

Metodyka pomiaru prędkości średniej płynu
za pomocą rurki Prandtla

Za pomocą rurek spiętrzających można mierzyć tylko ciśnienie w miejscu umieszczenia sondy pomiarowej. Ponieważ rozkład prędkości w przekroju prostopadłym do kierunku przepływu strumienia nie jest zazwyczaj równomierny i symetryczny względem osi rurociągu, należy wyznaczyć średnią prędkość przepływu płynu. Za pomocą rurek spiętrzających można określić prędkość średnią w różny sposób. Sposób pomiaru prędkości średniej dla symetrycznego rozkładu prędkości względem osi rurociągu został już wcześniej omówiony. Mierzy się wówczas rzeczywiste ciśnienie dynamiczne na promieniu (od osi rurociągu) równym $0,76 R$, które jest równe średniemu ciśnieniu dynamicznemu dla całego poprzecznego przekroju rurociągu. Wykonuje się wówczas tylko jeden pomiar ciśnienia dynamicznego, z którego wyznacza się średnią prędkość przepływu płynu.

Najdokładniejszą jednak metodą, niezależną od charakteru strumienia i kształtu przewodu jest metoda polegająca na podzieleniu powierzchni przewodu na szereg powierzchni o równych polach i pomiarze prędkości w określonym miejscu każdego z tych pól. Średnią prędkość dla całego przekroju przewodu można wówczas obliczyć jako średnią arytmetyczną z prędkości miejscowych

$$c_{\text{śr}} = \frac{1}{n} (c_1 + c_2 + \dots + c_n).$$

Za pomocą rurek spiętrzających mierzy się jednak ciśnienie dynamiczne, które zmierzone mikromanometrami wyrażone jest zwykle jako wysokość słupa cieczy h . Wartość średnia wskazań mikromanometrów będzie wówczas równa.

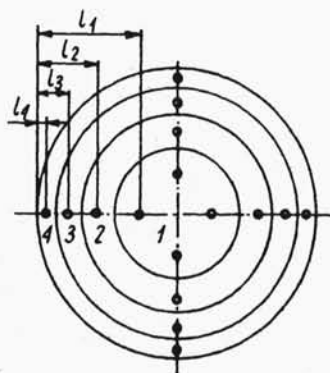
$$\sqrt{h_{\text{śr}}} = \frac{1}{n} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2} + \dots + \sqrt{h_n}).$$

Prędkość średnią przepływu można więc obliczyć z równania

$$c_{\text{śr}} = \sqrt{\frac{2g_n}{\rho} h_{\text{śr}} (\rho_1 - \rho)}, \quad \text{m/s.} \quad 8.34$$

Oznaczenia jak w poprzednich wzorach.

W przypadku przewodów kołowych przekroje ich dzieli się na n współśrodkowych pierścieni o równych polach powierzchni. Punkty pomiarowe znajdują się na okręgach dzielących każdy pierścień na dwa równe pola. Schemat podziału powierzchni przewodu kołowego z zaznaczonymi punktami pomiarowymi pokazano na rys.8.33. Odległość punktów pomiarowych od ścianki przewodu można określić z równania



$$l = R \left(1 \pm \sqrt{\frac{2i - 1}{2n}} \right) \quad (8.35)$$

gdzie:

- l - odległość punktu pomiarowego od wewnętrznej powierzchni przewodu
- R - wewnętrzny promień przewodu,
- i - numer kolejnego pierścienia liczonego od środka przewodu,
- n - liczba współśrodkowych pierścieni.

