

## POMIAR STRUMIENIA PŁYNU ZA POMOCĄ ZWĘŻEK.

Strumieniem płynu nazywamy ilość płynu przepływającą przez przekrój kanału w jednostce czasu. Jeżeli ilość płynu jest wyrażona w jednostkach masy, to mówimy o strumieniu masy  $q_M$  w  $[kg/s]$ ; gdy ilość płynu jest wyrażona przez jego objętość, to mamy strumień objętości  $q_V$ , a wymiarem jest  $[m^3/s]$ .

Przepływ płynu w zamkniętych przewodach ma charakter przestrzenny, co jest przyczyną wielu trudności przy jego pomiarze. Na określenie wielkości przepływu ma wpływ szereg parametrów fizycznych, takich jak: ciśnienie, temperatura, lepkość oraz gęstość płynu. Z parametrów tych, temperaturę i ciśnienie mierzy się bezpośrednio w przewodzie i na tej podstawie wyznacza się lepkość i gęstość ośrodka.

**Większość metod pomiaru strumienia płynu ma za podstawę jednowymiarowe równanie ciągłości w postaci:**

$$q_V = A \cdot c_{sr} \quad \text{lub} \quad q_M = A \cdot c_{sr} \cdot \rho$$

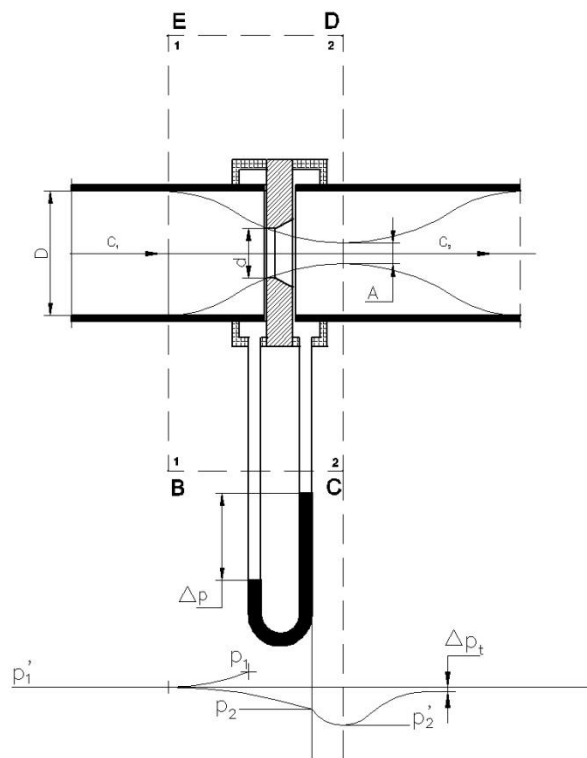
gdzie:  $q_V$  – strumień objętości,  
 $q_M$  – strumień masy,  $\rho$  – gęstość płynu w warunkach przepływu  $A$  – pole przekroju poprzecznego przewodu,  
 $c$  – prędkość średnia przepływu płynu przez przekrój  $A$ .

**Najbardziej rozpowszechnioną metodą pomiaru strumienia objętości lub strumienia masy jest zastosowanie zwężek pomiarowych.** Metoda ta zapewnia dużą dokładność pomiaru, a koszty z nią związane są jedne z najniższych.

Po wbudowaniu zwężki pomiarowej w rurociągu powstaje na niej różnica ciśnień statycznych między stroną dopływową a odpływową, czyli w kierunku zgodnym z przepływem płynu. Powyższa zmiana energii potencjalnej ciśnienia statycznego płynu (różnica ciśnień), jest miarą ilości przepływającego czynnika. Różnica ciśnienia  $\Delta p$  będzie tym większa, im większy będzie strumień płynu przepływającego przez rurociąg.

$$q_V \cong \Delta p$$

Pomiar natężenia przepływu za pomocą tej metody polega więc na wyznaczeniu w/w różnicy ciśnień, występującej przy przepływie czynnika przez zwężkę. Metodę tę można stosować dla wszystkich cieczy, par i gazów przy dowolnych temperaturach i ciśnieniach. Sposób wykorzystania zwężek normuje PN – 93/M – 53950/01



Rys.1. Przepływ czynnika przez kryżę.

