

Rys.8.21. Wpływ modułu zwężki i liczby Reynoldsa na liczbę przepływu  $\alpha$ .

#### Metodyka obliczeń zwęzek pomiarowych

Przy zastosowaniu zwęzek pomiarowych do określania strumienia masy płynu mogą wystąpić dwa przypadki.

1. Znana jest średnica rurociągu  $D$  w miejscu zainstalowania zwężki, rodzaj zwężki i średnica jej otworu  $d$ . W tym przypadku wielkości potrzebne do obliczenia strumienia masy płynu - wzór (8.16) określa się w prosty sposób, korzystając z odpowiednich tablic i nomogramów zawartych w normie.

2. Częściej jednak spotykany jest przypadek, gdy należy określić strumień masy dla danego rodzaju płynu przepływającego w rurociągu, przy czym znane są:

- materiał rurociągu,
- rzeczywista średnica rurociągu  $D$ ,

- parametry przepływającego płynu,
- długości odcinków pomiarowych,
- rodzaj oporów przed i za zwężką pomiarową,
- w przybliżeniu maksymalne i minimalne natężenia przepływu płynu.

Dla powyższych danych należy wówczas zaprojektować najodpowiedniejszą dla danych warunków zwężkę pomiarową. Wybór rodzaju zwężki pomiarowej zależy od rzeczywistych długości odcinków prostych rurociągu przed i za zwężką, dokładności wykonywanych pomiarów, średnicy przewodu oraz możliwości straty ciśnienia w zwężce pomiarowej. Kryzy pomiarowe można stosować tylko wówczas, gdy duża strata ciśnienia płynu  $\Delta p_s$  nie będzie miała większego znaczenia. Stratę ciśnienia płynu, dla określonego rodzaju zwężki pomiarowej i jej modułu, można określić z nomogramu na rys. Z12-1 zawartego w normie PN-65/M-53950. Za stratę ciśnienia w zwężce pomiarowej przyjmuje się różnicę ciśnień w dwóch przekrojach strumienia w odległości  $D$  przed zwężką i w odległości  $l$  za zwężką pomiarową. Odległość  $l$  przyjmuje się:

- 6D - dla kryz normalnych, dysz ISA  
i klasycznej zwężki Venturiego,
  - D - dla długiej dyszy Venturiego,
  - 7D - przy  $m = 0,1$
  - 6D - przy  $m = 0,25$
  - 4D - przy  $m = 0,5$
- } dla krótkiej dyszy Venturiego

Następnie należy obliczyć średnicę zwężki pomiarowej  $d$ . W tym celu przyjmuje się maksymalnie dopuszczalny spadek ciśnienia w zwężce pomiarowej lub maksymalną wartość różnicy ciśnień w manometrze różnicowym. Dalszy tok postępowania przy obliczaniu średnicy zwężki  $d$  podany jest w przykładzie obliczeniowym znajdującym się w normie.

#### Metodyka pomiarów za pomocą zwęzek pomiarowych

Zwężki pomiarowe są obecnie najbardziej rozpowszechnionymi przyrządami do pomiaru strumienia masy płynu. Powodem tego jest nie tylko prostota układu pomiarowego, ale również duża dokładność uzyskiwanych wyników pomiarowych. W wielu przypadkach układy zwężkowe stosowane są do sprawdzania i

