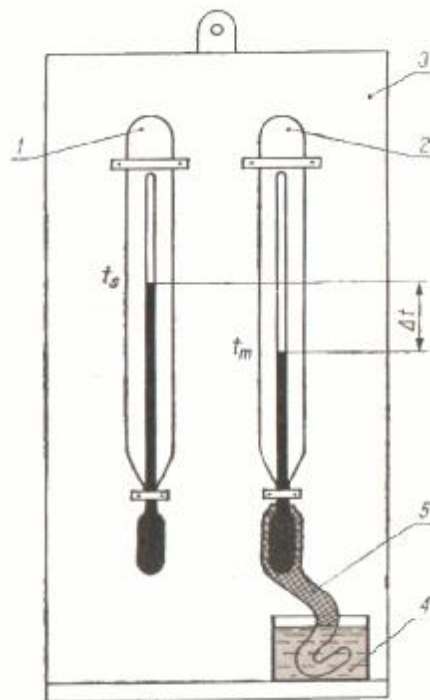
Rys. 38. Higrometr włosowy: 1 – pęczek włosów, 2 – sprężynka napinająca, 3 – wskazówka [1]

Na higrometrze odczytuje się wilgotność względną. Przyrządy te mają prostą budowę, mały koszt wykonania, błąd pomiaru wynosi około 3%.

Psychrometry

W psychrometrach wykorzystuje się zjawisko obniżania temperatury powierzchni zwilżonej w stosunku do temperatury powierzchni niezwilżonej w tych samych warunkach pomiarowych.

Psychrometr Augusta składa się z dwóch termometrów szklanych o takim samym zakresie pomiarowym i takiej samej klasie dokładności. Jeden termometr ma zbiorniczek owinięty gazą zanurzoną w pojemniczku z wodą destylowaną. Woda z powierzchni gazy odparowuje do powietrza i obniża temperaturę zbiorniczka. Temperatura wskazywana przez termometr nazywa się temperaturą termometru wilgotnego. Drugi termometr zwany suchym wskazuje temperaturę powietrza. Różnica wskazań obydwu termometrów zwana różnicą psychrometryczną jest funkcją wilgotności powietrza. Szukaną wartość wilgotności względnej odczytuje się z tablic psychrometrycznych dla temperatury suchego termometru i różnicy psychrometrycznej.



Rys. 39. Psychrometr Augusta: 1,2 – termometry, 3 – płyta, 4 – pojemnik, 5 – koszulka z gazy [1]

Psychrometr Assmana jest psychrometrem z wymuszonym obiegiem powietrza. Jego elementami są dwa jednakowe termometry umieszczone w cylindrycznych rurkach, które łączą się w jeden kanał zakończony wentylatorem. Przed pomiarem gazę owijającą termometr zwilża się wodą destylowaną, a następnie uruchamia napęd sprężyny wiatraka. Po paru minutach ustalą się obie temperatury, należy wówczas dokonać odczytu temperatur i wyznaczyć wilgotność.

Higrometry elektryczne działają na zasadzie zmiany rezystancji ciał higroskopijnych pod wpływem zmian wilgotności otaczającego powietrza. Dla wyznaczenia wilgotności ciał stałych wykorzystuje się pomiar pojemności elektrycznej.

Pomiar lepkości

Przy przepływie cieczy i gazów występują opory, działa siła tarcia. Współczynnik siły tarcia nazwany jest lepkością dynamiczną.