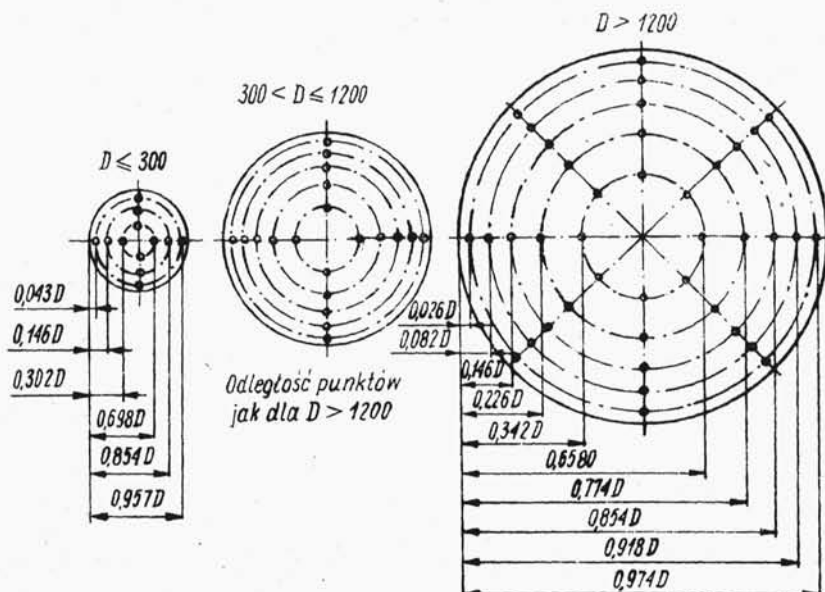
Rys.8.33. Schemat podziału powierzchni przewodu kołowego z zaznaczonymi punktami pomiarowymi

Na rysunku 8.34 pokazano rozmieszczenie punktów pomiarowych w przewodach kołowych o różnych średnicach. Jak wynika z rysunku liczba punktów pomiarowych jest różna dla różnych średnic przewodów. Według zaleceń normy dla średnic $D \leq 300$ mm należy powierzchnię przewodu kołowego dzielić na 3 współśrodkowe pierścienie, zaś dla $D > 300$ mm na pięć pierścieni o równych polach powierzchni.

Należy przy tym dodać, że dla średnic przewodów $D \leq 1200$ mm punkty pomiarowe rozmieszczone są wzdłuż dwóch wzajemnie prostopadłych do siebie średnic, natomiast dla $D > 1200$ mm wzdłuż czterech średnic przesuniętych o 45° .

Przykład rozkładu prędkości powietrza w przewodzie wentylacyjnym o przekroju kołowym, dla pomiarów wykonanych za pomocą rurki Prandtla, pokazano na rys.8.35.

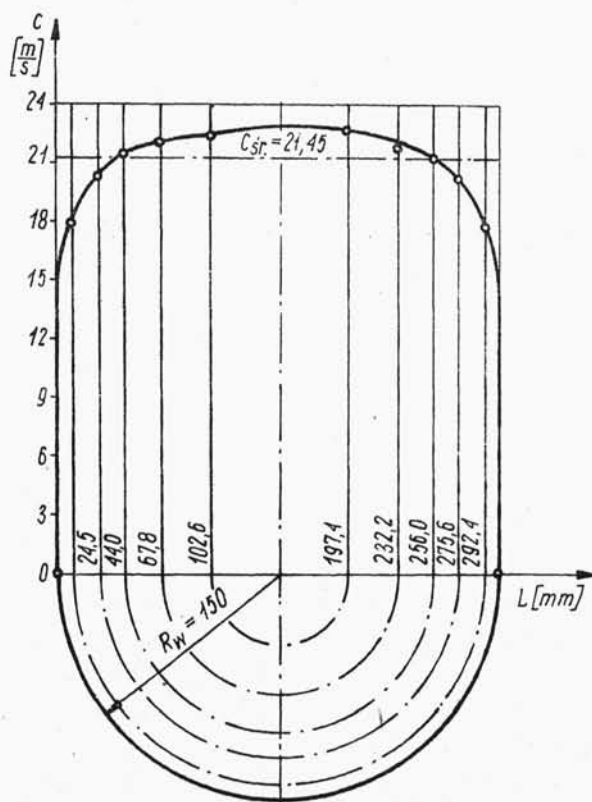
Rozmieszczenie punktów pomiarowych dla przewodów o przekroju prostokątnym pokazano na rys.8.36. Pole poprzeczne