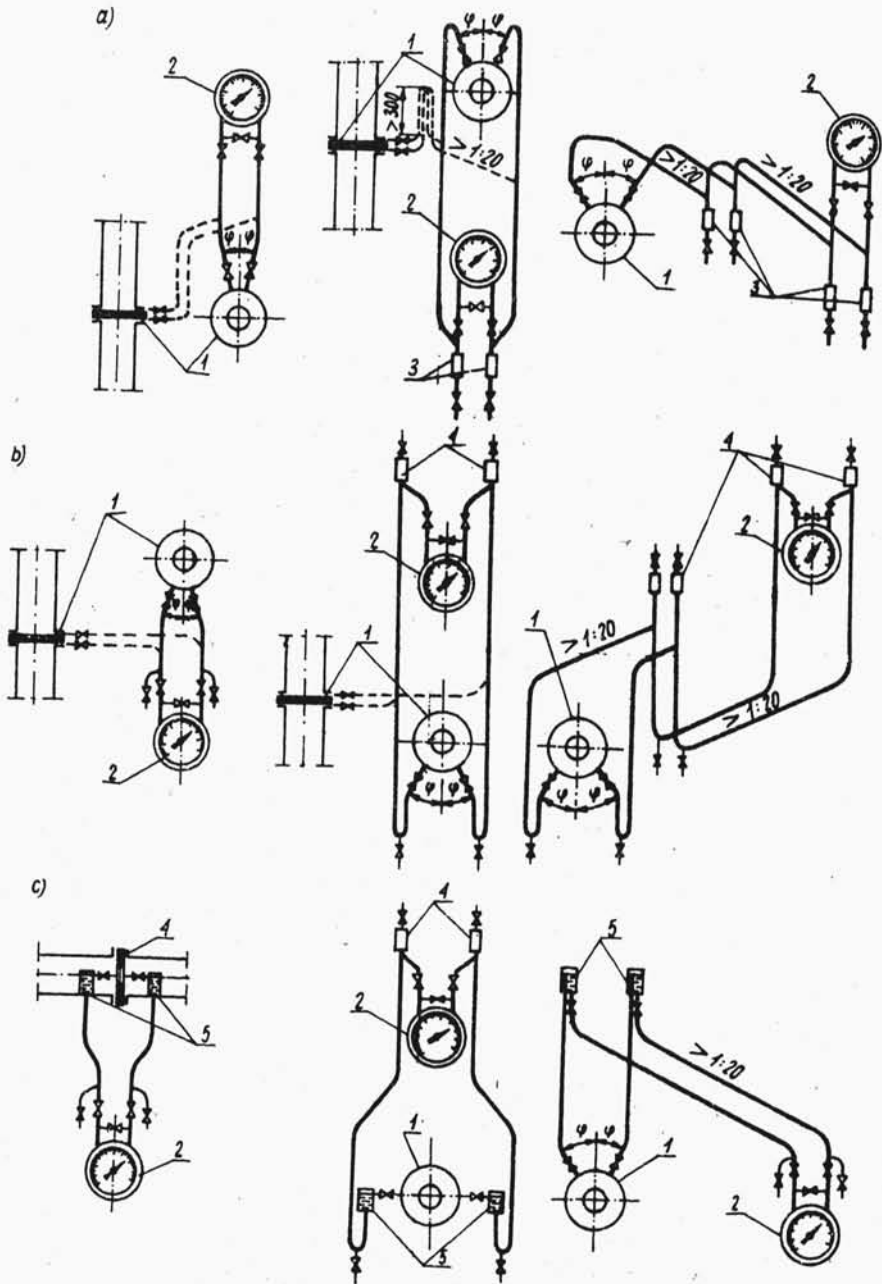
wzorcowania innych przepływomierzy płynu. Należy przy tym pamiętać, że dokładność uzyskiwanych wyników za pomocą zwęzek pomiarowych zależy od wielu czynników. O niektórych, jak: wykonanie prawidłowego projektu zwężki, doboru zwężki najodpowiedniejszej w danych warunkach, poprawnej zabudowy zwężki w rurociągu itd. była już wcześniej mowa. Poza tym jednym z podstawowych pomiarów strumienia masy płynu za pomocą zwęzek jest pomiar ciśnienia różnicowego  $\Delta p$ . Z kolei uzyskiwana dokładność pomiaru ciśnienia zależy nie tylko od klasy zastosowanego przyrządu pomiarowego, ale również prawidłowości wykonania otworów impulsowych dla pomiaru ciśnienia statycznego oraz prawidłowego połączenia otworów impulsowych z króćcami manometru za pomocą przewodów impulsowych. Przykładowe schematy prowadzenia przewodów impulsowych w przypadku pomiaru strumienia masy gazów, cieczy i pary wodnej, pokazano na rys.8.22.

Należy przestrzegać, aby przewody impulsowe były możliwie krótkie, przy czym maksymalna długość każdego z nich nie powinna przekraczać 80 m.

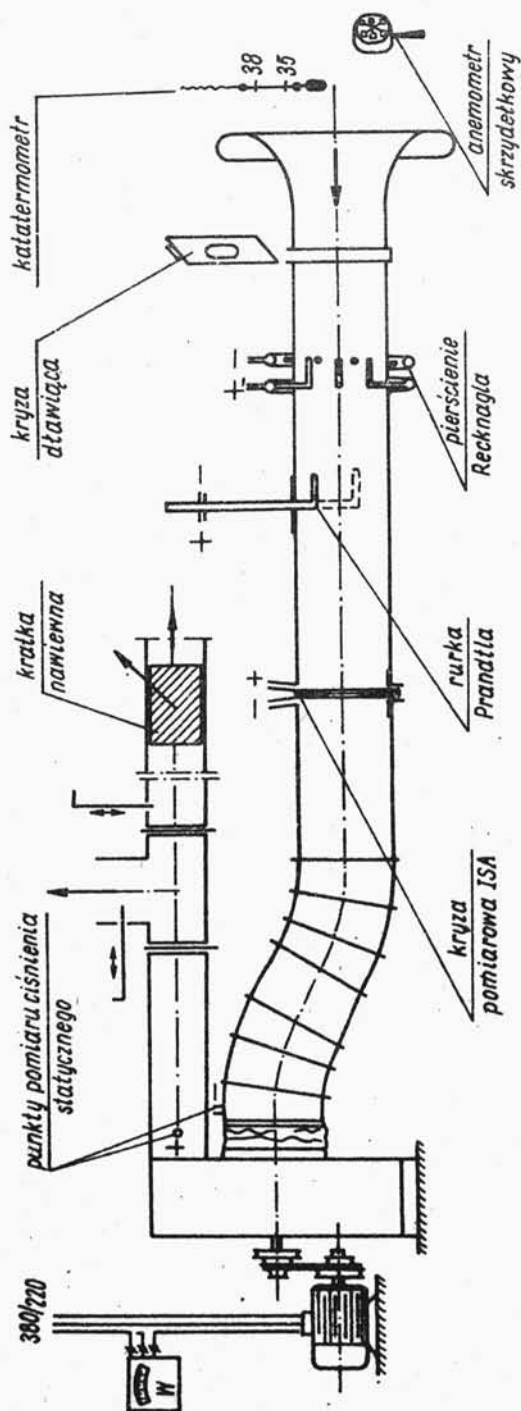
W przypadku pomiaru strumienia masy gazów, przewody impulsowe od zwęzek aż do manometrów powinny być prowadzone na całej długości ku górze, z zachowaniem pochylenia co najmniej 1:20. Układ taki ma zapewnić odpłynięcie wykroplonej pary wodnej do rurociągu. Jeżeli takie prowadzenie przewodów impulsowych jest niemożliwe, wówczas w najniższych punktach trasy należy zainstalować zbiorniczki odwadniające. Kąt  $\varphi$  z płaszczyzną przechodzącą przez oś rurociągu powinien być mniejszy od  $45^{\circ}$ .