Krzyża jest najprostszą zwężką, stanowi ją cienka tarcza z otworem kołowym (rys.1). Grubość tarczy jest mała w stosunku do średnicy otworu.

Rozpatrując przekrój 2-2 tuż za zwężką, strumień objętości obliczamy jako iloczyn pola powierzchni zwężki i prędkości  $c_2$

$$q_V = A \cdot c_2 \quad (1)$$

gdzie:  $A = \frac{\pi d^2}{4}$

Przy przepływie przez zwężkę (każdego rodzaju) następuje wzrost prędkości strumienia płynu od wartości  $c_1$  w przekroju 1-1 do wartości  $c_2$  w przekroju 2-2. Zwężenie strumienia rozpoczyna się przed kryżą i postępuje aż do uzyskania przekroju minimalnego znajdującego się w niewielkiej odległości za kryżą a następnie strumień rozszerzając się wypełnia całą objętość przewodu. **Prędkość  $c_2$  wyznaczymy w następujący sposób**, przypisując wielkościom występującym przed zwężką indeks „1” a za zwężką indeks „2” i korzystając z zasady zachowania energii strugi płynu wyrażonej prawem Bernoulliego można napisać że:

$$\frac{c_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{c_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 / \cdot 2g \quad (2)$$

Dla zwężki umieszczonej w poziomym rurociągu  $z_1 = z_2$

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

$$c_2^2 = c_1^2 + \frac{2\Delta p}{\rho}$$

Wykorzystując równanie ciągłości strugi oraz oznaczając jako  $\beta = \frac{d}{D}$  – jt. współczynnik przewężenia zwężki, wyliczamy  $c_1$  a następnie interesujące nas  $c_2$ :

$$c_1 \frac{\pi D^2}{4} = c_2 \frac{\pi d^2}{4}$$

$$c_1 = c_2 \frac{d^2}{D^2} \quad c_1 = c_2 \beta^2$$

$$c_2^2 = c_2^2 \beta^4 + \frac{2\Delta p}{\rho}$$

Wyznaczyliśmy więc **prędkość  $c_2$**  w przekroju 2 - 2

$$c_2 = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (3)$$

Znając  $c_2$  oraz przekrój zwężki możemy napisać, że strumień objętościowy czynnika przepływającego przez zwężkę jest równy:

$$q_{\dot{V}} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad [m^3/s] \quad (4)$$

Zaś strumień masowy wynosi analogicznie:

$$q_M = q_{\dot{V}} \cdot \rho$$

$$q_M = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2\Delta p \rho} \quad [kg/s] \quad (5)$$

Jak powyżej zaznaczono strumień objętości płynu przepływającego przez otwór zwężki jest oznaczony symbolem  $q_{\dot{V}}$  a strumień masy przez  $q_M$ . Są to oznaczenia przyjęte w normie europejskiej podczas gdy w literaturze z mechaniki płynów lub termodynamiki strumień objętości oznaczamy przez  $\dot{V}$ , a strumień masy  $\dot{m}$ .

**Wzory 4 i 5 wyrażają wielkości teoretyczne strumienia**, gdyż równanie (2) odnosi się do płynu doskonałego nie uwzględniając strat. Inną kwestią jest przyjęcie całego szeregu uproszczeń, takich jak: przyjęto że,  $A_2 = A$  (*nie uwzględniając przewężenia strugi*), zamiast spadku ciśnienia ( $p_1' - p_2'$ ) jako pomiarową różnicę ciśnień przyjmuje się

zazwyczaj różnicę ciśnienia przed i za kryzą ( $p_1 - p_2$ ), założono stałą prędkość w każdym punkcie przekroju przepływu pomijając fakt, że w warunkach rzeczywistego przepływu występuje rozkład prędkości w przewodzie. Uwzględniając opory wywołane lepkością płynu oraz straty wynikające z tworzących się wirów, za i przed zwężką, rzeczywisty przebieg zjawiska znacznie odbiega od teoretycznego. Rzeczywisty strumień  $q_{rz}$  będzie więc mniejszy od teoretycznego obliczonego wg. 4 i 5 . Odchylenie to uwzględnia się przez wprowadzenie do równania doświadczalnego współczynnika przepływu  $C$ , określanego dla przepływu płynu nieściśliwego. Charakteryzuje on zależność pomiędzy strumieniem rzeczywistym a teoretycznym. Wartość współczynnika  $C$  zależy od: rodzaju zwężki , jej wielkości i od liczby Reynoldsa  $Re$ . Współczynnik ten określa empiryczne równanie Readera – Harrisa/Gallaghery, którą dość skomplikowaną postać przedstawiono dla kryzy i dyszy poniżej.