Obowiązującą jednostką lepkości dynamicznej μ jest:

$$\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$$

Używany jest również puaz i centipuaz:

$$P = 0,1 \cdot \text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$$

$$cP = 0,01 P$$

Lepkość kinematyczna jest równa stosunkowi lepkości dynamicznej i gęstości:

$$n = \frac{\mu}{\rho}$$

Jednostkami lepkości kinematycznej są:

$$\text{m}^2 / \text{s}$$

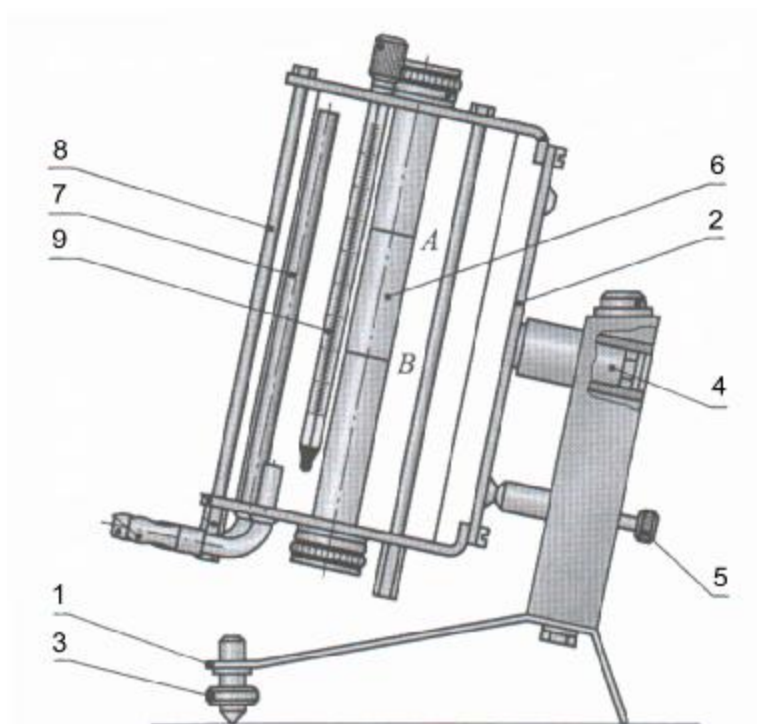
$$\text{stokes} \quad St = \text{cm}^2/\text{s}$$

Do pomiaru lepkości dynamicznej służy lepkościomierz Hopplera. Zasadniczą częścią aparatu jest rurka pomiarowa, umieszczona w cylindrze, przez który przepływa woda z termostatu. Aby dokonać pomiaru, należy rurkę napęlić badaną cieczą i umieścić w niej kulkę. Aparat wyposażony jest w komplet kulek o różnej masie i średnicach. Pomiar lepkości sprowadza się do zmierzenia czasu opadania kulki między kreskami A i B. Wartość lepkości dynamicznej oblicza się ze wzoru:

$$\mu = K(\rho_k - \rho_c)$$

w którym:

- K – stała kulki,
- ρ_k – gęstość kulki,
- ρ_c – gęstość cieczy.



Rys. 40. Lepkościomierz Hopplera: 1 – podstawa, 2, 8 – pręty metalowe obudowy, 3 – śruba poziomująca, 4 – łożysko, 6 – rurka pomiarowa, 7 – płaszcz wodny, 9 – termometr [3]

Zasada działania lepkościomierza oparta jest na pomiarze momentu skręcającego, który powstaje w wyniku oporu wytwarzanego przez badaną ciecz. W zależności od konstrukcji wyróżnia się lepkościomierze rotacyjne z współosiowymi cylindrami, z obracającym się wirnikiem i z równoległymi tarczami.

