

maksymalnych natężeń przepływu. Na wskazania przepływomierza nie ma wpływu ani lepkość, ani gęstość mierzonej cieczy; z tego względu przepływomierzem można mierzyć natężenie przepływu cieczy agresywnych oraz cieczy o dowolnej konsystencji.

### 8.3. POMIAR OBJĘTOŚCI ORAZ STRUMIENIA MASY GAZÓW

#### 8.3.1. KLASYFIKACJA PRZYRZĄDÓW

Podobnie jak przy pomiarach cieczy przepływomierze gazowe dzielą się na przyrządy do pomiaru objętości (średniego natężenia przepływu) oraz przyrządy do pomiaru strumienia masy gazu (chwilowego natężenia przepływu).

Objętość gazu mierzona jest za pomocą gazomierzy komorowych, które dzielą się na:

- 1) gazomierze miechowe,
- 2) gazomierze bębnowe,
- 3) gazomierze z tłokami wirującymi.

Do pomiaru strumienia masy gazu stosowane są przepływomierze wymienione w punkcie 2 i 3, przy omawianiu pomiaru strumienia masy cieczy, oraz przyrządy do pomiaru prędkości miejscowych i średnich przepływającego gazu. Zalicza się do nich:

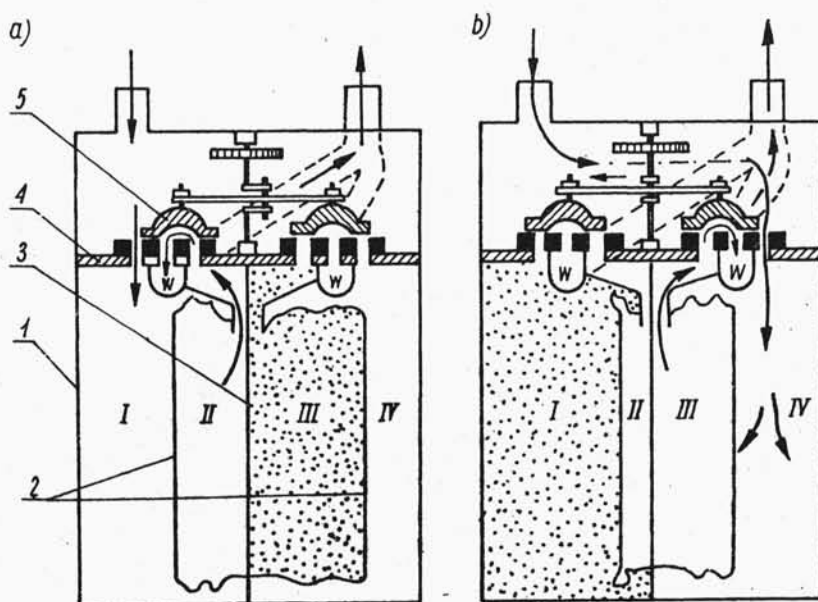
- rurki spiętrzające (stosowane również do pomiaru strumienia masy cieczy),
- anemometry skrzydełkowe,
- termoanemometry,
- katatermometry.

#### 8.3.2. PRZYRZĄDY DO POMIARU OBJĘTOŚCI GAZU

##### Gazomierze miechowe

Gazomierze tego typu stosowane są do pomiaru objętości gazu o niskim ciśnieniu. Powszechnie używane są one do pomiaru ilości gazu dostarczanego dla potrzeb gospodarstw domowych. Zasadniczym elementem gazomierzy miechowych są komory pomiarowe w postaci miechów kolejno napełnianych i opróżnianych gazem. Zmianę kierunku ruchu miechów osiąga się za pomocą rozrządu suwakowego lub zaworowego.

Obecnie stosowane są dwa rodzaje gazomierzy miechowych: z jednym i z dwoma miechami. W gazomierzach jednomiechowych występują pulsacje ciśnienia gazu, które są wynikiem skrajnych położenia miechów (praca dwupołożeniowa). Zjawisko to wyeliminowane jest w gazomierzach dwumiechowych. Zasadę pracy gazomierza dwumiechowego (czterokomorowego) pokazano na rys. 8.12. W blaszanej obudowie 1 znajdują się dwa elastyczne miechy 2, wykonane z polichlorku winylu lub skóry, przedzielone stałą przegrodą 3. W górnej części gazomierza umieszczona jest poprzeczna przegroda 4 z otworami sterowanymi specjalnym urządzeniem suwakowym. Sterowanie układem suwakowym jest tak rozwiązane, że nigdy obie przegrody miechowe nie znajdują się w skrajnych położeniach. Zapewnia to stały przepływ gazu bez pulsacji ciśnienia. Przy położeniu suwaków, pokazanym na rys. 8.12a, komora I jest napełniana, II - opróżniana, III - napełniona, a komora IV opróżniona. Ruch miechów napędza nie tylko rozrząd urządzenia suwakowego, ale również uruchamia mechanizm liczydła sumującego przepływ gazu. Ilość przepływającego gazu mierzona jest w jednostkach objętości w stanie



Rys.8.12. Schemat działania gazomierza dwumiechowego (czterokomorowego)

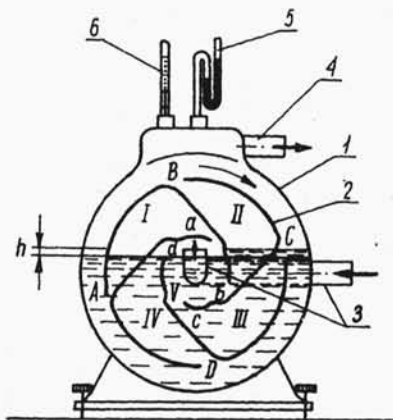
roboczym. Opory przepływu gazu wynoszą  $30 \div 60$  Pa. Błąd pomiaru gazomierzy miechowych wynosi od  $\pm 2$  do  $\pm 3\%$ , w zależności od ilości przepływającego gazu.

#### Gazomierze bębnowe

Znacznie dokładniejszymi przyrządami od gazomierzy miechowych (suchych) są gazomierze bębnowe. Schemat tego gazo-

mierza pokazano na rys.8.13.