W przypadku gazów lub par wytywających przy dużej różnicy ciśnień należy uwzględnić również efekt rozprężania, ( zmianę gęstości ). W tym celu wprowadza się doświadczalnie wyznaczoną liczbę ekspansji  $\varepsilon$ , która jest doświadczalnie wyznaczoną funkcją przewężenia zwężki  $\beta$  . Liczba ekspansji zależy również od rodzaju zwężki oraz wartości ciśnienia różnicowego i zmiany wykładnika izentropy danego gazu. Dla płynów nieściśliwych (cieczy)  $\varepsilon = 1$ , dla płynów ściśliwych ( par i gazów )  $\varepsilon < 1$ . Zależności do obliczenia  $C$  i  $\varepsilon$  podano poniżej.

Ostatecznie podstawowy wzór, z którego oblicza się strumień objętości lub masy, dla wszystkich rodzajów zwęzek jest następujący:

$$q_V = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad [m^3/s] \quad (6)$$

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2\Delta p \rho} \quad [kg/s] \quad (7)$$

gdzie:  $C$  – współczynnik przepływu

$\beta$  – współczynnik przewężenia zwężki

$\varepsilon$  – liczba ekspansji

$d$  – średnica zwężki, [m]

$\rho$  – gęstość czynnika przepływającego przez zwężkę,  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$\Delta p$  – różnica ciśnień przed i za zwężką, [Pa]

W przypadku gdy ciśnienie różnicowe mierzone jest „ U – rurką ” to różnica ciśnień  $\Delta p$  wyraża się równaniem

$$\Delta p = (\rho_m - \rho) g \Delta h \quad (8)$$

Gęstość  $\rho$  gazu wilgotnego liczymy sumując gęstość gazu suchego i gęstość pary wodnej w tej samej temperaturze i przy tym samym ciśnieniu.

$$\rho = \rho_n \frac{(p_1 - \varphi p'')^{T_n}}{T_1 p_n} + \varphi \rho'' \quad (9)$$

gdzie:  $\rho_n = 1,277 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

$p_n = 10^5 \text{ [Pa]}$

$T_n = 273,1 \text{ [K]}$

$T_1 = 273,1 + t$  – temperatura przepływającego czynnika

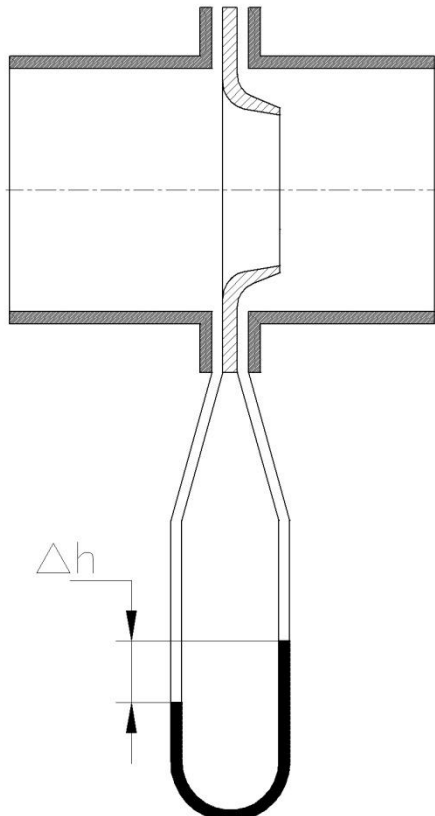
$p_1 = p_b \mp \rho g h_1$  – ciśnienie przed zwężką