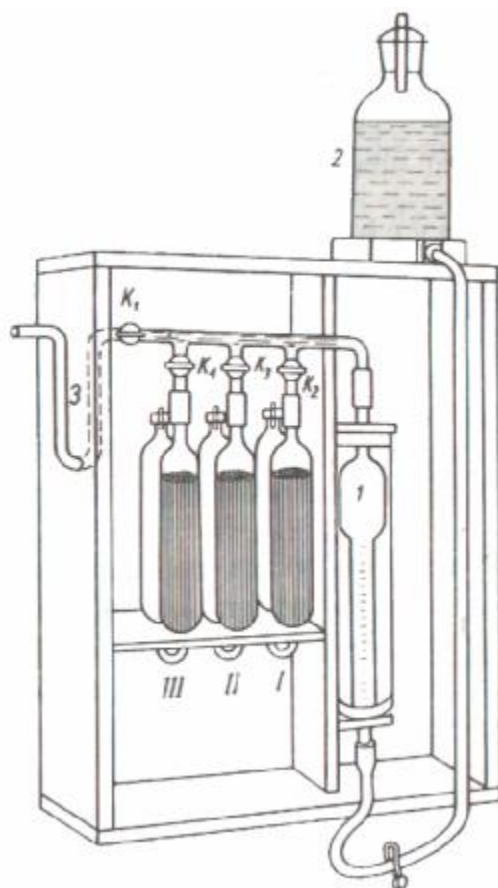
Analizatory gazów

Przyrządy do analizy gazów dzieli się na:

- analizatory chemiczne, w których wykorzystuje się reakcje chemiczne powodujące zmianę objętości, ciśnienia, temperatury, zabarwienia itp,

- analizatory fizyczne, mierzy się w nich jakąś właściwość fizyczną danego składnika mieszaniny gazowej lub porównuje ją z właściwościami gazu wzorcowego, np. gęstością,
- analizatory fizykochemiczne, w których zachodzą reakcje chemiczne i towarzyszą im pewne zjawiska fizyczne, np. wydziela się ciepło.

Analizator Orsata jest analizatorem chemicznym, w którym zachodzi adsorpcja składników mieszaniny gazowej w odpowiednich roztworach.



Rys. 41. Zwykły aparat Orsata: 1 – biureta, 2 – zbiornik, 3 – filtr pyłowy, I – III – naczynia absorpcyjne, K₁- K₄ – kurki [5]

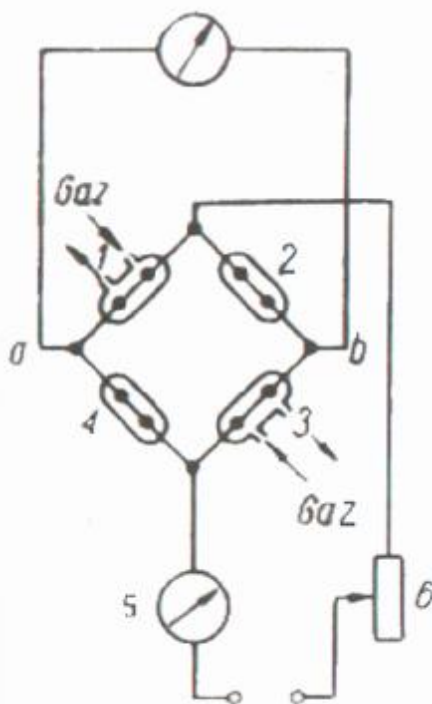
W aparacie Orsata biureta połączona jest z trzema naczyniami absorpcyjnymi. Pierwsze naczynie do pochłaniania tlenu węgla(IV), napełnione jest 50% roztworem wodorotlenku potasu. W drugim naczyniu pochłania się tlen w 40% roztworze wodorotlenku potasu, zawierającym 25% pirogalolu. Kolejne naczynie napełnione jest 25% roztworem chlorku amonu zawierającym 20% chlorku miedzi(I). Bezpośrednio przed pomiarem dodaje się do tego naczynia wodę amoniakalną i wiórki miedzi. W naczyniu tym pochłania się tlenek węgla(II).

W zbiorniku wyrównawczym znajduje się roztwór chlorku sodu lekko zakwaszony i zabarwiony oranżem metylowym.

Pomiar aparatem polega na napełnieniu biurety gazem i przetłaczaniu go kolejno do każdego naczynia. Po absorpcji pierwszego składnika przetłacza się mieszaninę do naczynia II, gdzie następuje absorpcja tlenu, a następnie do naczynia III.