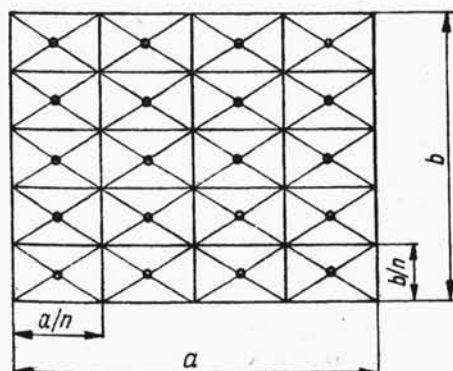
Rys. 8.34. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych dla różnych średnic przewodów kołowych

przekroju przewodu kwadratowego lub prostokątnego dzieli się na elementarne pola geometrycznie podobne do pola całego przewodu. Punkty pomiarowe znajdują się w środku ciężkości tych pól. W tabelicy 8.7 podano liczbę elementarnych pól w zależności od pola całego przekroju przewodu przy określonym dzielniku boków n . Podczas pomiaru prędkości przepływu płynu rurkami spiętrzającymi należy zwracać uwagę na to, aby średnica zastosowanej rurki d nie przekraczała $1/30$ wewnętrznej średnicy przewodu.

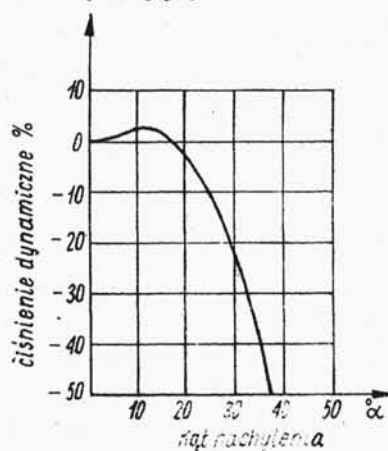
Na rysunku 8.37 pokazano wpływ odchylenia osi rurki Prandtla od osi przewodu na pomiar ciśnienia dynamicznego. Z wykresu wynika, że odchylenie rurki o $\pm 17^\circ$ w stosunku do kierunku wektorów prędkości powoduje znikomy błąd pomiaru ciśnienia dynamicznego. Wielkość błędu w tym zakresie odchylenia nie przekracza 1%.



Rys. 8.35. Rozkład prędkości powietrza w kołowym przewodzie wentylacyjnym



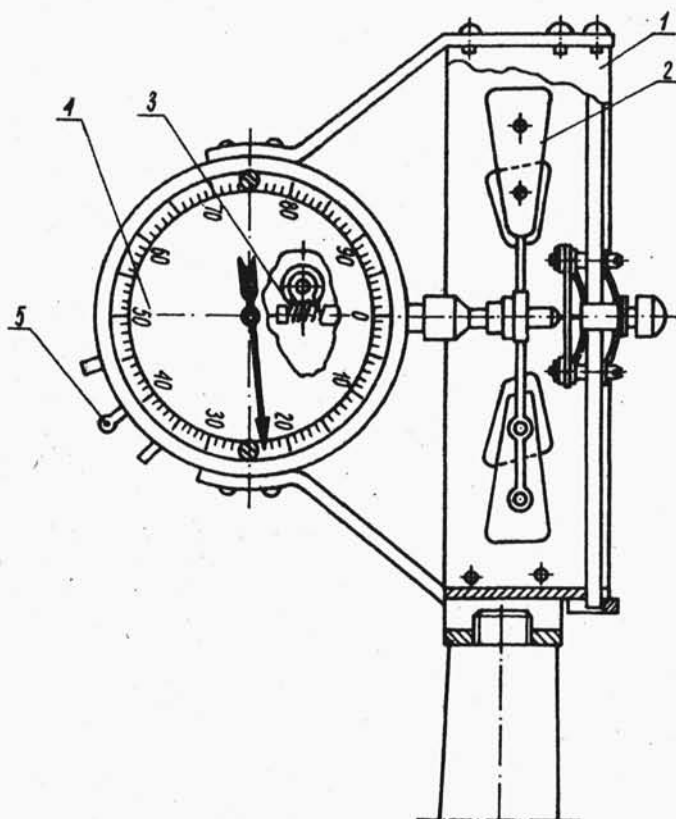
Rys. 8.36. Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych w przewodzie o przekroju prostokątnym



Rys. 8.37. Wpływ kąta odchylenia rurki spiętrzającej na pomiar ciśnienia dynamicznego

Anemometry skrzydełkowe

Zasada pracy tych przyrządów podobna jest do przepływomierzy cieczowych z wirnikiem śrubowym. Anemometry stosowane są do pomiaru prędkości gazu w przewodach lub w przestrzeniach otwartych (np. okna, drzwi) o znanym polu przekroju. Mierzą one średnią długość strugi przepływającego gazu w różnych punktach dowolnego przekroju.



