

# WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA PRZEPIYU W ZWĘŻKACH POMIAROWYCH DLA GAZÓW

## 1. Wprowadzenie

Najbardziej rozpowszechnioną metodą pomiaru natężenia przepływu jest użycie elementów dławiących 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.

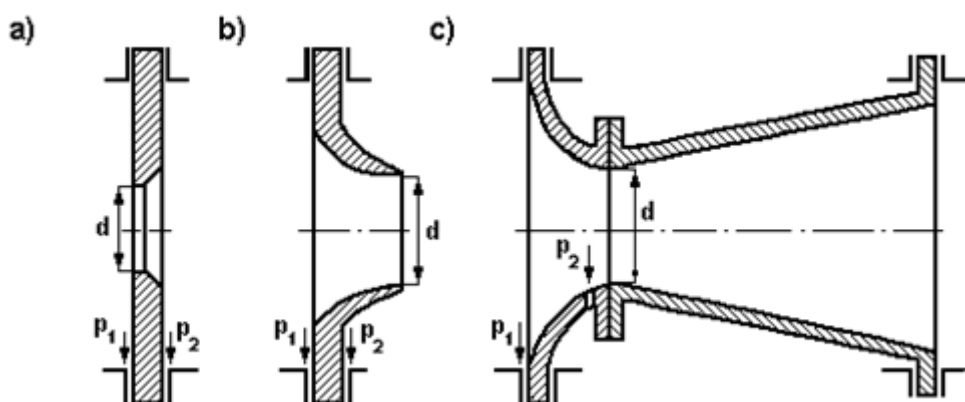
Kompletne urządzenie pomiarowe składa się z następujących części:

- przewód okrągły (rurociąg), w którym jest umieszczony element dławiący,
- przyrząd do pomiaru ciśnienia,
- rurowe przewody łączące (impulsowe), służące do hydraulicznego przenoszenia ciśnienia od elementu dławiącego do miernika.

Elementy dławiące 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 dławiących (rys. 1):

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



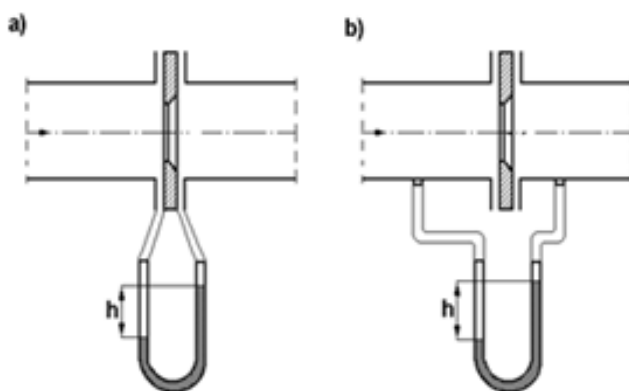
Rys. 1. Zwężki znormalizowane: a) kryza, b) dysza, c) dysza Venturiego [2].

Najszerze 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. 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 1D 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 (International Society of Automation) 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.