W hermetycznej obudowie 1, najczęściej kształtu walcowego, napełnionej cieczą o objętości nieco większej od połowy objętości obudowy, znajduje się bęben pomiarowy 2 podzielony czterema przegrodami na cztery komory pomiarowe I-IV i jedną cylindryczną V. Gaz dopływa do wnętrza komory V przewodem 3 i stąd poprzez szczeliny a, b, c, d, w chwili ich wynurzenia nad poziom cieczy, dopływa do wnętrza komór pomiarowych I-IV. Opróż-



Rys.8.13. Schemat gazomierza bębnowego

nianie komór pomiarowych z gazu następuje przez szczeliny A, B, C, D po wynurzeniu ich spod zwierciadła cieczy. Kształt komór pomiarowych i odpowiednie rozmieszczenie szczelin dopływowych i wypływowych nie dopuszcza do jednoczesnego wynurzenia nad poziom cieczy obydwu szczelin, co zapobiega bezpośredniemu przepływowi gazu z rury dopływowej 3 do odpływowej 4. Stan na rys.8.13 pokazuje napełnianie gazem przez szczelinę "a" komory I, a opóźnianie przez szczelinę B komory II. Obrót bębna pomiarowego wywołany jest różnicą ciśnień gazu na dopływie i odpływie z gazomierza, spowodowaną oporami przepływu gazu przez przyrząd. Miarą tej różnicy ciśnień jest różnica poziomów słupa cieczy h. Obróty bębna przekazywane są na mechanizm liczydła, które sumuje ilość przepływającego gazu.

Jako ciecz wypełniającą przyrząd stosuje się najczęściej wodę destylowaną.

W przypadku gdy zachodzi możliwość zamarzania wody, dodaje się do niej chlorek magnezu lub glicerynę.

Warunkiem poprawnej pracy gazomierzy bębnowych jest utrzymanie określonego i stałego poziomu cieczy w obudowie oraz dokładnie poziome ustawienie przyrządów. Do kontroli poziomu cieczy stosowane są poziomowskazy lub umieszczone na zewnątrz obudowy otwory przelewowe. W celu dokładnego określenia ilości przepływającego gazu w przeliczeniu na umowne warunki fizyczne ( $273,15\text{ K}$  i  $1,01325 \cdot 10^5\text{ Pa}$ ) należy zmierzyć średnie ciśnienie gazu przed gazomierzem w czasie pomiaru oraz średnią temperaturę gazu na odpływie z gazomierza. Do pomiaru tych wielkości gazomierze tego typu wyposażone są w U-rurki 5. i termometry szklane 6.

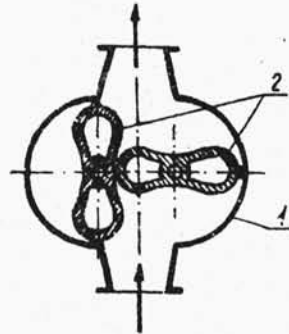
Gazomierze bębnowe są przyrządami dokładnymi, stosowanymi do pomiaru objętości gazu o małym nadciśnieniu. Błąd pomiaru wynosi od  $\pm 0,5$  do  $\pm 1\%$ . Ze względu na zbyt duże wymiary tych przyrządów, rzadko buduje się gazomierze o wydajności powyżej  $6\text{ m}^3/\text{h}$ .

#### Gazomierze z tłokami wirującymi

Przyrządy te stosowane są do pomiaru dużych ilości gazu. Zasadę pracy gazomierzy z tłokami wirującymi pokazano na rys.8.14. Wewnątrz komory pomiarowej 1 obracają się na osiach poziomych dwa wirniki 2. Zasada pracy i budowa tych gazomierzy jest podobna do przepływomierzy z owalnymi wirnikami, przy czym tłoki gazomierzy nie są wyposażone w zazębienia, gdyż wymagałyby to ich smarowania. Osie wirników połączone są ze sobą na zewnątrz komory za pomocą przekładni zębatych. Zapobiega to nadmiernemu tarciu między powierzchniami tłoków, a tym samym szybkiemu zużyciu.

Wpływa to korzystnie na wydłużenie czasu eksploatacji i zwiększenie dokładności wykonywanych pomiarów.

Zaletą tych przyrządów są niewielkie opory przepływu przy jednocześnie dużych natężeniach przepływu gazu, które wynoszą



Rys.8.14. Schemat gazomierza z tłokami wirującymi

od 40 do 10 000 m<sup>3</sup>/h. Błąd pomiaru wynosi od  $\pm 2$  do  $\pm 3\%$ . Dopuszcza się możliwość przeciążenia gazomierza w krótkim czasie o 30% wartości nominalnej.

### 8.3.3. PRZYRZĄDY DO POMIARU STRUMIENIA MASY I OBJĘTOŚCI STRUMIENIA MASY GAZÓW

Zasada działania większości przepływomierzy do pomiaru strumienia masy płynu oparta jest na równaniu bilansu energetycznego strumienia płynu, tj. równaniu Bernoulliego. Odnosi się to do przyrządów działających na zasadzie dławienia, stałego spadku ciśnienia oraz na zasadzie spiętrzenia ciśnienia (rurki spiętrzające).

Przyjmując dla 1 kg masy płynu:

przepływ izochoryczny -  $v_1 = v_2$ ,

przepływ izotermiczny -  $u_1 = u_2$ ,

przepływ poziomy -  $h_1 = h_2$ ,

przepływ adiabatyczny -  $q_{1-2} = 0$ ,

ogólna postać równania Bernoulliego dla strugi płynu w płaszczyźnie ekwipotencjalnej będzie miała następującą postać

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} + \xi \frac{c_2^2}{2}$$

lub

$$p_1 + \frac{c_1^2 \rho}{2} = p_2 + \frac{c_2^2 \rho}{2} + \xi \frac{c_2^2 \rho}{2}, \quad (8.11)$$

gdzie:

$p_1$  - ciśnienie statyczne, Pa,

$\frac{c_1^2 \rho}{2}$  - ciśnienie dynamiczne odpowiadające energii kinetycznej, Pa,

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

$c_1$  - prędkość płynu w przekroju 1 strugi, m/s.