W przypadku pomiaru strumienia masy cieczy przewody impulsowe powinny umożliwić swobodny odpływ gazów do rurociągu lub powietrzników.

Przy pomiarze strumienia masy pary wodnej należy instalować naczynia poziome, utrzymujące stały poziom cieczy pośredniej (skroplin) między naczyniami a manometrem różnicowym. Zapewnia to wyeliminowanie wpływu ciśnienia hydrostatycznego na pomiar różnicy ciśnień. Ponadto naczynia poziome zabezpieczają miernik przed wpływem pary wodnej o wysokiej temperaturze przepływającej w rurociągu.



Rys.8.22. Przykładowe schematy prowadzenia przewodów impulsowych dla przykładów: manometr nad zwężką, manometr pod zwężką i manometr w pewnej odległości od zwężki: a) dla gazów, b) dla cieczy, c) dla pary wodnej



Rys. 8.23. Schemat stanowiska do pomiaru natężenia przepływu gazów

Tablica 8.5

Dane wyjściowe oraz sposób obliczenia natężenia przepływu dla kryzy ISA

Lp. <sup>x)</sup>	Wyszczególnienie	Oznacz.	Sposób obliczeń	Wyniki	Jedno- stki
1	2	3	4	5	6
A. Dane oraz wyniki pomiarów					
1.0	Płyn:				
1.1	rodzaj			wilgotne powie- trze	
1.2	podciśnienie przed zwężką	$\Delta p_1$	-	270	Pa
1.3	Temperatura	t		20	°C
1.4	wilgotność			0,5	-
2.0	Rurociąg:				
2.1	materiał			stal węglowa	
2.2	stan powierz.wewn.			ocynkowana	
2.3	średnica wewn.w temp. 20°C	D		298,6	mm
2.4	chropowatość	$\Delta$		0,13	mm
2.5	długość odcinka pomiarowego	$L_1$ $L_2$	dla pom. techn. "	3,58 1,05	m m
3.0	zwężka:				
3.1	rodzaj			kryza ISA	
3.2	średnica otworu w temp. 20°C	-	-	199,5	mm
3.3	materiał zwężki			stal węglowa	
3.4	stan krawędzi wło- towej			stępiąca $r_k =$ = 0,1 mm	
4.0	Manometr:				
4.1	rodzaj			Askania	
4.2	ciecz manometryczna		-	woda destylowana	
4.3	płyn pośredni			powietrze	
4.4	ciśnienie różnicowe	$\Delta p$		328,5	Pa
5.0	Parametry otoczenia:				
5.1	temperatura	$t_o$	-	20	°C
5.2	ciśnienie	$p_b$		98,98	kPa
B. Obliczenie natężenia przepływu					
6.0	Mnożnik poprawk. roz- szerzalności rurociągu	$k_{t_r}$	rys.8.28	1,000	-
7.0	Mnożnik poprawk. roz- szerzalności zwężki	$k_{t_z}$	rys.8.28	1,000	-
x) Liczby porządkowe wg normy PN-65/M53950					