$\varphi$  – wilgotność względna powietrza

$\rho''$  – gęstość pary nasyconej

$p''$  – ciśnienie pary nasyconej

### Współczynniki $C$ i $\varepsilon$ dla dyszy ISA 1932



## Rys. 2 Dysza ISA 1932

Liczbę ekspansji  $\varepsilon$  oblicza się wg. wzoru

$$\varepsilon = \left[ \left( \frac{\kappa \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{2/\kappa}}{\kappa - 1} \right) \cdot \left( \frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{2/\kappa}} \right) \cdot \left( \frac{1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(\kappa-1)/\kappa}}{1 - \frac{p_2}{p_1}} \right) \right]^{0,5}$$

gdzie:  $p_1 = p_b \pm \rho_m g h_1$

$$p_2 = p_b \pm \rho_m g h_2$$

$$\kappa = 1,4 \text{ dla powietrza}$$

Współczynnik przepływu wyznacza się wg. wzoru

$$C = 0,99 - 0,2262\beta^{4,1} - (0,00175\beta^2 - 0,0033\beta^{4,15}) \left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{1,15}$$

$$70\,000 \leq Re_D \leq 10^7 \quad \text{dla} \quad 0,3 \leq \beta \leq 0,44$$

$$20\,000 \leq Re_D \leq 10^7 \quad \text{dla} \quad 0,44 \leq \beta \leq 0,80$$

$$0,3 \leq \beta \leq 0,8$$

$$50 \text{ mm} \leq D \leq 500 \text{ mm}$$

### Współczynniki C i $\varepsilon$ dla kryzy ISA

Współczynnik przepływu dla kryzy z przytarczowym odbiorem ciśnienia wyznacza się wg. wzoru

$$C' = 0,5959 + 0,0312 \cdot \beta^{2,1} - 0,184 \cdot \beta^8 + 0,0029 \cdot \beta^{0,5} \left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0,75}$$

Początkowo nie mając danych do obliczenia liczby Re, ją należy przyjąć na wstępnym etapie  $Re_D = 10^6$  a wyliczoną wartość  $C'$  należy traktować jako przybliżoną. Dla przybliżonej wartości  $C'$  obliczamy strumień  $q_{\dot{V}}$ , na podstawie którego wyliczamy prędkość  $c$  i kolejną wartość Re po to aby wyliczyć następne „nowe”  $C''$  i w taki sposób postępujemy aż do momentu kiedy ostateczne

$$\left| \frac{C' - C''}{C''} \right| = 0,001$$

Liczbę ekspansji obliczamy wg. wzoru doświadczalnego

$$\varepsilon = 1 - (0,41 + 0,35\beta^4) \frac{\Delta p}{\kappa p_1}$$

$\Delta p = (\rho_m - \rho) g \Delta h$  – ciśnienie różnicowe

$p_1 = p_b \pm \rho_m g h_1$  – ciśnienie przed kryzą

$\kappa = 1,4$  – wykładnik izentropy dla powietrza

$$Re_D = \frac{c \cdot D}{\nu}$$

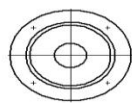
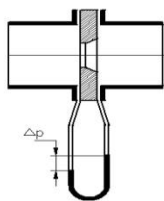
Wzór ten można stosować jedynie w przypadku spełnienia warunku gdy

$$\frac{p_2}{p_1} \geq 0,75$$

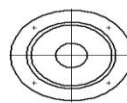
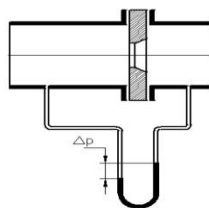
Przy małych spadkach ciśnień  $\Delta p$ , liczba ekspansji  $\varepsilon$  niewiele odbiega od jedności, a więc przy mniej dokładnych pomiarach można ją nawet pominąć w obliczeniach.

Istnieją trzy znormalizowane rodzaje zwężek przepływowych: kryza, dysza i zwężka Ventouriego

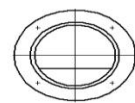
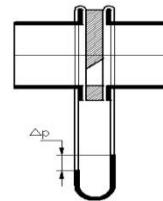
a)



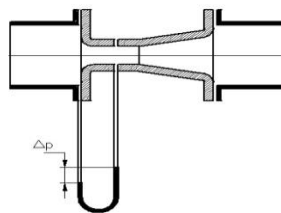
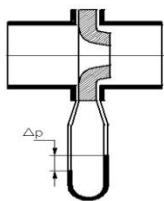
b)



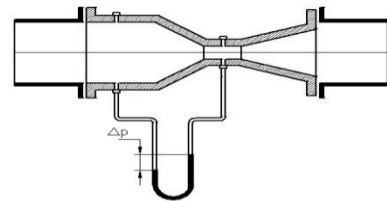
c)



d)



e)



f)