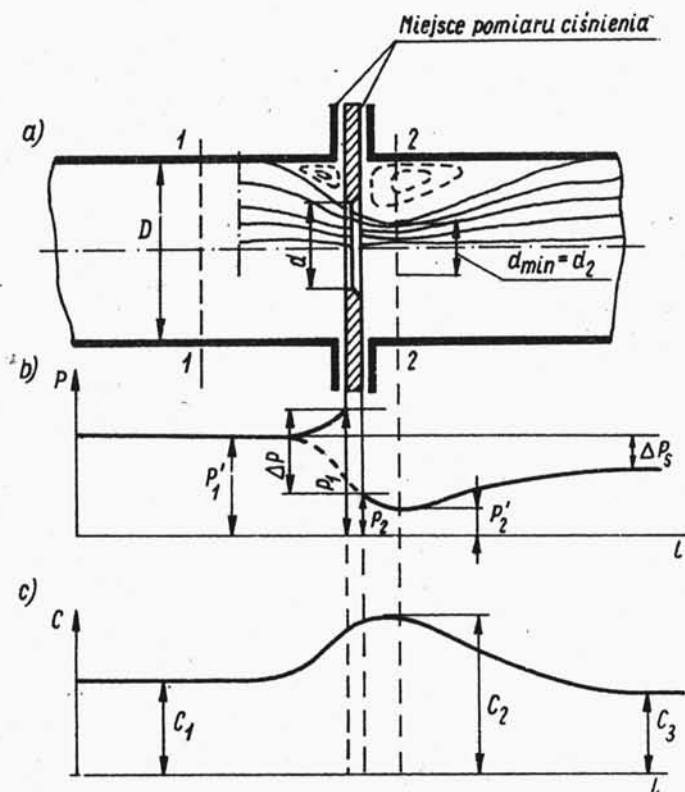
$c_2$  - prędkość płynu w przekroju 2 strugi, m/s.

$\xi$  - współczynnik tarcia na długości 1 i 2.

# Przepływomierze zwężkowe o stałym otworze (zwężki pomiarowe)

Obecnie jedną z najbardziej rozpowszechnionych metod pomiaru strumienia masy płynu jest metoda zwężkowa. Powszechne stosowanie zwęzek wynika z wygody zastosowania tej metody oraz dużej dokładności wykonywanych pomiarów. Metoda zwężkowa pomiaru strumienia masy płynu objęta jest przepisami normalizacyjnymi. W Polsce obowiązuje norma PN-65/M-53950, w której bardzo dokładnie omówione są wszystkie zagadnienia związane z tą metodą.

Na rysunku 8.15 pokazano schemat zainstalowania zwężki w rurociągu, przy czym na rys.8.15b,c pokazano rozkład ciśnień i prędkości na odcinku zainstalowania zwężki.



Rys.8.15. Przepływ płynu oraz rozkład ciśnienia i prędkości w zwężce pomiarowej wbudowanej w rurociąg

nia i prędkości na odcinku zainstalowania zwężki. Charakter przepływu oraz rozkład ciśnienia i prędkości są jednakowe

dla wszystkich rodzajów zwęzek pomiarowych, tj. kryz i dysz. Różnica związana jest tylko z końcową stratą ciśnienia płynu  $\Delta p_g$ . Kształt dyszy zbliżony jest do rozprysku strumienia w zabudowanej zwężce i przepływający płyn prawie nie odrywa się od jej odpowiednio ukształtowanych powierzchni. Stąd znacznie mniejsze końcowe straty ciśnienia  $\Delta p_g$ . Najmniejszą stratą ciśnienia wyróżniają się zwężki Venturiego oraz klasyczne zwężki Venturiego, których odpowiedni kształt uniemożliwia oderwanie od ścianek przepływającego płynu. Jednak w technice pomiarowej najbardziej rozpowszechniona jest kryza. Związane to jest z prostą konstrukcją, łatwym wykonaniem oraz małymi wymiarami kryzy.

Przy zastosowaniu zwęzek pomiarowych należy pamiętać, aby przepływający płyn całkowicie wypełniał przekrój przewodu i zwężki oraz przepływ był ustalony (niepulsujący). Ponadto płyn przy przepływie przez zwężkę pomiarową nie może zmieniać swojej fazy (np. ciecz nie może odparować).

Teoria i podstawowe równania tej metody pomiarowej są jednakowe dla wszystkich typów zwęzek, przy czym inne są niektóre wartości współczynników występujących w tych równaniach, które określa się w sposób doświadczalny. Rodzaje zwęzek pomiarowych normalnych przedstawiono na rys.8.16.

Mierząc spadek ciśnienia  $\Delta p$  w miejscu zaznaczonym na rys.8.15. i 8.16 oraz parametry przepływającego płynu (ciśnienie, temperatura) można obliczyć strumień masy czynnika. Należy przy tym wcześniej określić pole przekroju zwężki i pole przekroju przewodu.

Przyjmując przekrój 1-1 oraz 2-2, jak na rys.8.15, można napisać równanie Bernoulliego

$$\frac{p'_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} = \frac{p'_2}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} + \xi \frac{c_2^2}{2}$$

oraz równanie bilansu masowego w postaci równania ciągłości strugi

$$F c_1 \rho_1 = F_0 c \rho = F_2 c_2 \rho_2 .$$

Przyjmując przepływ izochoryczny  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ , równanie ciągłości można wyrazić zależnością

$$F c_1 = F_0 c = F_2 c_2$$

lub dla zwężek o kołowym przekroju poprzecznym

$$D^2 c_1 = d^2 c = d_2^2 c_2$$

oraz

$$\frac{d^2}{D^2} = \frac{c_1}{c} \quad \text{i} \quad \frac{d_2^2}{d^2} = \frac{c}{c_2}.$$

Wielkość  $F_0/F = d^2/D^2 = m$  - nazywa się modułem zwężki, natomiast  $F_2/F_0 = d_2^2/d^2 = \mu$  - współczynnikiem zwężenia strumienia.

Zjawisko przewężenia strumienia nazywa się kontrakcją dynamiczną.