$$m = \frac{A}{A_1} = \left(\frac{d}{D}\right)^2 \quad (1)$$

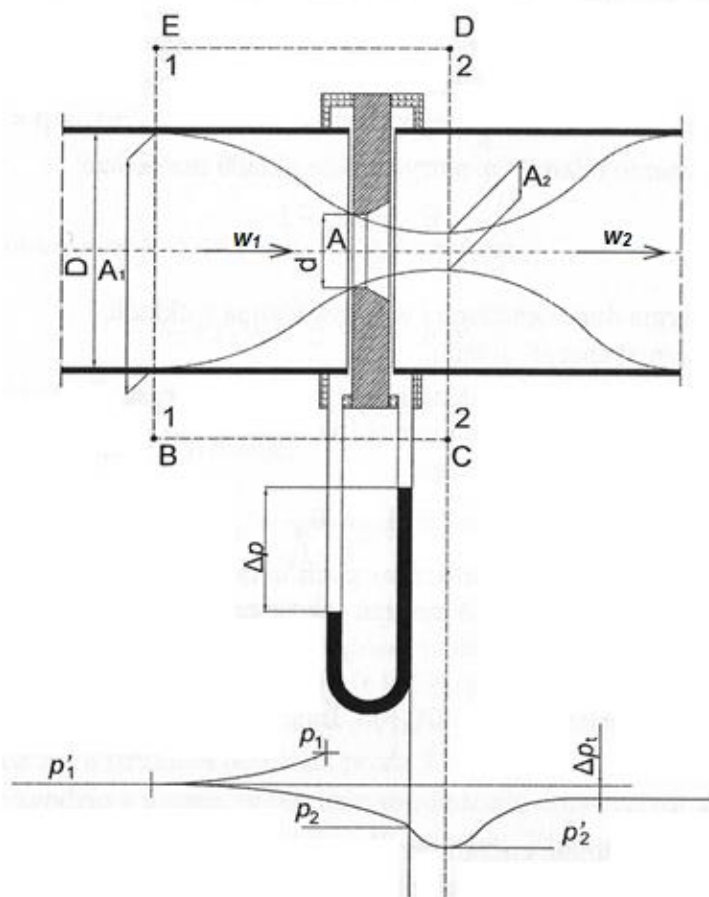
w którym:

- A – powierzchnia otworu kryzy,
- $A_1$  – powierzchnia przekroju rurociągu,
- d – średnica kryzy,
- D – 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 do średnicy rurociągu  $L/D$  i wynosi od

5 do 80 przed zwężką i od 4 do 8 za zwężką. Przedstawione stosunki długości prostoliniowego odcinka rurociągu przed zwężką zależą od modułu zwężki i rodzaju przeszkody umieszczonej na dopływie do zwężki. Tak na przykład dla modułu zwężki  $m=0,5$  i zagięcia  $90^\circ$  umieszczonego na dopływie do zwężki  $L/D=28$ . Dla  $m=0,64$  i dwóch lub więcej zagięć umieszczonych w różnych płaszczyznach, zainstalowanych na dopływie do zwężki  $L/D=80$ . Stosunek  $L/D$  za zwężką zależy jedynie od wartości modułu zwężki.

Pomiar natężenia przepływu za pomocą zwężki polega na zmierzeniu różnicy ciśnień statycznych przed i za zwężką, wywołanej przewężeniem strumienia płynu. Rys. 3 ilustruje przepływ płynu przez odcinek rurociągu z zamontowaną zwężką, rozkład przyściennego ciśnienia statycznego wzdłuż rurociągu oraz układ pomiarowy. Zgodnie z równaniem Bernoulliego, ciśnienie w przewężeniu strugi (tam gdzie prędkość płynu jest największa) 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 od wartości  $w_1$  (przekrój 1-1) przed kryzą, do prędkości  $w_2$  w największym przewężeniu strugi (przekrój 2-2) za kryzą. Różnica ciśnień przed i za zwężką zwana jest ciśnieniem różnicowym. Jak widać z rysunku 3, różnica ciśnień  $p'_1 - p'_2$  nie jest jednoznaczna ze zmierzoną za pomocą manometru różnicą ciśnień  $\Delta p$ . 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 nieodwracalna strata ciśnienia płynu  $\Delta p_t$ , wywołana tarciem i tworzeniem wirów.



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

Natężenie przepływu płynu wyznacza się metodą pośrednią, przez pomiar ciśnienia różnicowego  $\Delta p$ , mierzonego jako różnica ciśnień przed i za zwężką, jak to pokazano na rys. 3.

Równanie Bernoulliego dla przekrojów 1-1 oraz 2-2 (rys. 3) płynu nieściśliwego, poruszającego się w poziomym rurociągu ma postać

$$\frac{w_1^2}{2g} + \frac{p'_1}{\rho g} = \frac{w_2^2}{2g} + \frac{p'_2}{\rho g} \quad (2)$$

Równanie ciągłości strugi w powiązaniu ze współczynnikiem kontrakcji  $\mu = \frac{A_2}{A}$  (stosunek powierzchni przekroju strugi w największym przewężeniu do powierzchni kryzy)

$$w_1 \frac{\pi D^2}{4} = w_2 \mu \frac{\pi d^2}{4} \quad (3)$$

skąd

$$w_1 = w_2 \mu \frac{d^2}{D^2} = w_2 \mu m \quad (4)$$

Po wstawieniu równania (4) do równania (2) i po przekształceniu otrzymamy:

$$w_2 = \frac{1}{\sqrt{1-\mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2(p'_1 - p'_2)}{\rho}} \quad (5)$$