Przewodnictwo cieplne mieszanin gazowych na ogół zależy od przewodnictwa cieplnego składników. Jeżeli przewodnictwo jednego składnika znacznie się różni od przewodnictwa innych składników mieszaniny, wówczas można określić stężenie tego składnika na podstawie pomiaru przewodnictwa cieplnego mieszaniny.

Układ pomiarowy analizatora termokonduktometrycznego stanowi mostek niezrównoważony, do którego włączono jednakowe rezystory ogrzewane prądem elektrycznym. Dla utrzymania stałego natężenia prądu zasilającego do obwodu włączony jest amperomierz i rezystor regulowany. Przez komory 1 i 3 przepływa badany gaz, komory 2 i 4 wypełnione są powietrzem.



Rys. 42. Analizator termokonduktometryczny: 1,3 – komory z przepływem gazu badanego, 2,4 – komory z powietrzem, 5 – amperomierz, 6 – regulowana rezystancja, 7 – miliwoltomierz [5]

Gdy ilość ciepła wydzielonego przez rezystory w komorach jest ustalona, temperatura rezystora jest tym wyższa im gorsze jest przewodnictwo cieplne gazu przepływającego przez komorę. Wzrost temperatury rezystora powoduje zmianę jego przewodności elektrycznej. Różnica potencjałów między punktami mostka a i b będzie zależała od różnicy temperatur rezystorów, czyli od różnicy w przewodnictwach cieplnych gazu analizowanego i powietrza, które jest gazem porównawczym. Wychylenie wskazówki miliwoltomierza od położenia zerowego wskazuje zawartość badanego składnika w gazie. Duży wpływ na wynik pomiaru ma temperatura otoczenia.

Chromatografia jest obecnie jedną z najbardziej rozpowszechnionych metod instrumentalnych chemii analitycznej. Zapewnia możliwość identyfikacji substancji oraz ich ilościowej analizy, nawet w niskich stężeniach i w obecności innych związków. W zależności od użytej fazy ruchomej chromatografię dzieli się m.in. na gazową (GC), cieczową (LLC).

Chromatografia jest fizykochemiczną metodą rozdzielania składników jednorodnych mieszanin w wyniku ich różnego podziału między fazę ruchomą a nieruchomą układu chromatograficznego.

4.4.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania sprawdzisz czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. W jakich jednostkach wyrażane są lepkości: dynamiczna i kinematyczna?
2. Dlaczego w higrometrach włosowych stosuje się włosy ludzkie?
3. Dlaczego w psychrometrze termometry wskazują różną temperaturę?
4. Czym różnią się metody fizyczne od fizykochemicznych analizowania gazów?
5. Na jakiej zasadzie działa aparat Orsata?
6. Czy pomiar analizatorem konduktometrycznym jest dokładny?

4.4.3. Ćwiczenia

Ćwiczenie 1

Porównaj dokładność pomiaru wilgotności higrometrem włosowym i psychrometrem Augusta.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) oznaczyć wilgotność higrometrem włosowym,
- 2) oznaczyć wilgotność psychrometrem Augusta,
- 3) odczytać z tablic psychrometrycznych wilgotność,
- 4) porównać wyniki obydwu pomiarów i określić dokładność przyrządów.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- higrometr włosowy,
- psychrometr Augusta,
- tablice psychrometryczne.

Ćwiczenie 2

Zmierz lepkość cieczy lepkościomierzem Hopplera.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) zapoznać się z instrukcją pomiaru lepkościomierzem,
- 2) podłączyć lepkościomierz do termostatu,
- 3) wypoziomować aparat,
- 4) napełnić rurkę pomiarową badaną cieczą,
- 5) dobrać kulkę,
- 6) wykonać 4 pomiary,
- 7) obliczyć lepkość.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- lepkościomierz Hopplera,
- komplet kulek,
- termostat,
- badana ciecz.