Rys.8.38. Anemometr skrzydełkowy

Schemat zwykłego anemometru skrzydełkowego pokazano na rys.8.38. Składa on się z lekkiej obudowy metalowej w kształcie walca 1, w której umieszczony jest współosiowo wirnik 2 z łopatkami wykonanymi z bardzo cienkiej blachy aluminiowej. Łopatki nachylone są pod pewnym kątem α w stosunku do osi

wirnika. Przepływający strumień gazu uderza pod kątem α w łopatkę i powoduje ruch obrotowy wirnika. Liczba obrotów wirnika jest proporcjonalna do prędkości przepływu gazu. Obracający się wirnik napędza za pomocą przekładni ślimakowej 3 liczydło 4. Układ liczydła wyposażony jest w wyłącznik 5. Anemometr mierzy długość strugi gazu, która przepłynęła równolegle do osi przyrządu.

Tablica 8.7

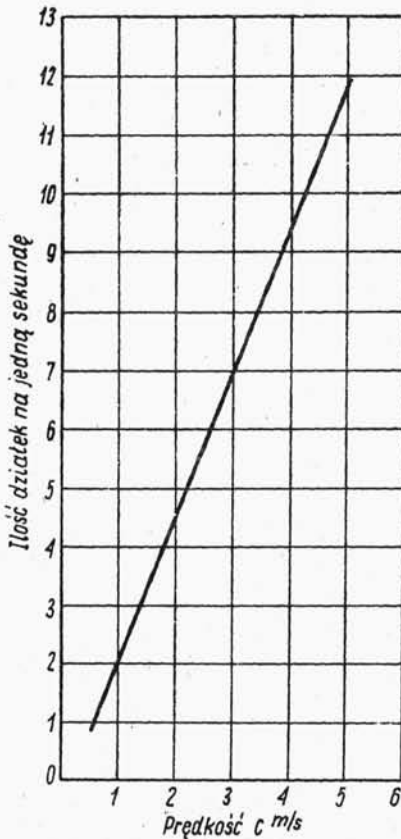
Liczba elementarnych pól dla przewodów prostokątnych

Pole poprzecznego przekroju przewodu m^2	Liczba elementarnych pól	Dzielnik boku n
$F \leq 0,5$	16	4
$0,5 < F \leq 2,5$	25	5
$F > 2,5$	36	6

Do określenia prędkości przepływu gazu potrzebny jest równoczesny pomiar czasu. W tym celu pomiaru dokonuje się przez jednoczesne uruchomienie liczydła po ustaleniu się obrotów wirnika i stopera. Pomiar kończy się przez równoczesne wyłączenie obu przyrządów. Następnie należy odczytać liczbę działek z liczydła anemometru i podzielić przez czas pomiaru. Dla tej wielkości z charakterystyki anemometru, pokazanej na rys.8.39, można odczytać średnią prędkość przepływu gazu.

Dla zmniejszenia bezwładności przyrządu, a tym samym zwiększenia jego czułości, wszystkie części wirnika są bardzo lekkie i delikatne. Dlatego anemometry są bardzo podatne na mechaniczne uszkodzenia. Nie należy więc ich używać do pomiaru prędkości poza przedziałem zastosowania.

Anemometr pokazany na rys.8.38 można stosować dla prędkości gazu $0,3 \div 5$ m/s, ponieważ w tym zakresie zachowana jest proporcjonalność wskazań przyrządu. Poniżej $0,3$ m/s charakterystyka anemometru zwykłego jest linią krzywą, przy czym dla prędkości gazu do $0,2$ m/s czułość przyrządu jest zbyt mała.