Na podstawie powyższych równań można wyznaczyć prędkość  $c_2$  i podstawiając tę wartość do wzoru na strumień masy płynu, otrzymuje się zależność

$$\dot{m} = F_2 c_2 \rho = \mu F_0 c_2 \rho =$$

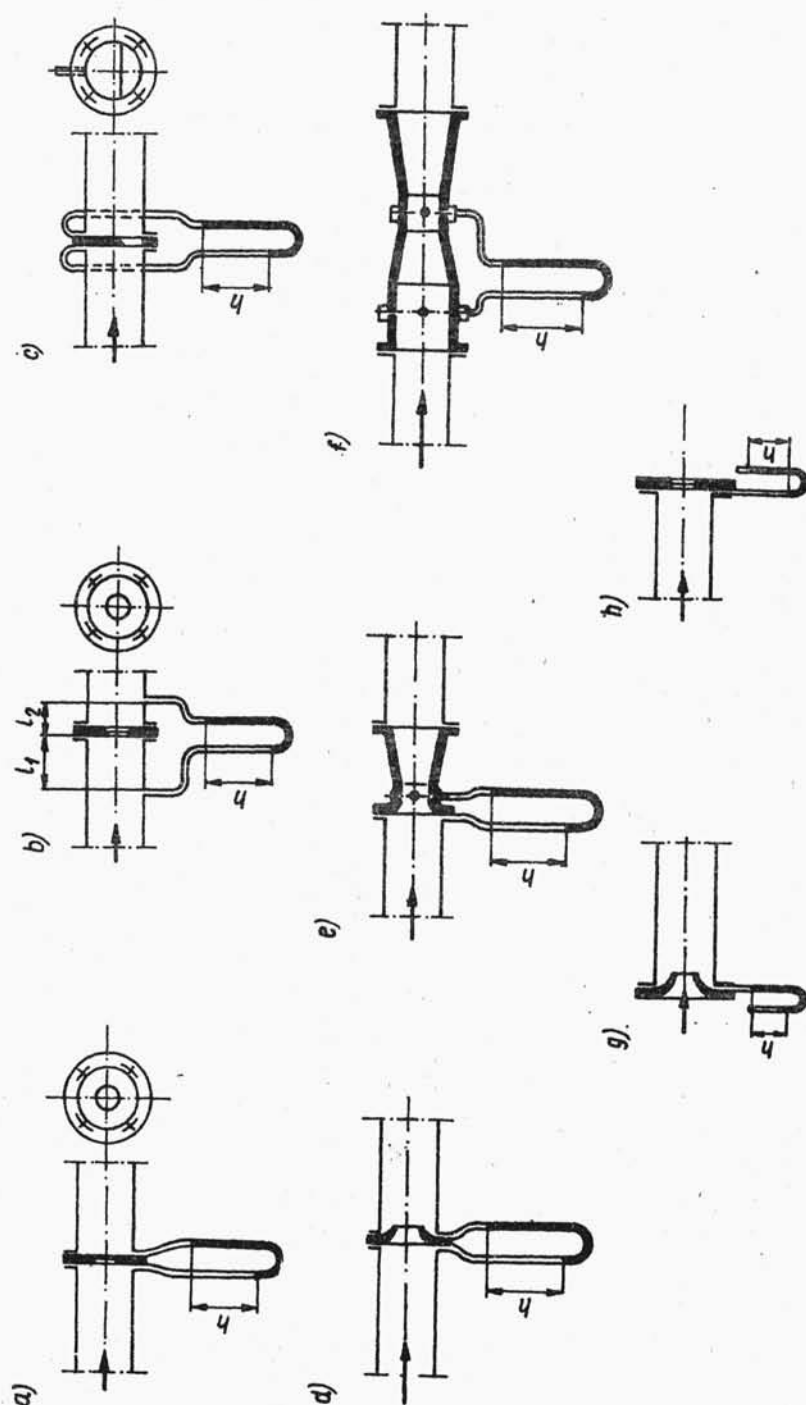
$$= \frac{\mu}{\sqrt{1+\xi-m^2\mu^2}} F_0 \sqrt{2 \rho (p'_1 - p'_2)}, \quad \text{kg/s.}$$

Ciśnienia bezwzględne  $p'_1$  i  $p'_2$  odpowiadają przekrojom 1-1 oraz 2-2. W praktyce najczęściej mierzy się ciśnienia  $p_1$  i  $p_2$  bezpośrednio przy ściankach kryzy. Przyjmując

$$\beta = \frac{p'_1 - p'_2}{p_1 - p_2},$$

wzór na strumień masy cieczy  $\dot{m}$  przyjmie postać





Rys. 8.16. Schematy różnych rodzajów zwęzek pomiarowych: a) kryza ISA z pomiarem przytarczo-  
wym, b) kryza ISA z pomiarem "vena contracta" - odległości  $L_1$  i  $L_2$  są normowane, c) kryza  
segmentowa, d) dysza ISA, e) dysza Venturiego, f) klasyczna zwężka Venturiego, g) dopływowa  
zwężka pomiarowa, h) wypływowa zwężka pomiarowa

$$\dot{m} = \frac{\mu \sqrt{\beta}}{\sqrt{1+\xi \cdot m^2 \mu^2}} F_0 \sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} \quad \text{kg/s} \quad (8.12)$$

oraz

$$\dot{V} = \frac{\mu \sqrt{\beta}}{\sqrt{1+\xi \cdot m^2 \mu^2}} F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)} \quad \text{m}^3/\text{s}. \quad (8.13)$$

Bezwymiarowe wyrażenie

$$\alpha = \frac{\mu \sqrt{\beta}}{\sqrt{1+\xi \cdot m^2 \mu^2}}$$

nazywa się liczbą przepływu.

Liczba przepływu  $\alpha$  uwzględnia:

- nierównomierny rozkład prędkości w przekroju strugi w wyniku lepkości cieczy i tarcia o ścianki przewodu,
- przyjęcie do obliczeń pola przekroju zwężki A, zamiast nieokreślonego najmniejszego przekroju strumienia  $A_2$ ,
- pomiar ciśnienia płynu przy ścianie zamiast w osi przewodu.

Liczby przepływu dla różnych typów zwęzek pomiarowych wyznacza się w sposób doświadczalny.

W przypadku zastosowania metody zwężkowej do pomiaru strumienia masy gazów i par, nie można przyjąć izochoryczności przepływu ( $\rho_1 \neq \rho_2$ ). W wyniku zmiany ciśnienia płynu ściśliwego po przepłynięciu przez zwężkę, zmienia się również jego gęstość. Należy wówczas, oprócz równania Bernoulliego i równania ciągłości strugi, skorzystać z równania adiabaty

$$p_1 \left( \frac{1}{\rho_1} \right)^k = p_2 \left( \frac{1}{\rho_2} \right)^k$$

lub

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}},$$

przyjmując adiabaticzny przepływ gazów i par przez zwężkę (czas przepływu bardzo krótki).

