

WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA PRZEPLYWU W ZWĘŻKACH POMIAROWYCH DLA GAZÓW

1. Wprowadzenie

Najbardziej rozpowszechnioną metodą pomiaru natężenia przepływu jest użycie elementów dławiających płyn. Stanowią one przeszkodę, umieszczoną w strumieniu czynnika i powodującą pewien spadek ciśnienia przy jego przepływie. Spadek ten jest miarą natężenia przepływu. Jest to metoda stosunkowo prosta, wystarczająco dokładna i nadaje się do dowolnych cieczy, gazów i par, przy dowolnych ciśnieniach i temperaturach.

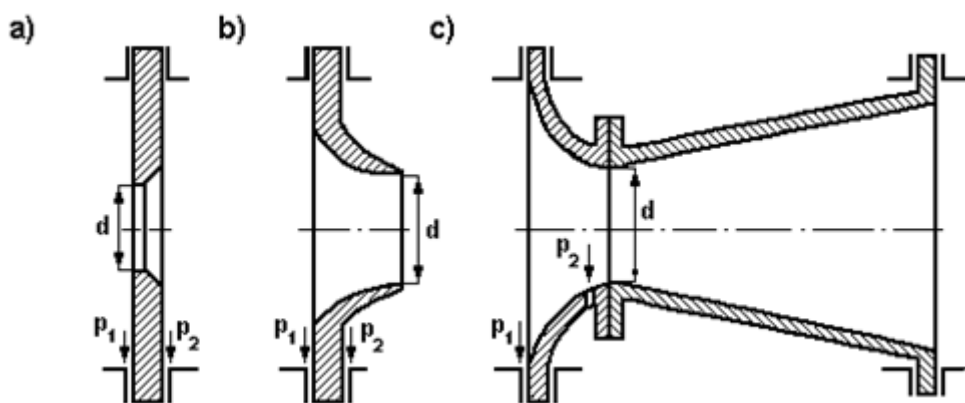
Kompletne urządzenie pomiarowe składa się z następujących części:

- a) przewód okrągły (rurociąg), w którym jest umieszczony element dławiający,
- b) przyrząd do pomiaru ciśnienia,
- c) rurowe przewody łączące (impulsowe), służące do hydraulicznego przenoszenia ciśnienia od elementu dławiającego do miernika.

Elementy dławiające używane do pomiaru natężeń przepływu zostały znormalizowane. Budowa zwężek oraz sposób ich projektowania i wykonania pomiaru są określone przez PN-65/M-53950. Zwężki znormalizowane mogą być stosowane w rurociągach o średnicy od 50 do 1000 mm [1].

Normy przewidują następujące rodzaje elementów dławiających (rys.1):

- kryza, zwana zwężką,
- dysza,
- dysza Venturiego.



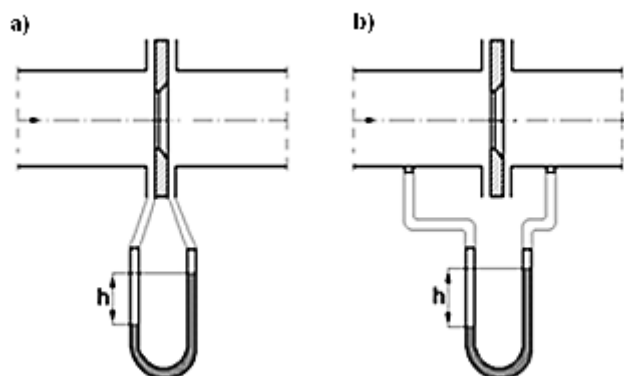
Rys.1. Zwężki znormalizowane: a) kryza, b) dysza, c) dysza Venturiego [2].

Najszerwsze zastosowanie znalazła kryza (rys.1a), ponieważ jest tania, łatwa w wykonaniu i montażu, ma mały ciężar i daje w praktyce dostateczną dokładność pomiarów. Jej wadą są stosunkowo duże straty ciśnienia i szybkie zużywanie się ostrych krawędzi, a także łatwość uszkodzenia przez działanie chemiczne przepływających czynników. Kryza może być wbudowana w prosty odcinek rurociągu i nazywa się wtedy kryzą przepływową. Kryza wbudowana na wlocie do rurociągu lub na jego wylocie, nazywa się odpowiednio kryzą

dopływową lub wypływową. W przypadku zastosowania kryzy przepływowej, otwory impulsowe:

- a) mogą się znajdować w bezpośrednim sąsiedztwie ścianek kryzy - kryza z przytarczowym pomiarem ciśnienia (rys.2a),
- b) mogą być także umieszczone w odległości $1 D$ przed zwężką, a za zwężką w miejscu największego przewężenia strumienia - kryza z pomiarem „vena contracta” (rys. 2b).