Rys.8.39. Charakterystyka zwykłego anemometru skrzydełkowego

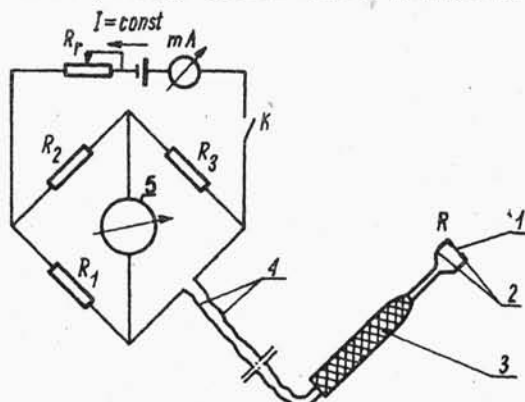
Przy pomiarach prędkości gazu większych od 5 m/s może nastąpić mechaniczne uszkodzenie łopatek wirnika anemometru.

Dla pomiaru prędkości mniejszych od 0,3 m/s stosowane są anemometry różnicowe. Zwykły anemometr skrzydełkowy wyposażony jest wówczas dodatkowo w wentylatorek wytwarzający stały strumień powietrza, który trafiając na łopatki wirnika obraca je ruchem jednostajnym. Obroty te przekazywane są na mechanizm liczydła. Z przeciwnej strony napływa z prędkością od 0,02 do ok. 0,5 m/s strumień gazu, powodując hamowanie obrotów wirnika. Uzyskana w ten sposób różnica wskazań pomiędzy stałą wydajnością wentylatora, a odczytem na liczydłe będzie miarą prędkości przepływającego strumienia gazu.

Termoanemometry

Przyrządy te stosowane są do pomiaru prędkości miejscowych przepływającego gazu. W celu określenia strumienia masy czynnika należy więc wyznaczyć prędkość średnią gazu przez pomiar prędkości miejscowych w różnych punktach znanego poprzecznego przekroju przewodu. Schemat układu pomiarowego z nie zrównoważonym mostkiem Wheatstone'a pokazano na rys.8.40. Czujnikiem pomiarowym 1 jest cienki drut platynowy, z platyno-irytu lub niklu o średnicy $0,1 \div 0,01$ mm umieszczony między wspornikami 2 przewodzącymi prąd elektryczny. Całość w czasie pomiaru osadzana jest w uchwycie 3 połączonym z mo-

stkiem Wheatstone'a przewodami miedzianymi 4. W wyniku przepływu prądu elektrycznego przez układ pomiarowy w druciku po-