Ostatecznie po przekształceniach otrzymuje się podstawowe wzory dla zwężkowej metody pomiaru strumienia masy i objętości strumienia masy

$$\dot{m} = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{2 \rho_1 (p_1 - p_2)}, \quad \text{kg/s}, \quad (8.14)$$

$$\dot{V} = \alpha \varepsilon F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho_1} (p_1 - p_2)}, \quad \text{m}^3/\text{s}, \quad (8.15)$$

gdzie:

$\varepsilon$  - współczynnik uwzględniający zmianę gęstości płynu, zwany liczbą ekspansji,

$\rho_1$  - gęstość płynu przed zwężką pomiarową,  $\text{kg/m}^3$ .

Dla przewodów o kołowym przekroju poprzecznym wzory powyższe przyjmą postać

$$\dot{M} = 0,0039986 \alpha \varepsilon d_t^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{v_1}}, \quad \text{kg/h}^1), \quad (8.16)$$

$$\dot{V} = 0,0039986 \alpha \varepsilon d_t^2 \sqrt{\Delta p v_1}, \quad \text{m}^3/\text{h}^2). \quad (8.17)$$

Wyprowadzone wzory: (8.14), (8.15), (8.16), (8.17) są zależnościami ogólnymi, przy czym dla cieczy liczba ekspansji  $\varepsilon = 1$ .

W przypadku płynów ściśliwych liczbę ekspansji wyznaczono doświadczalnie, określając ją ogólną zależnością

$$\varepsilon = f \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}}, m \right].$$

Podobnie liczbę przepływu  $\alpha$  wyznaczono na drodze doświadczalnej na podstawie ogólnej zależności

$$\alpha = f(\text{Re}, m),$$

dla kilku rodzajów zwęzek o ściśle określonych kształtach i proporcjach.

1),2) Wzory w powyższej postaci podane są w PN-65/M-53950.

Z teorii podobieństwa wynika, że jeśli strumienie są geometrycznie podobne, to przy równych liczbach Reynoldsa tych strumieni, liczby przepływu są równe. Wykonując więc zwężki z zachowaniem podobieństwa geometrycznego i hydrodynamicznego do zwęzek znormalizowanych, można wartości liczb przepływu i ekspansji określić z normy PN-65/M-53950.

W ogólnym przypadku, dla wszystkich rodzajów zwęzek liczba przepływu zależy od rodzaju zwężki, jej modułu, liczby Reynoldsa, chropowatości rurociągu oraz dla kryz od nieostrości krawędzi wlotu płynu. Można ją wyrazić wzorem

$$\alpha = k_1 k_2 k_3 \alpha_0, \quad (8.18)$$

gdzie:

$\alpha_0$  - obliczeniowa liczba przepływu odpowiadająca rzeczywistej wartości  $\alpha$  wyznaczonej w gładkim rurociągu dla największej liczby Reynoldsa  $Re_{max}$ ,

$Re_{max}$  określa górną granicę przeprowadzonych badań,

$k_1$  - mnożnik poprawkowy lepkości płynu uwzględniający wpływ liczby Reynoldsa na wartość  $\alpha$ ,

$k_2$  - mnożnik poprawkowy chropowatości uwzględniający wpływ chropowatości powierzchni wewnętrznej rurociągu; dla rur gładkich jest równy jedności,

$k_3$  - mnożnik poprawkowy uwzględniający nieostrość krawędzi wlotowej kryz; dla pozostałych zwęzek mnożnik ten jest równy jedności.

Wzór (8.18) nie dotyczy kryz ISA z pomiarem "vena contracta" oraz klasycznych zwęzek Venturiego. Dla tych zwęzek sposób określania liczby przepływu podany jest w załączniku 3 i 6 normy PN-65/M-53950.

W przypadku gdy temperatura przepływającego płynu jest różna od 20°C, wówczas w obliczeniach należy uwzględnić zarówno zmianę średnicy zwężki, jak i rurociągu.

Jeżeli liniowe współczynniki rozszerzalności cieplnej materiałów, z których wykonana jest zwężka i rurociąg wynoszą:  $\alpha_{tz}$  i  $\alpha_{tr}$ , wówczas rzeczywiste średnice zwężki i rurociągu można obliczyć z następujących równań

$$d_t = d_{20} k_{tz} = d_{20} [1 + \alpha_{tz} (t - 20)], \quad (8.19)$$

$$D_t = D_{20} k_{tr} = D_{20} \left[ 1 + \alpha_{tr} (t - 20) \right]. \quad (8.20)$$

Liczbowe wartości mnożników poprawkowych rozszerzalności cieplnej materiałów  $k_{tz}$  i  $k_{tr}$  można odczytać z nomogramu zawartego w normie PN-65/M-53950 lub z rys.8.28.

#### Normalne zwężki pomiarowe

Schematy normalnych zwęzek pomiarowych przedstawiono na rys.8.16. Dla wszystkich typów zwęzek normalnych wartości liczb przepływu są określone w szerokim zakresie liczb Reynoldsa (pomiędzy  $Re_{max}$  i  $Re_{min}$ ). Dlatego też stosowanie tych zwęzek nie wymaga uprzedniego ich wzorcowania. Zwężki pomiarowe normalne mogą być stosowane do pomiarów dokładnych i wówczas w normie pomiary te oznaczone są przez I oraz pomiarów technicznych II. W przypadku wykonywania dokładnych pomiarów należy bardzo rygorystycznie przestrzegać wymagań zawartych w normie. Należy tutaj zwrócić uwagę na prawidłowe zaprojektowanie zwęzek pomiarowych oraz prawidłową ich zabudowę w rurociągu.

Na określonej długości przed i za zwężką przepływ musi odbywać się bez zaburzeń. Wymagana długość prostych odcinków - dla pomiarów dokładnych i technicznych - w zależności od rodzaju przeszkody powodującej zaburzenia oraz od rodzaju zwężki i jej modułu, podana jest w normie PN-65/M-53950.

Zakres pomiarów dokładnych powinien się mieścić w przedziale wartości strumieni masy obliczonych z najmniejszych oraz największych liczb Reynoldsa ( $Re_{min}$  i  $Re_{max}$ ).