Ćwiczenie 3

Oznacz zawartość CO₂ w gazie spalinowym.

Sposób wykonania ćwiczeń

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) zapoznać się z instrukcją obsługi aparatu Orsata,
- 2) napełnić naczynie wyrównawcze,
- 3) sprawdzić szczelność aparatu wg instrukcji,
- 4) oznaczyć zawartość CO₂.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- aparat Orsata,
- 50% roztwór KOH, solanka, oranż metylowy,
- instrukcja bezpiecznej pracy,
- karty charakterystyki substancji.

4.4.4. Sprawdzian postępów

Czy potrafisz:

Tak

Nie

- 1) wyznaczyć wilgotność powietrza?
- 2) obliczyć lepkość kinematyczną?
- 3) wyjaśnić zasadę działania lepkościomierza Hopplera?
- 4) dokonać analizy gazu w aparacie Orsata?
- 5) sklasyfikować analizatory gazu?
- 6) przeliczyć wilgotność względną na bezwzględną?

5. SPRAWDZIAN OSIĄGNIĘĆ

Instrukcja dla ucznia

1. Przeczytaj uważnie instrukcję.
2. Podpisz imieniem i nazwiskiem kartę odpowiedzi.
3. Zapoznaj się z zestawem zadań testowych.
4. Test zawiera 20 zadań.
5. Do każdego zadania są 4 możliwe odpowiedzi. Tylko jedna jest prawidłowa.
6. Udzielaj odpowiedzi tylko na załączonej karcie odpowiedzi, stawiając w odpowiedniej rubryce znak X.
7. W przypadku pomyłki należy błędną odpowiedź zaznaczyć kółkiem, a następnie ponownie zakreślić odpowiedź prawidłową.
8. Na rozwiązanie testu masz 45 minut.

Powodzenia!

Zestaw zadań testowych

1. Termometry termoelektryczne działają na zasadzie:
 - a) rozszerzalności cieplnej cieczy,
 - b) pomiaru różnicy potencjałów elektrycznych,
 - c) zmian oporu,
 - d) rozszerzalności cieplnej ciał stałych.

2. Wartość rezystancji w obwodzie, w którym płynie prąd o natężeniu 20 mA i napięciu 5 V, wynosi:
 - a) 10 Ω ,
 - b) 100 Ω ,
 - c) 25 Ω ,
 - d) 250 Ω .

3. Błąd systematyczny powstaje:
 - a) przy wykonywaniu wielu pomiarów tej samej wartości wielkości mierzonej w tych samych warunkach,
 - b) przy wykonywaniu wielu pomiarów tej samej wartości wielkości mierzonej w zmiennych warunkach,
 - c) w wyniku nieprawidłowego wykonania pomiaru,
 - d) w wyniku nieprawidłowego odczytu pomiaru.

4. Wakuometry to przyrządy do pomiaru:
 - a) różnicy ciśnień,
 - b) ciśnienia absolutnego,
 - c) nadciśnienia,
 - d) podciśnienia.

5. W celu zwiększenia zakresu pomiaru, bocznikowanie stosuje się w:
 - a) watomierzach,
 - b) woltomierzach,
 - c) amperomierzach,
 - d) omomierzach.

6. Szkło refleksyjne stosuje się przy pomiarze:
 - a) poziomu cieczy,
 - b) natężeniu przepływu cieczy,
 - c) natężeniu przepływu gazu,
 - d) ciśnienia gazu.

7. Międzynarodowa praktyczna skala temperatur wyrażona jest w stopniach:
 - a) Kelwina,
 - b) Celsjusza,
 - c) Beauforta,
 - d) Fahrenheita.