$m$  – moduł zwężki,

$\mu$  – współczynnik kontrakcji (stosunek powierzchni przekroju największego przewężenia strugi cieczy do powierzchni otworu kryzy),

$\Delta p'$  – ciśnienie różnicowe,

$\rho$  – gęstość cieczy przed zwężką,

$w_2$  – prędkość w największym przewężeniu strugi.

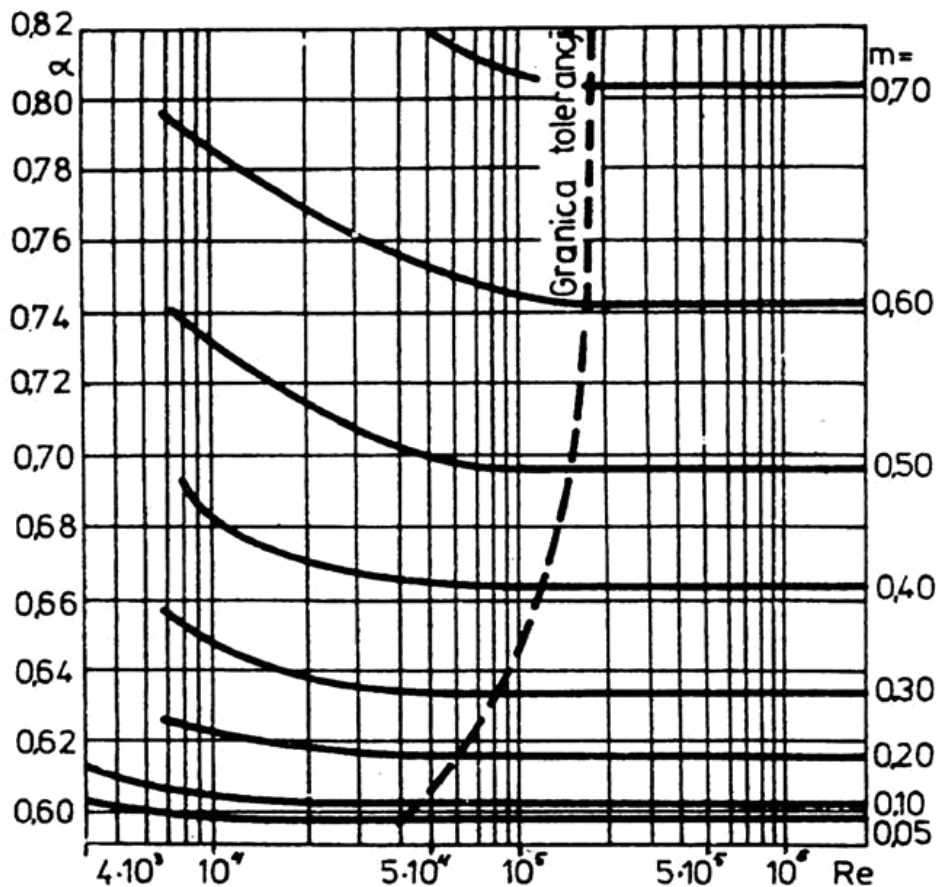
Objętościowe natężenie przepływu płynu oblicza się z zależności

$$\dot{V} = A_2 w_2 = \mu A w_2 = \frac{\mu}{\sqrt{1-\mu^2 m^2}} A \sqrt{\frac{2(p'_1 - p'_2)}{\rho}} \quad (6)$$

W praktycznych pomiarach zamiast różnicy ciśnień  $p'_1 - p'_2$  mierzy się różnicę ciśnień  $p_1 - p_2$ , jak to pokazano na rys. 3. Przekrojowi rurociągu tuż za kryzą, gdzie umieszczony jest rzeczywisty punkt pomiaru ciśnienia, odpowiada prędkość  $w'_2$ , różna od  $w_2$ . Podobnie pole przekroju strugi tuż za otworkiem kryzy  $A'_2$  różne jest od pola przekroju w największym przewężeniu  $A_2$ . Do wyznaczania natężenia przepływu płynu w zależności od mierzonego spadku ciśnienia na kryzie pomiarowej używa się równania (7).