Do dokładnych pomiarów należy stosować:

- kryzy ISA z pomiarem "vena contracta" (rys.8.16b),
- kryzy ISA z pomiarem przytarczowym (rys.8.16a),
- dysze ISA (rys.8.16d).

Jeśli konieczne jest ograniczenie strat ciśnienia płynu, dopuszcza się stosowanie dysz Venturiego (rys.8.16e) oraz klasycznych zwęzek Venturiego (rys.8.16f).

W przypadku wykonywania pomiarów technicznych za pomocą zwęzek pomiarowych, dopuszcza się złagodzenie niektórych wymagań. Powoduje to zmniejszenie dokładności wykonywanych pomiarów. Pomiary te można przeprowadzać pomiędzy tzw. graniczną

liczbą Reynoldsa  $Re'$  i nieograniczoną (poza zwężkami Venturiego) górną granicą przedziału pomiarowego. Powyżej granicznej liczby Reynoldsa różnica pomiędzy rzeczywistą wartością liczby przepływu, a obliczoną nie przekracza 0,5%.

Najczęściej stosowaną i najprostszą zwężką jest kryza pomiarowa (rys.8.16a,b,c,h). Powszechne stosowanie kryz do pomiaru strumienia masy wynika z łatwości ich wykonania, montażu i demontażu przy jednocześnie dużej dokładności wykonywanych pomiarów. Do pomiarów można stosować kryzy ISA z pomiarem przytarczowym ze szczelinowym i komorowym pomiarem ciśnienia statycznego oraz kryzy ISA z pomiarem "vena contracta". Kryzy ISA z pomiarem przytarczowym można stosować dla rurociągów o średnicach  $D \geq 50$  mm, przy modułach  $0,05 \leq m \leq 0,64$ , natomiast z pomiarem "vena contracta" również dla  $D \geq 50$  mm przy  $0,01 \leq m \leq 0,64$ . Dla kryz z pomiarem "vena contracta" wymagany jest gładki rurociąg o wartości  $D/\Delta \geq 1000$  ( $\Delta$  - chropowatość powierzchni wewnętrznej rurociągu). Kryzy ISA mogą być stosowane wyłącznie dla płynów czystych, bez zawiesin ciał stałych. Do pomiaru natężenia przepływu płynów nieznacznie zanieczyszczonych ciałami stałymi oraz gazów okresowo zawilgoconych stosuje się kryzy segmentowe (rys.8.16c). Wadą kryz pomiarowych jest duża strata ciśnienia przepływającego płynu (największa spośród stosowanych zwęzek).

Takich wad nie ma dysza ISA, która również charakteryzuje się zwartą budową (rys.8.16d). Pozwala ona osiągnąć pomiar tej samej dokładności co kryzy ISA, ale przy stratach ciśnienia płynu o 15 ÷ 80% mniejszych dla takich samych modułów zwężki ( $0,01 \leq m \leq 0,64$ ) i średnic przewodów  $D \geq 50$  mm. Zaletą ich jest również mniejsza wrażliwość na zanieczyszczenia i zaburzenia przepływającego płynu.

Najmniejszymi stratami ciśnienia przepływającego płynu charakteryzują się dysze Venturiego i klasyczne zwężki Venturiego (strata ciśnienia mniejsza o około 70% w porównaniu z dyszą ISA przy tych samych modułach). W przypadku zastosowania zwęzek Venturiego do pomiaru natężenia przepływu płynu błąd jest jednak 3 ÷ 4-krotnie większy niż dla kryz i dysz ISA. Mniejsze błędy pomiaru powstają przy zastosowaniu klasycznych zwęzek Venturiego. Dlatego też zamiast dysz Ven-

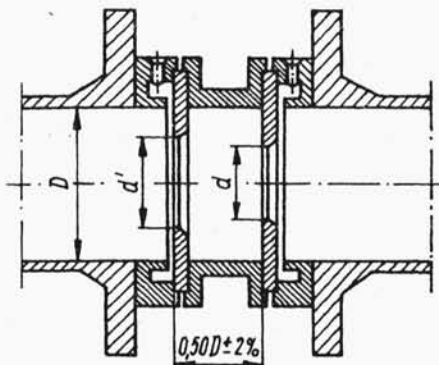
turiego należy projektować znacznie prostsze i dokładniejsze klasyczne zwężki Venturiego. Zaletą klasycznych zwęzek Venturiego - w porównaniu z kryzami, dyszą ISA i dyszą Venturiego - jest wymagany 2 ÷ 5 razy krótszy odcinek pomiarowy. Dysze Venturiego można stosować dla średnic  $D \geq 65$  mm, przy modułach  $0,10 \leq m \leq 0,60$ , natomiast klasyczne zwężki Venturiego dla  $D \geq 100$  mm, przy modułach  $0,16 \leq m \leq 0,56$ .

#### Specjalne zwężki pomiarowe

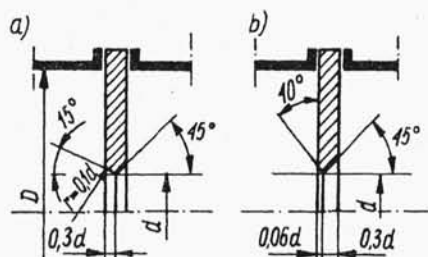
Znormalizowane zwężki pomiarowe można stosować dla technicznych pomiarów przy liczbach Reynoldsa na ogół większych od 10 000 (dla pomiarów dokładnych  $Re$  wyższe) i średnicy rurociągów  $D \geq 50$  mm. Często zachodzi konieczność pomiaru i regulacji strumienia masy płynu w rurociągach o średnicy mniejszej od 50 mm oraz cieczy o dużej lepkości, gazów o wysokiej temperaturze czy mieszanin gazowych o dużej zawartości wodoru. W tych wszystkich szczególnych przypadkach należy stosować wyłącznie specjalne zwężki pomiarowe. Spośród wielu typów specjalnych zwęzek pomiarowych najlepsze wyniki osiąga się przy zastosowaniu kryz podwójnych, kryz wielokrotnych, zwężki kwadrantowej i kryzy z podwójnym skosem. Schemat kryzy podwójnej pokazano na rys.8.17. Po wielu przeprowadzonych badaniach ustalono, że długości prostych odcinków pomiarowych dla kryz podwójnych są o około 10% krótsze niż dla kryz normalnych. Moduł kryzy wstępnej określa się na podstawie wykresów lub tablic zamieszczonych w normie, w zależności od modułu  $m$  głównej kryzy pomiarowej. Zadaniem kryzy wstępnej o średnicy  $d' > d$  jest skierowanie strumienia płynu na kryzę podstawową. Układ tych kryz tworzy jak gdyby dyszę z ciekłą ścianką, sprzyjającą powstawaniu ruchu turbulentnego. Kryzy podwójne można stosować dla zakresu liczby Reynoldsa 2000 ÷ 350 000, a więc dla znacznie niższych wartości  $Re$  niż w przypadku zwęzek znormalizowanych. Straty ciśnienia płynu są mniejsze niż dla pojedynczych kryz, a większe niż dla dysz normalnych. Przy wyznaczaniu strumienia masy płynu korzysta się z wzorów podanych dla zwęzek znormalizowanych, przy czym do obliczeń przyjmuje się średnicę kryzy podstawowej. Należy również dodać, że liczba przepływu nieznacznie zależy od chropowatości rurociągu.