Otwory impulsowe powinny mieć przekrój kołowy lub kształt szczeliny pierścieniowej i w zależności od tego mamy punktowy lub szczelinowy pomiar ciśnienia [1].



Rys.2. Zwężki znormalizowane. a) Kryza ISA z pomiarem przytarczowym, b) kryza ISA z pomiarem „vena contracta” [2].

Jedną z najważniejszych wielkości charakteryzujących kryzę jest jej moduł m . Jest to stosunek powierzchni otworu przepływowego kryzy do powierzchni przekroju rurociągu.

$$m = \frac{A_o}{A_{rur}} = \left(\frac{d_o}{D_{rur}} \right)^2 \quad (1)$$

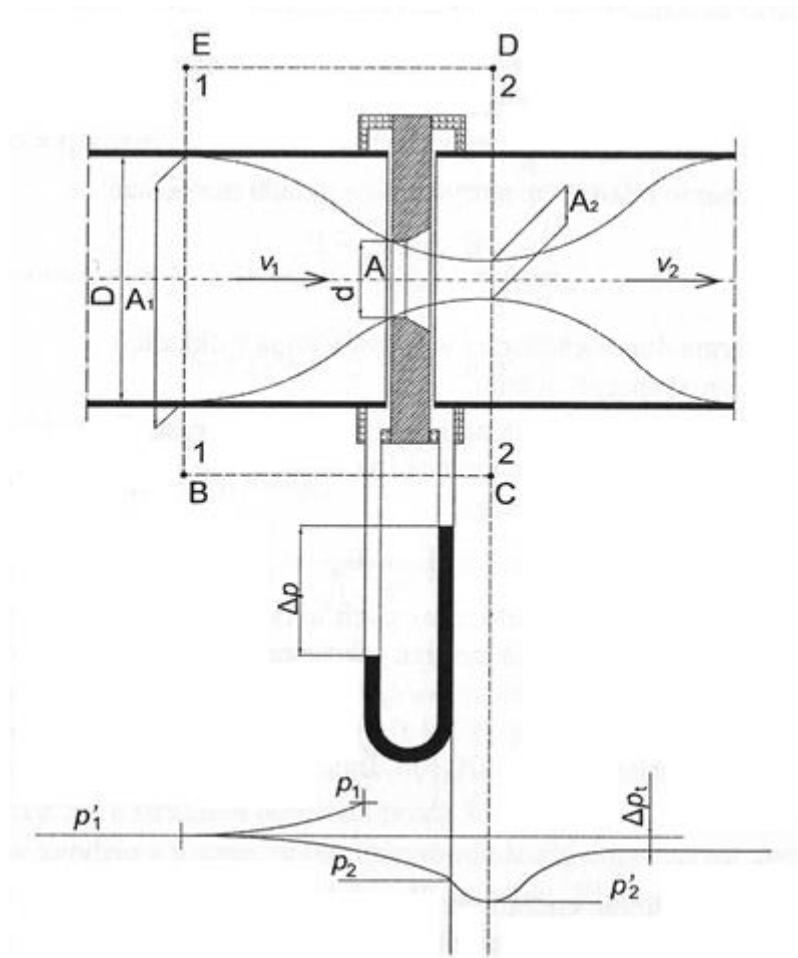
w którym:

- A_o – powierzchnia kryzy,
- A_{rur} – powierzchnia rurociągu,
- d_o – średnica kryzy,
- D_{rur} – średnica rurociągu.

Norma dopuszcza stosowanie zwężek o module zawartym w granicach od 0,01 do 0,64. Określone są także minimalne długości prostych odcinków rurociągu przed i za zwężką, na których nie mogą być zainstalowane żadne elementy armatury. Odcinki te są konieczne aby zakłócenia strugi zostały uspokojone zanim płyn dopłynie do zwężki lub w przypadku odcinka za zwężką, aby zakłócenia w dalszej części rurociągu nie wpływały na pomiar. Wielkość tych odcinków jest podawana jako stosunek ich długości od średnicy rurociągu i wynosi od 5 do 100 przed zwężką i od 4 do 8 za zwężką.