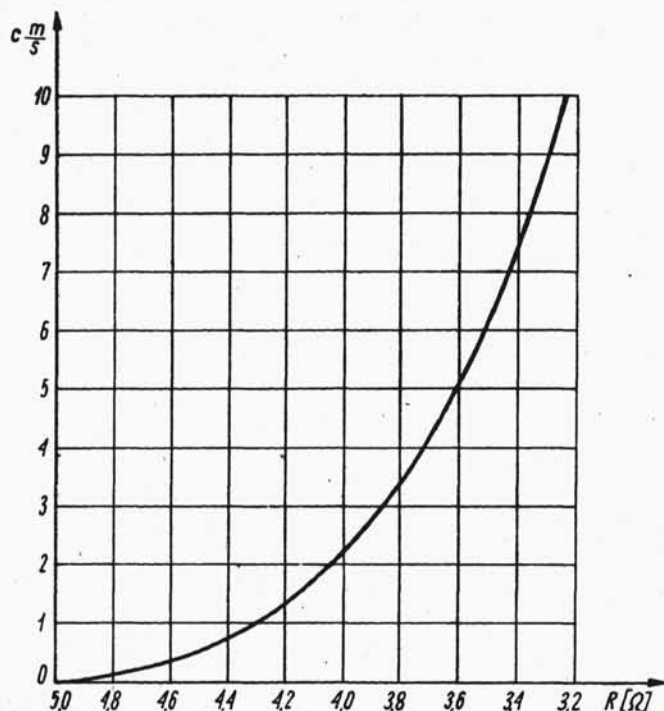


Rys.8.40. Schemat układu pomiarowego z mostkiem Wheatstone'a

miarowym (oporowym) wydziela się ciepło Joule'a, które powoduje wzrost jego temperatury. Po pewnym czasie ustala się równowaga między wydzielaniem ciepła Joule'a a stratami ciepła do otoczenia głównie drogą konwekcji i temperatura czujnika jest stała. Po umieszczeniu nagrzanego czujnika w strumieniu prostopadle do kierunku przepływu czynnika prędkość gazu powoduje jego chłodzenie, a więc i obniżanie oporności elektrycznej R . Zmiana oporności R drucika pomiarowego powoduje zakłócenie równowagi mostka, co wskazuje galwanometr 5, którego skala może być wycechowana w jednostkach prędkości. Charakterystyka czujnika dla powyższego układu pomiarowego pokazana jest na rys.8.41. Z wykresu wynika, że przed właściwym pomiarem czujnik należy umieścić w osłonie (prędkość równa 0) w temperaturze ok. 22°C i za pomocą opornika regulacyjnego R_p tak wyregulować natężenie prądu J , aby wskazówka galwanometru wskazywała oporność 5Ω . Dla ustalania stałego natężenia prądu J nie potrzebny jest więc opornik wzorcowy.

Charakterystyka prędkości przepływu gazu w zależności od oporności elektrycznej R nie jest liniowa, co jest wadą tego układu pomiarowego, ponieważ zmniejsza to znacznie zakres

pomiarowy termoanemometru. Rzeczywisty zakres pomiarowy prędkości wynosi 10 m/s, a w niektórych przypadkach nawet 50 m/s. Przy dokładnych pomiarach natomiast nie powinno się mierzyć



Rys.8.41. Charakterystyka czujnika termocouple przy temperaturze otoczenia $t_0 = 22^\circ\text{C}$

prędkości przepływu gazu większych od 3 m/s, gdyż powyżej tego zakresu duże zmiany prędkości gazu powodują bardzo małe zmiany oporności elektrycznej R . Przy tej metodzie pomiarowej zamiast niezrównoważonego mostka Wheatstone'a można zastosować kompensator i wówczas dokonać pomiaru spadku napięcia na druciku oporowym (czujnika). Spadek ten przy stałym natężeniu prądu przepływającego przez układ jest zależny od oporności elektrycznej R zgodnie z równaniem

$$\Delta U = I R. \quad (8.36)$$

Do pomiaru większych prędkości gazu stosowane są termoanometry, w których utrzymywana jest stała temperatura czuj-

nika, a więc i stała oporność R. Stałą temperaturę drucika pomiarowego utrzymuje się przez doprowadzenie większej ilości ciepła, a więc przez zwiększenie natężenia prądu przepływającego przez czujnik. Jako układ pomiarowy można wówczas zamiast mostka niezrównoważonego zastosować zrównoważony mostek Wheatstone'a i w czasie pomiaru tak zmieniać natężenie prądu w obwodzie, aby galwanometr wskazywał zero.

Czujniki termoanemometrów wymagają indywidualnego wzorcowania i każdy z nich musi mieć oddzielną charakterystykę.

Termoanemometry, w porównaniu z innymi przepływomierzami gazu, mają wiele zalet. Do najważniejszych należy zaliczyć małe wymiary czujników w wyniku czego charakteryzują się one minimalną bezwładnością oraz nie powodują zakłóceń przepływu gazu. Przy specjalnym wykonaniu czujników o średnicach kilku mikrometrów, stała czasowa może wynosić mikrosekundy. Ponadto charakteryzują się one dużą dokładnością pomiaru prędkości miejscowych gazu.

Katatermometr

Katatermometr stosowany jest do pomiaru tzw. zdolności chłodzącej otoczenia. Jest to termometr alkoholowy (rys.8.42) z czujnikiem walcowym o ściśle określonych wymiarach oraz z kapilarą wyposażoną tylko w dwie kresy, a mianowicie przy temperaturach 35 i 38°C . Pomiar polega na mierzeniu czasu stygnięcia lub podgrzewania alkoholu w zakresie temperatur $38 \div 35^{\circ}\text{C}$. Przed właściwym pomiarem więc, przy temperaturze otoczenia niższej od 35°C , czujnik termometru należy umieścić w wodzie o temperaturze około 50°C , aby alkohol wypełnił górny zbiorniczek rozszerzonej kapilary. Następnie po wyjęciu z wody termometr trzeba starannie osuszyć flanelową szmatką (żeby nie mierzył temperatury termometru mokrego), umieścić w strumieniu badanego powietrza i mierzyć za pomocą sekundomierza czas opadania alkoholu w zakresie temperatur $38 \div 35^{\circ}\text{C}$.