Dodanie trzeciej kryzy do kryzy podwójnej - kryza potrójna - zwiększa zakres stałości liczby przepływu  $\alpha$  od  $Re = 400$ . Natomiast dodanie czwartej i piątej kryzy - kryza po-



Rys.8.17. Schemat kryzy podwójnej



Rys.8.18. Kryzy z podwójnym skosem: a) z długim konfuzorem wlotu, b) z krótkim konfuzorem wlotu

czwórna i pięciokrotna - pozwala utrzymać stałość  $\alpha$  od  $Re = 340$  i  $Re = 260$ . Poszczególne kryzy oddalone są od siebie o  $0,5D$ , przy czym średnice ich zmniejszają się w kierunku przepływu płynu. Po połączeniu wszystkich otworów kryz w przekroju podłużnym liniami ciągłymi, otrzyma się profil zbliżony do przekroju podłużnego dyszy.

Zwężki kwadrantowe zapewniają stałość liczby przepływu dla  $Re = 200 \div 200\,000$ , przy module  $0,05 \leq m \leq 0,49$ . Schematy tych zwęzek podane są w normie.

Na rysunku 8.18 pokazano schemat kryzy z podwójnym skosem, przy czym na rys.8.18a przedstawiono kryzę z długim konfuzorem wlotu, a na 10.18b z krótkim konfuzorem wlotu. Kryzę z długim konfuzorem można stosować dla  $Re = 3000 \div 100\,000$ , przy  $0,16 \leq m \leq 0,25$ . Dolna granica zakresu dla kryzy z krótkim konfuzorem wlotu zwiększa się i wynosi  $Re = 20 \div 30\,000$  - przy  $m = 0,06 \div 0,37$ .

Ze względu na niezbyt dokładne przebadanie zwęzek specjalnych, wartość liczby przepływu powinno się określać metodą indywidualnego wzorcowania przy określonych wartościach liczb Reynoldsa. Wzorcowanie zaleca się przeprowadzać razem



z odcinkiem rury, który będzie zabudowany w rurociągu. Ten sposób wzorcowania ujmuje również wpływ na wartość  $\alpha$  odcinka rury w bezpośrednim sąsiedztwie zwężki.

### Krzyży prostokątne

W inżynierii sanitarnej instalacje wentylacyjne i klimatyzacyjne najczęściej wykonuje się o prostokątnym przekroju poprzecznym. Do pomiaru strumienia masy powietrza można wówczas zastosować kryży prostokątne, spełniające warunek

$$\frac{A}{B} = \frac{a}{b},$$

gdzie:

A, B - wewnętrzne wymiary kanału wentylacyjnego, mm,

a, b - szerokość i wysokość kryży o przekroju prostokątnym, mm.

Schemat kryży prostokątnej pokazano na rys.8.19.

Moduł zwężki prostokątnej należy policzyć ze wzoru

$$m = \frac{f_1}{F_1} = \frac{a b}{A B}, \quad (8.21)$$

gdzie:

$f_1$  - pole powierzchni otworu kryży,

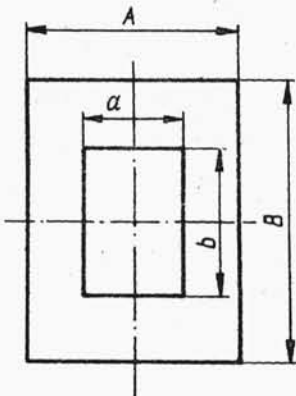
$$f_1 = ab,$$

$F_1$  - pole powierzchni poprzecznego przekroju kanału wentylacyjnego w miejscu zainstalowania kryży,  $F_1 = AB$ .

Na podstawie podobieństwa geometrycznego przekrojów kanału i zwężki można obliczyć wymiary kryży prostokątnej ze wzorów