Pomiar natężenia przepływu za pomocą zwężki polega na zmierzeniu różnicy ciśnień statycznych przed i za zwężką, wywołanej przewężeniem strumienia płynu. Rysunek 3 ilustruje przepływ płynu przez odcinek pomiarowy oraz rozkład przyściennego ciśnienia statycznego. Zgodnie z równaniem Bernoulliego, ciśnienie w przewężeniu musi być mniejsze

niż przed nim. Powstała różnica ciśnień jest zależna od średniej prędkości przepływu płynu. Podczas przepływu strumienia płynu przez zwężkę, następuje wzrost prędkości v_1 przed kryzą, do prędkości v_2 za kryzą. Mierzona różnicę ciśnień i używaną do obliczeń jest różnica $\Delta p = p_1 - p_2$, zwana ciśnieniem różnicowym. Jak widać z rysunku 3, spadek ciśnienia na zwężce nie jest jednoznaczny ze zmierzonym ciśnieniem Δp . Bezpośrednio przed kryzą ciśnienie zwiększa się, następnie w otworze kryzy następuje duży spadek ciśnienia, na skutek zwiększenia prędkości, która rośnie nadal za zwężką, aż do najmniejszego przekroju strugi. Ostatecznie ciśnienie zwiększa się kosztem zmniejszenia prędkości, a strumień gazu wypełnia całą objętość przewodu. Powstaje więc strata ΔP_t , wywołana stratą energii na tarcie czy tworzenie się wirów, która jest zawsze mniejsza od ciśnienia różnicowego.



Rys. 3. Przepływ płynu przez kryzę pomiarową (zwężkę) [3].

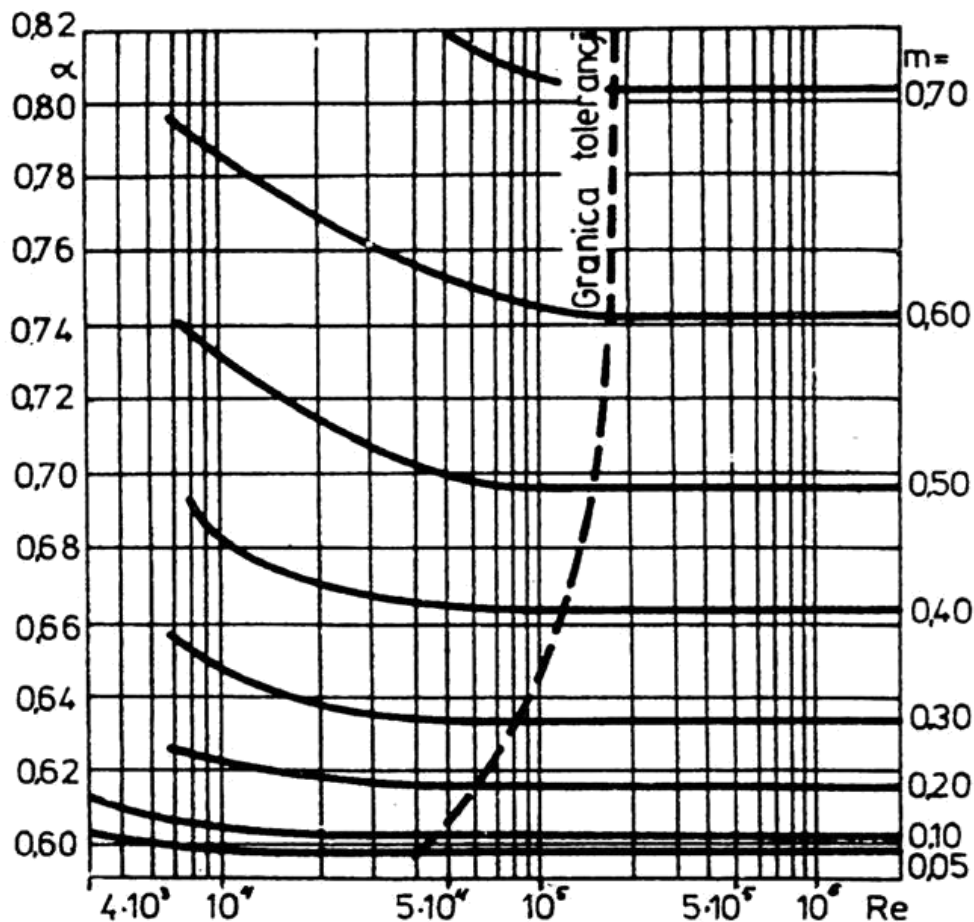
Natężenie przepływu cieczy wyznacza się metodą pośrednią, przez pomiar ciśnienia różnicowego. Na podstawie równania Bernoulliego oraz zasady ciągłości przepływu można wyprowadzić równanie wiążące prędkość przepływu i ciśnienie różnicowe. Ma ono postać:

$$v = \frac{\mu}{\sqrt{1-m^2\mu^2}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (2)$$

w którym:

- m – moduł zwężki,
- μ – współczynnik kontrakcji (stosunek powierzchni przekroju największego przewężenia strugi cieczy do powierzchni otworu kryzy),
- Δp – ciśnienie różnicowe,
- ρ – gęstość cieczy przed zwężką.

Liczba przepływu α zależy od rodzaju zwężki, jej modułu, liczby Reynoldsa płynu, chropowatości rurociągu i ostrości krawędzi wlotowej kryzy. Na rysunku 4 przedstawiono zależność α od liczby Reynoldsa i modułu zwężki.



Rys.4. Zależność liczby przepływu α od liczby Reynoldsa i modułu zwężki

Zaznaczono też graniczną liczbę Reynoldsa, powyżej której dopuszcza się pominięcie wpływu Re na wartość liczby przepływu.

Gazy i pary przepływające przez otwór zwężki zachowują się inaczej niż praktycznie nieściśliwe ciecze. Ich gęstość przy przepływie przez zwężenie nie jest stała i zmienia się zgodnie z równaniami termodynamicznymi. Dlatego też do równań opisujących prędkość i natężenie przepływu gazów przez zwężki wprowadza się dodatkowy współczynnik, tzw. liczbę ekspansji ε . Jest ona zależna od rodzaju zwężki, jej modułu, wykładnika izentropy gazu oraz stosunku ciśnienia różnicowego do ciśnienia gazu przed zwężką.

Dla przepływu gazu przez zwężkę obowiązują zależności:

$$v = \varepsilon \alpha \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (3)$$

$$\dot{V} = \varepsilon \alpha \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (4)$$

$$\dot{m} = \varepsilon \alpha \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2\Delta p \rho} \quad (5)$$

w którym:

- ε – liczba ekspansji,
- α – współczynnik przepływu,
- ρ – gęstość gazu,
- Δp – różnica ciśnień przed i za zwężką,
- d – średnica otworu zwężki.

Liczba ekspansji ε może przybierać wartości $\varepsilon \leq 1$, przy czym najczęściej mieści się w przedziale 0,9 – 1,0. Można ją wyznaczyć z odpowiednich wykresów lub ze wzorów empirycznych. Dla kryzy z przytarczowym pomiarem ciśnienia obowiązuje zależność:

$$\varepsilon = 1 - (0,3707 + 0,3184m^2) \left[1 - \left(1 - \frac{\Delta P}{P_2} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right]^{0,935} \quad (6)$$

w którym:

- m – moduł zwężki,
- ΔP – spadek ciśnienia na zwężce,
- κ – wykładnik izentropy gazu,
- P_2 - ciśnienie za zwężką.