W przypadku gdy temperatura otoczenia jest wyższa od 38°C , wówczas czujnik termometru należy ochłodzić i mierzyć czas wznoszenia się alkoholu od 35 do 38°C .



Rys. 8.42. Katatermometr

Znając tzw. stałą katatermometru, której wartość wyznacza się w wyniku wzorcowania oraz temperaturę badanego gazu, można ze wzorów empirycznych wyliczyć prędkość przepływu

dla $c < 1$ m/s,

$$c = \left(\frac{\frac{H}{(36,5 - t)\tau} - 0,2}{0,4} \right)^2 \quad \text{m/s}, \quad (8.37)$$

dla $1 \text{ m/s} \leq c \leq 1,5$,

$$c = \left(\frac{\frac{H}{(36,5 - t)\tau} - 0,13}{0,47} \right)^2, \quad \text{m/s} \quad (8.38)$$

gdzie:

H - stała katatermometru, J/cm^2 ,

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

τ - czas stygnięcia w zakresie temperatur

$38 \div 35^{\circ}\text{C}$, s.

Średnia temperatura katatermometru w czasie pomiaru wynosi $36,5^{\circ}\text{C}$, a więc jest zbliżona do temperatury ciała ludzkiego. A zatem można uznać, że przyrząd ten modeluje warunki wymiany ciepła pomiędzy powierzchnią ciała ludzkiego a otoczeniem.

8.4. SPRAWDZANIE PRZYRZĄDÓW

Sprawdzenie przyrządów do pomiaru strumienia masy płynu przeprowadza się za pomocą przyrządów lub urządzeń wzorcowych albo przyrządów kontrolnych pozwalających na określenie strumienia masy płynu z dużą dokładnością. Mogą to być zbiorniki miernicze dla cieczy, a także zbiorniki dla gazu, tzw. przyrządy sześciastokątne lub przepływomierze o wysokiej kla-

sie dokładności, np. gazomierze bębnowe, kryzy ISA i dysze ISA normalne, przepływomierze z owalnymi wirnikami itd.

Przy sprawdzaniu przyrządów należy odróżnić dwie metody wykonywania pomiarów kontrolnych:

- metodę objętościową,
- metodę przepływową.

W przypadku metod objętościowych porównuje się ilość płynu przepływającą przez badany przyrząd i naczynia wzorcowe lub układy wzorcowe przy równoczesnym pomiarze czasu przepływu płynu.

Metodami przepływowymi mierzy się strumień masy płynu bez równoczesnego pomiaru czasu przepływu. Przy tej metodzie najczęściej stosuje się kryzy ISA z pomiarem przytarczowym lub "vena contracta" oraz dysze ISA. Dla przyrządów do pomiaru prędkości gazu stosuje się tzw. tunele aerodynamiczne w kształcie zwężek Venturiego.

9. ANALIZA PALIW CIEKŁYCH

Surowcami wyjściowymi do produkcji paliw ciekłych są: ropa naftowa oraz węgiel kamienny, węgiel brunatny i łupki. W zależności od rodzaju surowca wyjściowego i zastosowanych metod technologicznych, ilościowy stosunek związków węgla i wodoru w paliwie ciekłym może być różny, co ma istotny wpływ na wartość opałową i na warunki spalania tych paliw. Dlatego też - w celu umożliwienia przeprowadzenia prawidłowego procesu spalania paliwa ciekłego - wykonuje się nie tylko oznaczenie wartości opałowej, ale również oznaczenia własności fizycznych olejów opałowych mineralnych i smołowych. Ponieważ obowiązujące w kraju normy nie podają wielu własności olejów opałowych koniecznych do projektowania i prawidłowej eksploatacji urządzeń energetycznych, więc wykonanie niżej wymienionych oznaczeń staje się w praktyce koniecznością.