$$a = A \sqrt{m}, \quad (8.22)$$

$$b = B \sqrt{m}. \quad (8.23)$$



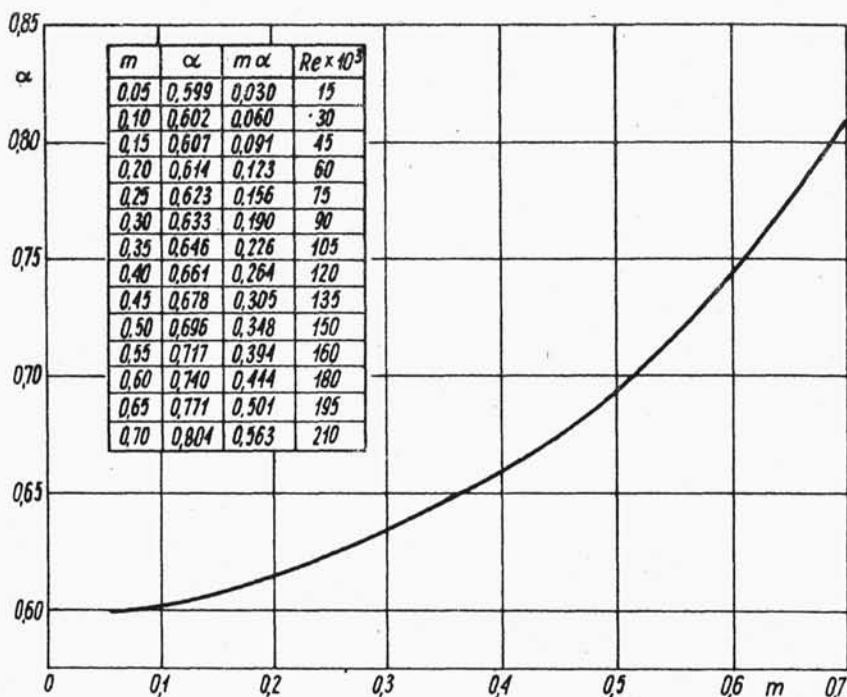
Rys.8.19. Kryża prostokątna

Wzory obliczeniowe dla kryż prostokątnych podane są w tablicy 8.3, przy czym oznaczenia stosowane we wzorach i jednostki miar w układzie międzynarodowym i technicznym wyszczególnione są w tablicy 8.4.

Tablica 8.3

Podstawowe wzory obliczeniowe dla kryz prostokątnych

Wyszczególnienie			Ozna- czenia	Wzory dla układu międzynarodowego SJ
Obliczenie strumienia masy płynu	Strumień masy płynu		$\dot{m}$	$0,0050918 \alpha \cdot \varepsilon \cdot f_1 \sqrt{\frac{\Delta p}{v_1}}$
				$0,0050918 \alpha \cdot \varepsilon \cdot m \cdot F_1 \sqrt{\frac{\Delta p}{v_1}}$
	Objętość strumienia masy płynu		$\dot{V}$	$0,0050918 \alpha \cdot \varepsilon \cdot f_1 \sqrt{\Delta p \cdot v_1}$
				$0,0050918 \alpha \cdot \varepsilon \cdot m \cdot F_1 \sqrt{\Delta p \cdot v_1}$
	Przeliczenie strumienia masy i objętości strumienia masy z warunków obliczeniowych na rzeczywiste		$\dot{m}$	$\dot{m}_{rz} = \dot{m}_o \sqrt{\frac{v_o}{v_1}}$
			$\dot{V}$	$\dot{V}_{rz} = \dot{V}_o \sqrt{\frac{v_1}{v_o}}$
	Wielkości pomocnicze	moduł kryzy	$m$	$m = \frac{f}{F} = \frac{a \cdot b}{A \cdot B}$
dynamiczny współczynnik lepkości		$\eta_1$	$v_1 \cdot \rho$	
objętość właściwa		$v$	$\frac{1}{\rho}$	
Obliczenie otworu zwężki	Otwór zwężki		$a \cdot b$	$a = A \sqrt{m}; b = B \sqrt{m}$
	Wielkości pomocnicze	dla wyznaczenia $m$	$m$	$\frac{196,4 \cdot \dot{m}}{\varepsilon \cdot F_1} \sqrt{\frac{v_1}{\Delta p}}$
				$\frac{196,4 \cdot \dot{V}}{\varepsilon \cdot F_1 \sqrt{\Delta p \cdot v_1}}$
		liczba Reynoldsa	$Re$	$\frac{C_o \cdot Dr_1}{1000 v_1} = \frac{0,354 \cdot \dot{V}}{Dr_1 \cdot v_1}$
			$\frac{0,354 \cdot \dot{m}}{Dr_1 \cdot \eta_1}$	
	średnica równoważna	$Dr_1$	$\frac{4F}{S} = \frac{4A \cdot B}{2(A+B)} = \frac{2A \cdot B}{A+B}$	
Dolna granica zakresu pomiarowego			$\dot{m}$	$\frac{Dr_1 \cdot Re' \cdot \eta_1}{0,354}$
			$\dot{V}$	$\frac{Dr_1 \cdot Re' \cdot v_1}{0,354}$



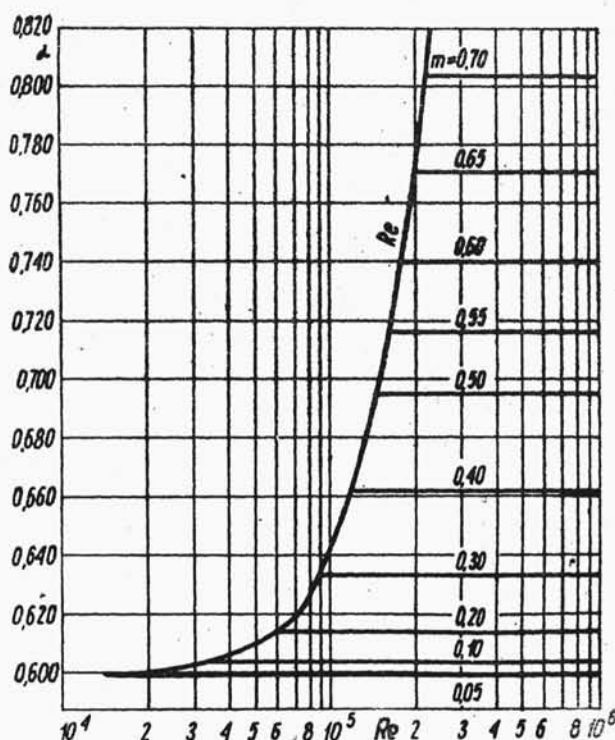
Rys.8.20. Zmienność liczby przepływu  $\alpha$  w zależności od  $m$

Na rysunku 8.20 pokazano zmienność liczby przepływu w zależności od  $m$  i  $m\alpha$ , natomiast na rys.8.21 wpływ modułu zwężki i liczby Reynoldsa na liczbę przepływu  $\alpha$ .

Tablica 8.4

Oznaczenia wielkości i jednostki miar stosowane we wzorach dla kryz prostokątnych

Oznaczenia	A	B	a	b	f	F	$\Delta p$	$\dot{M}$	$\dot{V}$	$v_1$	$\eta_1$	$\varphi$	$v_1$	$Dr_1$	$\psi$
Jednostki miar stosowane we wzorach obliczeniowych dla układu SI	mm	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	Pa	kg/h	m <sup>3</sup> /h	m <sup>2</sup> /s	kg/m.s	kg/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /kg	mm	%



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  $D$ ,