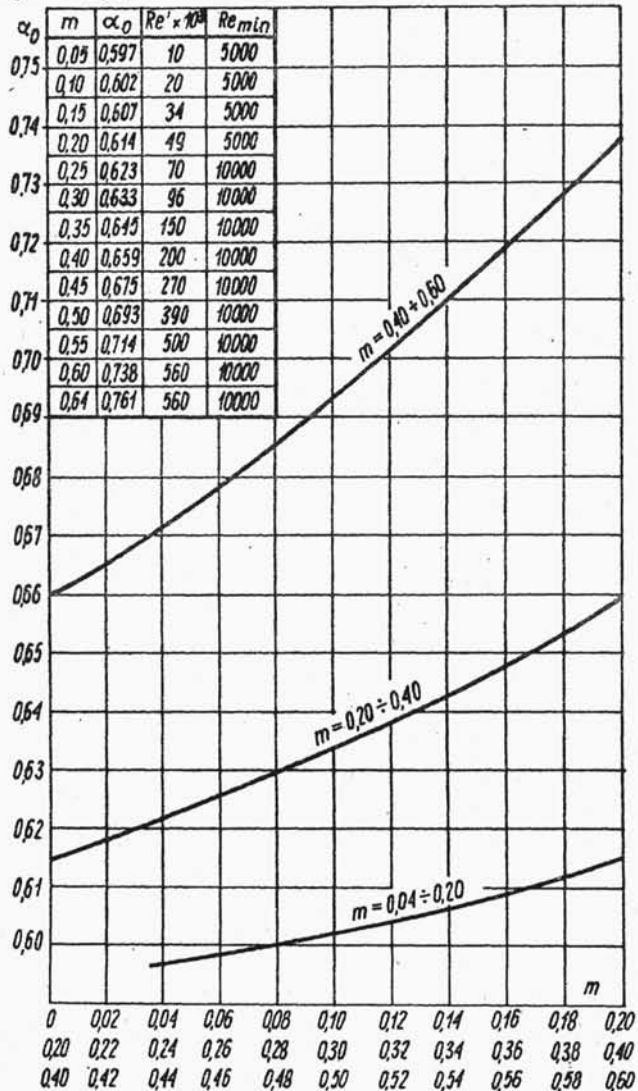
cd. tablicy 8.5

1	2	3	4	5	6
8.0	Moduł zwężki	m	$\left(\frac{d}{D}\right)^2 \cdot \left(\frac{k_{tz}}{k_{tr}}\right)^2$	0,446	-
9.0	Bezwzględne ciśnienie przed zwężką	$p_1$	$p_1 = p_b - \Delta p_1$	98710	Pa
10.0	Objętość właściwa płynu	$v_1$	tabl.wł.pary wg Wuk.	0,858	m <sup>3</sup> /kg
11.0	Dynamiczny współczynnik lepkości płynu	$\eta_1$	-	19,707 · 10 <sup>-6</sup>	Ns/m <sup>2</sup> = kg/m.s
12.0	Wykładnik adiabaty	k	$k = \frac{c_p}{c_v}$	1,4	-
13.0	Ciśnienie różnicowe	$\Delta p$		328,5	Pa
14.0	Stosunek ciśnień	$\frac{\Delta p}{p_1}$	-	0,0033	-
15.0	Liczba ekspansji	$\varepsilon$	tabl. 8.6	0,999	-
16.0	Wielkość pomocnicza	$\frac{Re}{\alpha}$	$\frac{1417 \cdot \varepsilon \cdot m \cdot Dt}{\eta_1 \cdot 10^6} \sqrt{\frac{\Delta p}{v_1}}$	-	-
17.0	Mnożnik poprawkowy lepkości	$k_1$	rys.8.25	1,006	-
18.0	Mnożnik poprawkowy chropowat.	$k_2$	rys.8.26	1,001	-
19.0	Mnożnik poprawk. nieustr. kr.włot.	$k_3$	rys.8.27	1,003	-
20.0	Oblicz.liczba przepł. dla $Re_{max}$	$\alpha_0$	rys.8.24	0,675	-
21.0	Liczba przepływu	$\alpha$	$\alpha = \alpha_0 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$	0,682	-
22.0	Strumień masy powietrza	$\dot{M}$	$0,0039986 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d_t^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{v_1}}$	2142,5	kg/h
23.0	Objętość strumienia masy	$\dot{V}$	$0,0039986 \cdot \varepsilon \cdot \alpha \cdot d_t^2 \sqrt{\Delta p \cdot v_1}$	1837,8	m <sup>3</sup> /h
24.0	Rzeczywista liczba Reynolisa (sprawdzenie)	Re	$\frac{0,354 \cdot \dot{M}}{D_t \cdot \eta_1}$	385600	> $Re_{min}$
25.0	Strata ciśnienia płynu	Z		174,1	Pa

Dla wszystkich układów prowadzenia przewodów impulsowych, promienie głęć przewodów nie powinny być mniejsze od 3  $d_p$  ( $d_p$  - średnica wewnętrzna przewodu impulsowego), przy czym  $d_p = 6 \div 12$  mm.

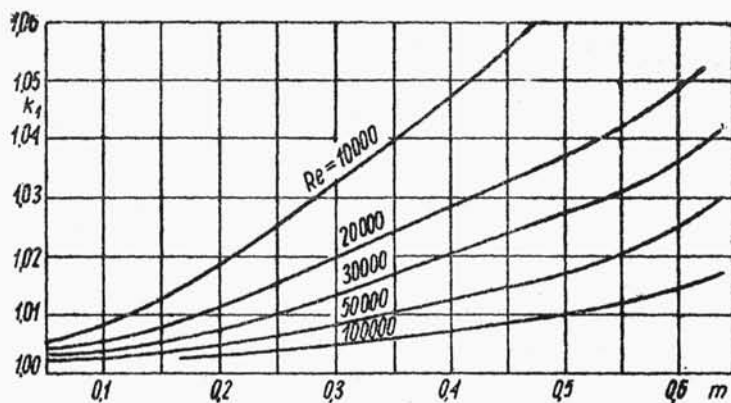
### Przykład

Schemat stanowiska do pomiaru natężenia przepływu gazów pokazano na rys.8.23.

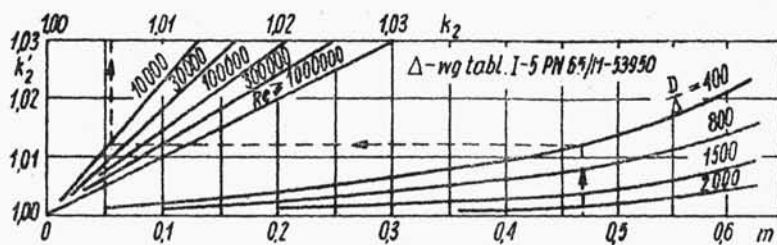


Rys.8.24.  $\alpha_0$  w zależności od  $m$

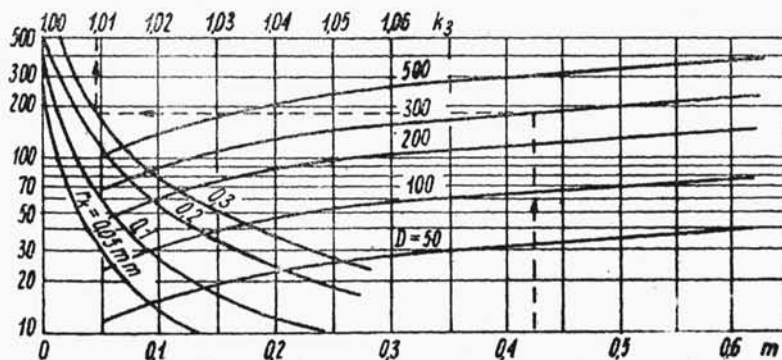




Rys.8.25.  $k_1$  w zależności od  $m$ ,  $Re$



Rys.8.26.  $k_2$  w zależności od  $m$ ,  $D/\Delta$ ,  $Re$

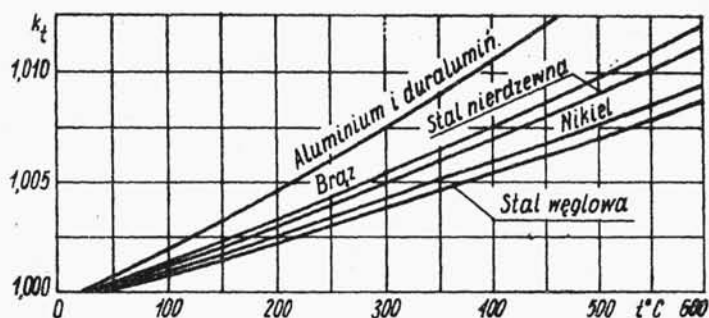


Rys.8.27.  $k_3$  w zależności od  $m$ ,  $D$ ,  $r_k$

Tablica 8.6

Liczba ekspansji  $\varepsilon$  przy pomiarze strumienia masy powietrza ( $k = 1,40$ ) za pomocą  
kryzy ISA z pomiarem przytarczowym