$$\dot{V} = \alpha A \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (7)$$

Wielkość  $\alpha$  w równaniu (7), zwana współczynnikiem lub liczbą przepływu zależy od rodzaju zwężki, jej modułu  $m$ , liczby Reynoldsa, chropowatości rurociągu i ostrości krawędzi wlotowej kryzy. Wartości liczby przepływu  $\alpha$  wyznacza się doświadczalnie dla określonego płynu, przy znanej wartości objętościowego natężenia przepływu płynu  $\dot{V}$ , pola przekroju otworka zwężki  $A$  i zmierzonej różnicy ciśnień  $p_1 - p_2$ . Na rys. 4 przedstawiono przykładową zależność  $\alpha$  od liczby Reynoldsa i modułu zwężki. Na rysunku zaznaczono graniczną wartość liczby Reynoldsa dla różnych wartości modułu zwężki  $m$ , powyżej której nie ma wpływu liczby Re na wartość liczby przepływu  $\alpha$ .



**Rys. 4.** Zależność liczby przepływu  $\alpha$  od liczby Reynoldsa (w obliczeniach  $Re$  wykorzystano średnicę rurociągu i prędkość płynu w rurociągu, a nie w otworze zwężki) i modułu zwężki

Gazy i pary przepływające przez otwór zwężki zachowują się inaczej niż praktycznie nieściśliwe ciecze. Ich gęstość przy przepływie przez zwężenie nie jest stała. Dlatego też do równań opisujących natężenie przepływu gazów przez zwężki wprowadza się dodatkowy współczynnik, liczbę ekspansji  $\varepsilon$ . Jest ona zależna od rodzaju zwężki, jej modułu  $m$ , wykładnika izentropy gazu  $\kappa$  oraz stosunku ciśnienia różnicowego  $\Delta p$  do ciśnienia gazu przed zwężką  $p_1$ . Liczba ekspansji  $\varepsilon$  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:

$$\varepsilon = 1 - (0,3707 + 0,3184m^2) \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\Delta p}{p_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right]^{0,935} \quad (8)$$

w którym:

$m$  – moduł zwężki,

$\Delta p$  – spadek ciśnienia na zwężce,

$\kappa = C_p / C_v$  – wykładnik izentropy gazu (dla powietrza  $\kappa = 1,4$ )

$C_p$  – ciepło właściwe powietrza pod stałym ciśnieniem,

$C_v$  – ciepło właściwe powietrza przy stałej objętości,

$p_1$  – ciśnienie przed zwężką.

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

Dla przepływu gazu przez zwężkę obowiązują zależności:

$$\dot{V} = \varepsilon \alpha \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (9)$$

$$\dot{m} = \varepsilon \alpha \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2\Delta p \rho} \quad (10)$$

w którym:

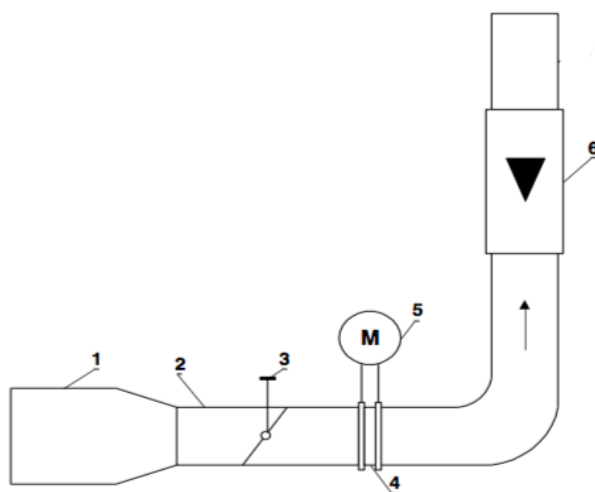
- $\varepsilon$  – liczba ekspansji,
- $\alpha$  – współczynnik przepływu,
- $d$  – średnica otworu zwężki,
- $\Delta p$  – różnica ciśnień przed i za zwężką,
- $\rho$  – gęstość gazu,
- $\dot{V}$  – objętościowe natężenie przepływu,
- $\dot{m}$  – masowe natężenie przepływu.