## Rys.2 Zwężki – ich odmiany.

- a.) kryza ISA z pomiarem trzyczarowym
- b.) kryza ISA z pomiarem  $D$  i  $D/2$
- c.) kryza segmentowa
- d.) dysza ISA
- e.) dysza Venturiego
- f.) klasyczna zwężka Venturiego

**Inne** (nieznormalizowane) **zwężki pomiarowe** . Zwężki te stosuje się w przypadku pomiaru płynów zanieczyszczonych lub o dużej lepkości przy małych liczbach  $Re$ , wymagają one indywidualnego wzorcowania .

- a.) kryza segmentowa
- b.) kryza kwadrantowa

Wszystkie powyższe typy zwęzek, różnią się między sobą zależnością  $C = f(\beta, Re)$  oraz trwałą stratą ciśnienia a także wrażliwością na zanieczyszczenia i oczywiście kształtem.

Z wymienionych typów zwęzek kryzy mają tę zaletę , że są krótsze , mają zwartą budowę, są łatwe do wykonania, wbudowania i demontażu oraz są tańsze. Wadą ich jest łatwość zanieczyszczania się, szybko zmniejszająca się dokładność pomiaru i stosunkowo duży trwały spadek ciśnienia. Stosuje się je w przypadku, gdy gaz lub para płynie z dużą szybkością, gdy duży trwały spadek ciśnienia nie odgrywa roli oraz gdy w danych warunkach nie można użyć dyszy, np. ze względu na jej długość.

Dysze są dokładniejsze od kryz, dają mniejszy trwały spadek ciśnienia, są mniej wrażliwe na zanieczyszczenia i zaburzenia przy przepływie, są jednak droższe, dłuższe a więc trudniejsze do wykonania, montażu i demontażu.

Przeprowadzenie pomiaru w znormalizowanych warunkach wymaga quasi- ustalonego charakteru przepływu. Oznacza to, że manometr różnicowy mierzy chwilową wartość ciśnienia różnicowego a nie średnią. Zwężki pomiarowe są wygodnymi przyrządami pomiarowymi ze względu na dużą dokładność i możliwość zastosowania w szerokich zakresach ciśnienia i temperatury. Montowane są tak aby oś zwężki pokrywała się z osią przewodu i stosowane w zakresie średnic  $D$  , od 50 do 1200 mm. Przepływ przez zwężkę nie powinien powodować zmiany fazy, płyn powinien być fizycznie i termicznie jednorodny oraz musi on całkowicie wypełniać przekrój rurociągu.

W skład układu pomiarowego wchodzi:

- element dławiący ( kryza , dysza, dysza Venturiego ).
- manometr do pomiaru różnicy ciśnień ( U-rurka, waga pierścieniowa lub inne)



- przewód przenoszący impuls ciśnienia z punktów pomiaru do manometru ( rurki stalowe, miedziane, gumowe, plastikowe )

Odbiór impulsów ciśnienia następuje za pośrednictwem pojedynczych otworów lub pierścieni wyrównawczych. Dobierając odpowiedni typ elementu dławiącego należy uwzględnić warunki techniczne i przesłanki ekonomiczne. Np. zastosowanie kryzy jest najtańsze lecz powoduje ona największą stratę trwałą ciśnienia dochodzącą nawet do 90% wartości ciśnienia różnicowego. Najmniejsze straty powoduje dysza Venturiego (  $8 \div 15\%$  wartości  $\Delta p$  ) jednak z powodu dużej ceny i konieczności dysponowania dłuższym odcinkiem rury potrzebnym do zainstalowania nie jest tak powszechnie stosowana jak kryzy i dysze.

**Opracował: W. Knapczyk**

Literatura:

1. Pomiary w technice cieplnej - Kotlewski F. Warszawa , WNT 1974
2. PN – 93/M – 53950/01 - Pomiar strumienia masy i strumienia objętości płynu za pomocą zwężek pomiarowych
3. Badania Wentylatorów i Sprężarek - Stanisław Fortuna. AGH Kraków 1999
4. Energetyka ciepła - Jerzy Wojciechowski. Kraków , Tarbonus " Sp. z o.o. 2008