$\Delta p/p_1$	0,00	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,15	0,20	0,25
$m$	$\varepsilon$ dla $k = 1,40$								
0,0000	1,0	0,9930	0,9866	0,9803	0,9742	0,9681	0,9531	0,9381	0,9332
0,3162	1,0	0,9924	0,9854	0,9787	0,9720	0,9654	0,9491	0,9328	0,9166
0,4472	1,0	0,9918	0,9843	0,9770	0,9698	0,9627	0,9450	0,9275	0,9100
0,5477	1,0	0,9912	0,9831	0,9753	0,9676	0,9599	0,9410	0,9222	0,9034
0,6325	1,0	0,9906	0,9820	0,9736	0,9653	0,9572	0,9370	0,9160	0,8968
0,6403	1,0	0,9905	0,9819	0,9734	0,9651	0,9569	0,9366	0,9154	0,8961



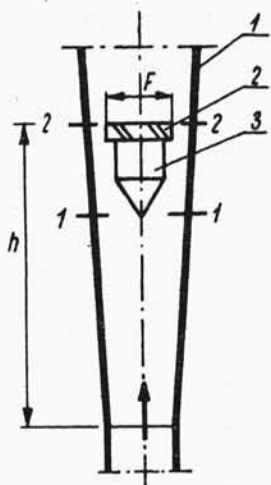
Rys. 8.28. Mnożnik poprawkowy  $k_t$  rozszerzalności cieplnej zwęzek i rurociągu.

Określić natężenie przepływu powietrza wilgotnego przepływającego w kanale wentylacyjnym o kołowym przekroju poprzecznym za pomocą kryzy ISA z pomiarem przytarczowym. Tok obliczeń oraz dane odnośnie kanału wentylacyjnego, kryzy ISA oraz manometru różnicowego podano w tablicy 8.5.

W czasie wykonywania obliczeń należy skorzystać z nomogramów podanych na następujących rysunkach: 8.24, 8.25, 8.26, 8.27 oraz z tablicy 8.6.

#### Przepływomierze o stałym spadku ciśnienia

Najczęściej stosowanymi przyrządami z grupy przepływomierzy o stałym spadku ciśnienia są rotametry. Schemat rotametru pokazano na rys. 8.29. W stożkowej lub parabolicznej zwykle przezroczystej rurze 1 umieszczony jest pływak 2, który unoszony jest przez strumień płynu przepływający przez rotametr. W zależności od strumienia masy płynu, pływak unoszony jest na pewną wysokość  $h$  w kierunku zwiększającej się średnicy rury. W czasie przepływu pływak osiągnie stałą wysokość wówczas, gdy między ścianką rury, a pływakiem o powierzchni  $F_p$ , wytworzy się pierścieniowa szczelina o takiej powierzchni  $f$ , przy której działające na pływak siły zrównoważą się. Często w celu stabilizacji położenia pływaka, nadaje mu się ruch obrotowy wokół osi pionowej za pomocą ukośnych rowków 3 naciętych w górnej części pływaka. W chwili osiągnięcia stanu równowagi na pływak działają następujące



Rys. 8.29. Schemat rotametu

siły: ciężkości, wyporu, parcia na górną i dolną powierzchnię  $F_p$  w wyniku różnicy ciśnień, tarcia na powierzchnię boczną oraz siła parcia wynikająca z ciśnienia dynamicznego przepływającego płynu.

Stan równowagi pływaka można więc zapisać równaniem

$$V_p \rho_p g + p_1 F_p + \varphi F_p \frac{c_1^2}{2} + a c_s^n F_b = \\ = V_p \rho_p g + p_2 F_p,$$

$$p_1 - p_2 = \frac{V_p g(\rho_p - \rho)}{F_p} - \varphi \frac{c_1^2}{2} - a \frac{c_s^n F_b}{F_p}. \quad (8.24)$$

gdzie:

- $p_1$  - ciśnienie statyczne płynu w przekroju 1-1,
- $p_2$  - ciśnienie statyczne płynu w przekroju 2-2,
- $V_p$  - objętość pływaka,
- $\rho_p$  - gęstość materiału pływaka,
- $F_p$  - pole powierzchni największego przekroju pływaka,
- $\varphi$  - współczynnik oporu pływaka,
- $c_1$  - prędkość w przekroju 1-1,
- $a$  - współczynnik tarcia zależny od  $Re$  i chropowatości powierzchni,
- $c_s$  - prędkość średnia w szczelinie o powierzchni  $f$ ,
- $n$  - wykładnik zależny od prędkości płynu,
- $F_b$  - pole powierzchni bocznej pływaka.