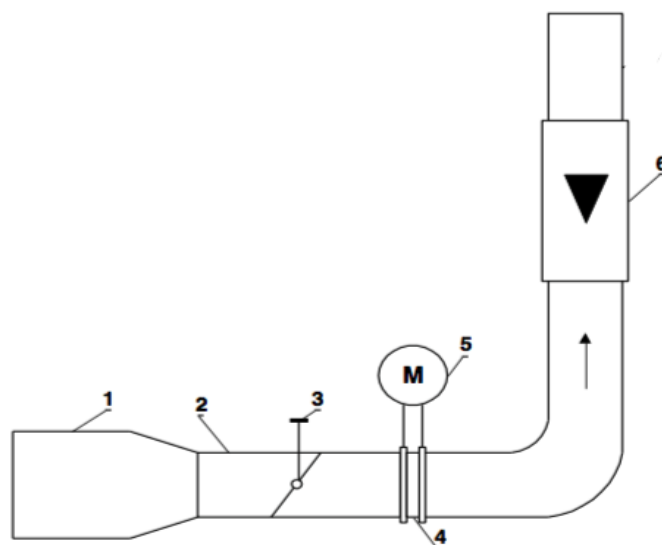
Dla gazów o niewielkim nadciśnieniu (poniżej $5 \times 10^3 \text{ N/m}^2$) i dla stosowanych w praktyce niewielkich ciśnień różnicowych można przyjąć $\varepsilon = 1$.

2. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyskalowanie czterech zwęzek pomiarowych dla przepływu powietrza oraz wyznaczenie dla nich współczynników przepływu.

3. Aparatura

Schemat instalacji pomiarowej przedstawiony jest na rysunku 5. Dmuchawa 1 tłoczy powietrze do rurociągu 2, którego średnica wewnętrzna wynosi 0.05 m. Regulacja natężenia przepływu odbywa się za pomocą przepustnicy 3. Na rurociągu zainstalowana jest zwężka pomiarowa 4, połączona z manometrem różnicowym 5, napełnionym metanolem. Zwężka jest elementem wymiennym. Średnica otworków zwęzek stosowanych w pomiarach wynoszą: nr 1 - 21.9 mm, nr 2 - 31.6 mm, nr 3 - 33.5 mm, nr 4 - 35.4 mm, nr 5 - 38.7 mm. Na końcu rurociągu zainstalowany jest rotametr 6, służący do pomiaru natężenia przepływu powietrza oraz termometr do pomiaru jego temperatury.



Rys.5. Schemat aparatury pomiarowej

1 - dmuchawa, 2 - rurociąg, 3 - zasuwka, 4 - zwężka pomiarowa, 5 - manometr, 6- rotametr

4. Metodyka pomiarów

W celu wyskalowania zwężki należy wykonać pomiary spadku ciśnienia przy różnych natężeniach przepływu powietrza. Po zamontowaniu zwężki w kołnierzach rurociągu należy włączyć dmuchawę i mierzyć spadek ciśnienia na zwężce dla kolejnych natężeń przepływu powietrza. Dla każdej zwężki należy wykonać pomiary przy co najmniej sześciu natężeniach przepływu powietrza, obejmujących cały zakres pomiarowy rotametr.

5. Opracowanie wyników

1. Obliczyć doświadczalne współczynniki przepływu α za pomocą równania (3).
W tym celu należy:
 - obliczyć prędkość przepływu w (korzystając z otrzymanych wartości objętościowego natężenia przepływu i danej powierzchni zwężki);
 - wyznaczyć ciśnienie w Pa na podstawie odczytanych wartości ciśnienia w mm H₂O (milimetry słupa wody) z manometru wypełnionego wodą.

2. Porównać otrzymane wartości doświadczalnego współczynnika przepływu z wartościami teoretycznymi odczytanymi z wykresu $\alpha = f(Re, m.)$ – rys.4.
W tym celu należy obliczyć:
- moduł zwężki m (korzystając ze wzoru 1);
 - liczbę Reynoldsa w otworze kryzy, korzystając ze wzoru (7):

$$Re = \frac{v d_o \rho}{\eta} \quad (7)$$

w którym:

η – lepkość dynamiczna (dla gazów) [Pa s]

3. Wykonać wykres zależności $\dot{m} = f(\Delta P)$ umieszczając dane dla wszystkich zwęzek na jednym wykresie.

Uwaga! W obliczeniach przyjąć, że liczba ekspansji $\varepsilon = 1$.

Wyniki wszystkich pomiarów i obliczeń należy umieścić w tabelce.

6. Literatura:

- [1] Belina-Freundlich D. (Red.), Laboratorium inżynierii procesowej cz.I, Przenoszenie pędu i procesy mechaniczne. Politechnika Wrocławska, Wrocław 1981.
- [2] www.uwm.edu.pl/wnz/v3/fck_files/text/cw_12_paliwa_gazowe.doc
- [3] Gondek, A. Przepływomierze spiętrzające przepływ. Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Kraków 2009.