8. Kryterium Reynoldsa **nie zależy** od:
- b) prędkości przepływu płynu,
 - c) gęstości płynu,
 - c) lepkości dynamicznej płynu,
 - d) masy płynu.
9. Ciśnienie 1MPa jest równe:
- a) 10,0 at,
 - b) 10,2 at,
 - c) 10,4 at,
 - d) 10,6 at.
10. W aparacie Orsata wykorzystuje się:
- a) właściwości paramagnetyczne,
 - b) gęstość gazu,
 - c) ciepło reakcji chemicznej,
 - d) reakcje chemiczne.
11. Materiał na czujnik termoelementu powinien mieć:
- a) opór zależny od temperatury,
 - b) małą siłę termoelektryczną,
 - c) wysoką temperaturę topnienia,
 - d) niską temperaturę topnienia.
12. Natężenie przepływu gazów **nie zależy** od:
- a) średnicy przewodów,
 - b) ciśnienia,
 - c) temperatury,
 - d) gęstości.
13. Wymuszony obieg powietrza posiada wilgotnościomierz:
- a) włosowy,
 - b) Augusta,
 - c) Assmana,
 - d) rezystancyjny.
14. W aparacie Orsata 50% roztwór KOH służy do pochłaniania:
- a) tlenku węgla(II),
 - b) tlenku węgla(I),
 - c) tlenu,
 - d) węglowodorów.
15. Wadą ciśnieniomierzy sprężynowych jest:
- a) występowanie opóźnienia sprężynowego,
 - b) trudność w obsłudze,
 - c) skomplikowana budowa,
 - d) mała wytrzymałość na uszkodzenia.

16. Termometry cieczowe wypełnia się rtęcią, gdyż ważną ich cechą jest:
- zwilżalność szkła,
 - duże ciepło właściwe,
 - rozszerzalność proporcjonalna do temperatury,
 - pomiar temperatur w zakresie -50°C do $+50^{\circ}\text{C}$.
17. Liczbę Reynoldsa podaje się w jednostkach:
- m^2/s ,
 - $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$,
 - $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$,
 - jest liczba bezwymiarowa.
18. Klasa dokładności przyrządu pomiarowego informuje o:
- zakresie pomiarowym,
 - dokładności przyrządu,
 - błędzie grubym,
 - błędzie przypadkowym.
19. W pirometrze radiacyjnym wykorzystuje się promieniowanie:
- o jednej długości fali,
 - o dwóch długościach fali,
 - we wszystkich zakresach długości fali,
 - izotopowe.
20. Ciecz przepływająca osiąga największą prędkość :
- w kryzie,
 - tuż przed kryzą,
 - tuż za kryzą,
 - w pewnej odległości od kryzy.

KARTA ODPOWIEDZI

Imię i nazwisko.....

Pomiary parametrów procesowych

Zakreśl poprawną odpowiedź.

Nr zadania	Odpowiedź				Punkty
1	a	b	c	d	
2	a	b	c	d	
3	a	b	c	d	
4	a	b	c	d	
5	a	b	c	d	
6	a	b	c	d	
7	a	b	c	d	
8	a	b	c	d	
9	a	b	c	d	
10	a	b	c	d	
11	a	b	c	d	
12	a	b	c	d	
13	a	b	c	d	
14	a	b	c	d	
15	a	b	c	d	
16	a	b	c	d	
17	a	b	c	d	
18	a	b	c	d	
19	a	b	c	d	
20	a	b	c	d	
Razem:					

6. LITERATURA

1. Bogumił T.: Aparatura kontrolno-pomiarowa. WSiP, Warszawa 1974
2. Jabłoński W., Płoszajski G. Elektrotechnika z automatyką. WSiP, Warszawa 2004
3. Klepaczek-Filipiak B., Jakubiak Z., Wulkiewicz U. Badania chemiczne. WSiP, Warszawa 1998
4. Nieciejowski E. Elektrotechnika. WSiP, Warszawa 1974
5. Praca zbiorowa. Aparatura kontrolno- pomiarowa w przemyśle chemicznym. WSiP, Warszawa 1989
6. Praca zbiorowa. Analiza instrumentalna. PZWL, Warszawa 1983