Z równania Bernoulliego i równania ciągłości dla przekroju 1-1 i 2-2 otrzymuje się wzór zwężkowy na strumień masy czynnika

$$\dot{m} = \alpha f \sqrt{2 \rho (p_1 - p_2)}, \quad \text{kg/s.}$$

Podstawiając za  $(p_1 - p_2)$  wartość z równania (8.24), otrzymuje się

$$\dot{m} = \alpha f \sqrt{2 \rho_p \frac{g(\rho_p - \rho)}{F_p} - \frac{c_1^2 \rho}{2} - a \frac{c_s^n F_b}{F_p}}$$

lub

$$\dot{m} = \alpha_1 f \sqrt{\frac{2 \rho_p g(\rho_p - \rho)}{F_p}}, \quad \text{kg/s} . \quad (8.25)$$

Można przyjąć, że prędkość średnia  $c_s$  w szczelinie  $f$  jest stała, ponieważ ze wzrostem ilości przepływającego płynu rośnie powierzchnia szczeliny. Z powyższych równań wynika więc, że rotametry są przyrządami o stałym spadku ciśnienia ( $p_1 - p_2 = \text{const}$ ).

Ponieważ pole powierzchni szczeliny  $f$  zmienia się wraz z przemieszczaniem się pływaka wzdłuż stożkowej rury, można przyjąć, że

$$\dot{m} = f(h).$$

W przypadku pomiaru strumienia masy gazu należałoby do równania (8.25) wprowadzić współczynnik ekspansji  $\varepsilon$ . Jeżeli jednak uwzględni się bardzo małe straty ciśnienia gazu w rotametrach (rzędu 0,005 MPa), wówczas można przyjąć  $\varepsilon = 1$ .

Rotametry w odróżnieniu od zwęzek pomiarowych nie mogą być znormalizowane, ponieważ liczba przepływu  $\alpha_1$  zależy od wielu stałych wielkości zwykle niemożliwych do określenia. Dlatego rotametry wymagają indywidualnego wzorcowania dla danego rodzaju płynu o ściśle określonych parametrach. W przypadku zmiany temperatury i ciśnienia płynu, zmienia się charakterystyka przyrządu i skala jego jest bezużyteczna. W takim przypadku rotametr należy wzorcować dla nowych parametrów lub objętość strumienia masy dla aktualnych warunków obliczyć ze wzoru

$$\dot{V} = \dot{V}_0 \sqrt{\frac{(\rho_p - \rho) \rho_0}{(\rho_p - \rho_0) \rho}}, \quad (8.26)$$

gdzie:

$\dot{V}_0, \rho_0$  - objętość strumienia masy i gęstość płynu dla warunków wzorcowania,

$\dot{V}, \rho$  - objętość strumienia masy i gęstość płynu dla aktualnych warunków pomiaru.

Dla rotametrów gazowych można przyjąć, że stosunek

$$\sqrt{\frac{\rho_p - \rho}{\rho_p - \rho_0}} \approx 1,$$

wówczas równanie (8.26) przyjmie bardzo prostą postać

$$\dot{V} = \dot{V}_0 \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}}. \quad (8.27)$$

W czasie stosowania rotametrów należy pamiętać, że są bardzo wrażliwe na zanieczyszczenia różnego rodzaju, które powodują przede wszystkim zmianę gładkości ścianek, a tym samym liczbę przepływu  $\propto \lambda$ . Dlatego należy je często poddawać kontrolnemu wzorcowaniu.

#### 8.3.4. PRYZRZĄDY DO POMIARU PRĘDKOŚCI MIEJSCOWYCH I ŚREDNICH PRĘDKOŚCI PRZEPŁYWAJĄCEGO GAZU

Za pomocą tej grupy przepływomierzy pomiaru strumienia masy gazu dokonuje się w sposób pośredni. Polega on na pomiarze średniej prędkości przepływającego gazu oraz na określeniu pola poprzecznego przekroju przewodu. Jeżeli temperatura przepływającego płynu jest różna od 20°C, wówczas należy mierzyć również (poza temperaturą) bezwzględne ciśnienie statyczne gazu w przewodzie, w celu wyznaczenia jego gęstości. Strumień masy gazu można określić wówczas za pomocą wzoru

$$\dot{m} = \rho c_{\text{sr}} F, \quad \text{kg/s}, \quad (8.28)$$

gdzie:

$\rho$  - gęstość przepływającego gazu,  $\text{kg/m}^3$ ,

$c_{\text{sr}}$  - prędkość średnia gazu,  $\text{m/s}$ ,

$F$  - pole powierzchni poprzecznego przekroju przewodu w miejscu pomiaru prędkości średniej gazu,  $\text{m}^2$ .

Przyrządy do pomiaru prędkości gazu można stosować zarówno dla przewodów o przekroju kołowym, jak i prostokątnym. W przypadku przewodów o przekroju kołowym średnicę  $D$  przewodu należy przyjąć jako średnią arytmetyczną co najmniej z czterech pomiarów. Pomiaru średnic dokonuje się na odcinku  $2D$  przewodu

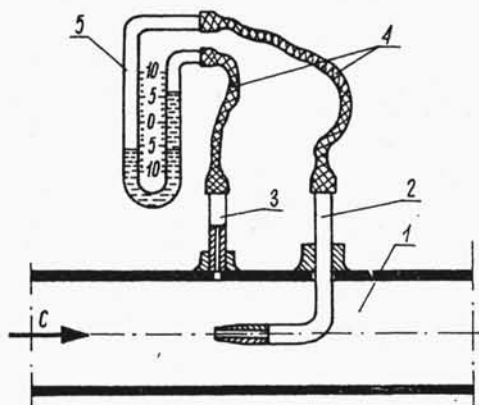
przed i za przekrojem pomiarowym w temperaturze równej w przybliżeniu temperaturze pomiarów strumienia masy gazu, przy czym kolejne pomiary średnic muszą być rozmieszczone względem siebie mniej więcej w równych odległościach kątowych. Owalizacja przewodu na odcinku  $2D$  nie powinna przekraczać  $\pm 1\%$  średnicy rurociągu.