## 2. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie współczynnika przepływu  $\alpha$  dla kilku zwężek pomiarowych z użyciem przetłaczanego powietrza. Ustalona zależność  $\alpha=f(\text{Re})$  pozwoli obliczać masowe natężenie przepływu powietrza, mając zmierzony spadek ciśnienia na zwężce.

## 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. Zwężka jest elementem wymiennym. Średnice otworów zwężek stosowanych w pomiarach wynoszą: zwężka 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.



**Rys. 5.** Schemat aparatury pomiarowej

**1** - dmuchawa, **2** - rurociąg, **3** – zawór dławiący, **4** - zwężka pomiarowa, **5** - manometr, **6** – rotametr

#### 4. Metodyka pomiarów

W celu ustalenia współczynnika przepływu  $\alpha$  dla wybranej zwężki należy wykonać pomiary ciśnienia różnicowego na zwężce przy różnych natężeniach przepływu powietrza (wskazanie rotametry w działkach). 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 wartościach natężeń przepływu powietrza, obejmujących cały zakres pomiarowy rotametry.

#### 5. Opracowanie wyników

1. Obliczyć doświadczalny współczynnik przepływu  $\alpha$  za pomocą równania (9).

W tym celu należy:

- ustalić wartość objętościowego natężenia przepływu powietrza (z pomiaru za pomocą rotametry i przy wykorzystaniu równania cechowania rotametry)  $\dot{V}$ , m<sup>3</sup>/s;
- wyznaczyć ciśnienie różnicowe na zwężce  $\Delta p$ , Pa;
- zmierzyć temperaturę powietrza tłoczonego przez rurociąg, dla ustalenia jego właściwości fizycznych (gęstość, lepkość).

Ze względu na małe wartości ciśnienia różnicowego na zwężce w porównaniu z ciśnieniem gazu, w obliczeniach można przyjąć, liczbę ekspansji  $\varepsilon = 1$ .

2. Porównać otrzymane wartości doświadczalnego współczynnika przepływu z wartościami odczytanymi z rys.4.

W tym celu należy obliczyć:

- moduł zwężki  $m$  (korzystając ze wzoru 1);
- liczbę Reynoldsa w rurociągu, korzystając z równania (11):

$$Re = \frac{w_1 D \rho}{\eta} \quad (11)$$

w którym:

$w_1$  - prędkość gazu w rurociągu, m/s

$D$  - średnica rurociągu, m

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

$\eta$  - lepkość dynamiczna powietrza, Pa·s

3. Wykonać wykresy zależności  $\alpha = f(m, Re)$  oraz  $\dot{m} = f(\Delta P)$  umieszczając na wykresach dane uzyskane dla wszystkich badanych zwęzek.

Wyniki wszystkich pomiarów i obliczeń należy umieścić w tabeli (Tabela 1).

**Tabela 1.** Wyniki pomiarów i obliczeń

Nr zwężki	WARTOŚCI ZMIERZONE			WARTOŚCI OBLICZONE							
	Lp.	$\Delta p^*$ [.....]	$\dot{V}$ [działki]	$\Delta p$ [Pa]	$\dot{V}$ [m <sup>3</sup> /s]	$\dot{m}$ [kg/s]	$\alpha_{dośw}$	$w_1$ [m/s]	Re	Moduł zwężki m	$\alpha_{rys. 4}$
1											
2											
3											

\* - wartość w jednostkach użytego manometru

## 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](http://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.
4. Streeter V.L., Wylie E. B. Fluid mechanics. 7-th Ed. McGraw-Hill, 1979.
5. Kuratow T., Pomiary przepływów cieczy, par i gazów. Wydawnictwo Śląsk, 1977.

Opracowanie: dr Joanna Feder-Kubis, dr inż. Agnieszka Pawłowska, 2017  
Aktualizacja: dr hab. inż. Janusz Dziak, dr inż. Agnieszka Pawłowska, 2023