Podobnie należy postąpić w przypadku przewodów o przekroju poprzecznym prostokątnym, przy czym tutaj w celu określenia  $F$  będą zmierzone wewnętrzne długości boków przewodu.

Jeżeli pomiaru średnic lub długości boków przewodu dokonuje się w temperaturze  $20^{\circ}\text{C}$ , a pomiaru strumienia masy gazu w temperaturze różnej od  $20^{\circ}\text{C}$ , wówczas przy obliczaniu  $F$  należy uwzględnić współczynnik rozszerzalności cieplnej przewodu  $k_{tr}$  - wzór (8.20).

#### Rurki spiętrzające

W przyrządach tych wykorzystano zależność pomiędzy ciśnieniem dynamicznym a prędkością przepływu płynu. Można je stosować nie tylko do pomiaru prędkości przepływu gazów, ale również par i cieczy. Schemat wyjaśniający sposób pomiaru prędkości przepływu płynu za pomocą rurek spiętrzających pokazano na rys.8.30. Zastosowano tutaj najprostszą rurkę spiętrzającą, tzw. rurkę Pitota, która umieszczona jest w przewodzie 1 równolegle do kierunku przepływu strugi płynu. Stosując równanie Bernoulliego dla przekroju u wlotu do rurki Pitota i w pewnej odległości, gdzie przepływ jest niezakłócony, otrzymuje się



Rys.8.30. Schemat pomiaru ciśnienia dynamicznego za pomocą rurki Pitota

$$p_s + \frac{c^2 \rho}{2} = p_c. \quad (8.29)$$

Ponieważ prędkość  $u$  wlotu do rurki jest równa 0 (manometr przyłączony do drugiego końca rurki nie pozwala na przepływ płynu), więc na skutek zahamowania strumienia następuje zamiana energii kinetycznej na potencjalną i rurka spiętrza-  
jąca mierzy ciśnienie całkowite czynnika.

Ze wzoru (8.29) wynika, że ciśnienie dynamiczne płynu jest równe

$$p_d = p_c - p_s = \frac{\rho c^2}{2},$$

a stąd

$$c = \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_c - p_s)} = \sqrt{\frac{2}{\rho} p_d}, \quad (8.30)$$

gdzie:

$p_c$  - ciśnienie całkowite czynnika, Pa,

$p_s$  - ciśnienie statyczne, Pa,

$p_d$  - ciśnienie dynamiczne, Pa,

$c$  - prędkość przepływu płynu w miejscu pomiaru, m/s,

$\rho$  - gęstość mierzonego płynu, kg/m<sup>3</sup>.

Na schemacie (rys.8.30) rurka spiętrza-  
jąca 2 mierzy ciśnienie całkowite czynnika, natomiast przewód impulsowy 3 zainsta-  
lowany w ścianie przewodu 1 mierzy ciśnienie statyczne płynu (prę-  
dkość równa 0, ponieważ wektor prędkości panującej w przewo-  
dzie jest równoległy do płaszczyzny otworu wlotowego przewodu  
impulsowego). Manometr różnicowy 5 przyłączony do rurki Pitota  
i rurki impulsowej, za pomocą elastycznych przewodów impulso-  
wych 4, wskazuje bezpośrednio ciśnienie dynamiczne.

Jeżeli przy tym różnica poziomów cieczy manometrycznej wy-  
nosi  $h$ , wówczas ciśnienie dynamiczne jest równe

$$p_d = p_c - p_s = h \rho_n (\rho_1 - \rho), \quad (8.31)$$

gdzie:

$\rho_1$  - gęstość cieczy manometrycznej, kg/m<sup>3</sup>,

$\rho$  - gęstość mierzonego płynu, kg/m<sup>3</sup>,

$\rho_n$  - przyspieszenie ziemskie normalne, m/s<sup>2</sup>.

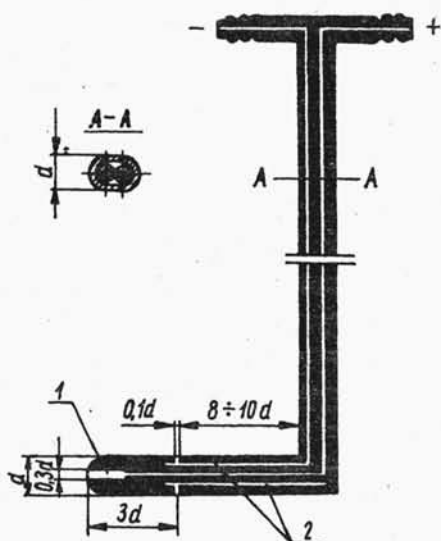


Podstawiając wartość  $p_d$  z równania (8.31) do równania (8.30), otrzymuje się

$$c = \sqrt{\frac{2g_n}{\rho} h(\rho_1 - \rho)}. \quad (8.32)$$

Odchylenie rurki Pitota od kierunku przepływu strumienia o  $\pm 6^\circ$  nie ma wpływu na dokładność pomiaru.

Rurka Pitota okazała się niewygodna w użyciu z powodu poboru impulsów ciśnienia w dwóch różnych punktach. Nieogodność ta została usunięta w tzw. rurce Prandtla, której schemat pokazano na rys.8.31. Jeżeli rurka ta ustawiona jest w rurociągu równolegle do kierunku przepływu strugi, wówczas kanał 1 znajdujący się w osi rurki służy do poboru impulsu ciśnienia całkowitego. Impuls ciśnienia statycznego pobierany jest natomiast za pomocą co najmniej czterech otworków, równomiernie rozmieszczonych na obwodzie rurki lub równomiernej szczeliny połączonej z kanałem 2. Na powierzchni otworków względnie szczeliny, ciśnienie dynamiczne przepływającego płynu jest równe zeru, ponieważ wektor prędkości jest tutaj prostopadły do osi szczeliny lub otworków.



Rys.8.31. Schemat znormalizowanej rurki Prandtla do pomiaru prędkości przepływu płynu

Pomiary ciśnienia całkowitego i statycznego rurkami Prandtla obarczone są jednak pewnymi błędami. Wielkość tych błędów zależy przede wszystkim od konstrukcji rurek; powstają one na skutek zakłócania przepływu płynu przez samą sondę. Wobec tego do równania na obliczanie prędkości należy wprowadzić współczynnik  $\beta$  uwzględniający odchylenia od teoretycznego przepływu płynu, skąd

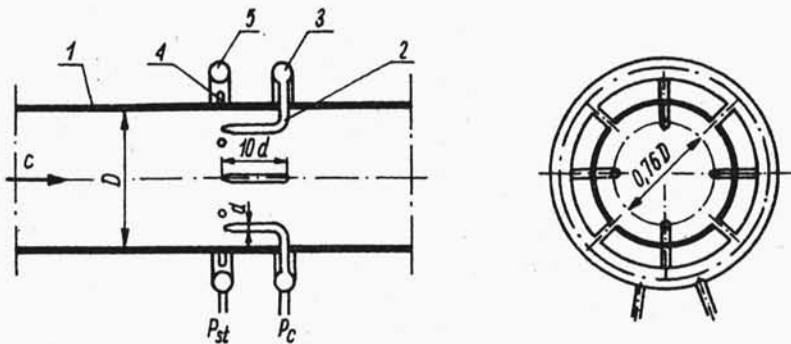
$$c = \beta \sqrt{\frac{2}{\rho} p_d} = \beta \sqrt{\frac{2g_n}{\rho} h(\rho_1 - \rho)}. \quad (8.33)$$

Dla rurek znormalizowanych (rys.8.31) z zakończeniem półkulistym lub stożkowym współczynnik poprawkowy przyjmuje wartość  $\beta = 1$ . Dla innych konstrukcji rurek współczynnik  $\beta$  należy wyznaczać doświadczalnie.

W przypadku bardzo małych prędkości przepływającego płynu (dla  $Re < 700$ ) występuje wpływ lepkości płynu i wówczas  $\beta \neq 1$  i wynosi

$$\beta = 1 + \frac{3}{Re},$$

gdzie:  $Re$  - liczba Reynoldsa odniesiona do zewnętrznej średnicy rurki Prandtla.



Rys.8.32. Schemat pierścienia Recknagla

Stosując układ pomiarowy pokazany na rys.8.32 można bezpośrednio mierzyć średnie ciśnienie dynamiczne, a więc również średnią prędkość przepływającego czynnika. Konstrukcja tzw. pierścienia Recknagla pokazana na rys.8.32 oparta jest na następującym twierdzeniu:

Stosunek średniej prędkości czynnika w badanym przekroju rurociągu do prędkości zmierzonej na dowolnym promieniu tego przekroju jest wielkością stałą i nie zależy od rodzaju przepływającego czynnika, czyli

$$\left( \frac{c_{\text{śr}}}{c_{\text{rzecz}/r}} \right) = \text{const.}$$

Można więc umieścić rurki spiętrzające na takim promieniu rurociągu, aby

$$\left( \frac{c_{sr}}{c_{rzecz}/r} \right) = 1.$$

Wówczas rzeczywiste ciśnienie dynamiczne mierzone na takim promieniu jest średnim ciśnieniem dynamicznym dla danego przekroju, a tym samym obliczona prędkość płynu jest prędkością średnią w danym przekroju.

Jeżeli promień wewnętrzny rurociągu wynosi  $R$ , wówczas iloraz  $c_{sr}/c_{rzecz} = 1$  spełniony jest w odległości  $0,76 R$  od osi rurociągu.

Układ pomiarowy pokazany na rys. 8.32 składa się z czterech równomiernie rozmieszczonych rurek Pitota 2 (do pomiaru ciśnienia całkowitego płynu) połączonych wspólnym kolektorem 3. Otwory wlotowe rurek Pitota umieszczone są na obwodzie  $0,76 D$  średnicy wewnętrznej rury pomiarowej 1. W płaszczyźnie otworów wlotowych rurek Pitota znajdują się również cztery rurki impulsowe do poboru impulsów ciśnienia statycznego 4 połączone drugim kolektorem zbiorczym 5. Rurki Pitota względem rurek do poboru impulsów ciśnienia statycznego przesunięte są o kąt  $45^\circ$ . Zastosowanie czterech rurek Pitota i czterech rurek impulsowych ciśnienia statycznego oraz wprowadzenie impulsów do kolektorów zbiorczych pozwala na uśrednienie wyników pomiarowych. Z kolektorów ciśnienia całkowitego i statycznego impulsy ciśnienia odprowadzane są do przyrządu pomiarowego (manometru).

Zaletą tego układu jest możliwość bezpośredniego pomiaru średniego ciśnienia dynamicznego jako różnicy między średnim ciśnieniem całkowitym i statycznym oraz niezależność wyników pomiarowych od charakteru przepływu płynu wyrażonego liczbą Reynoldsa. Można wykonywać pomiary zarówno dla przepływu burzliwego (nierównomierny rozkład prędkości), jak i laminarnego (paraboliczny rozkład prędkości).