



Politechnika Wrocławska

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

Ćwiczenie L5

POMIAR STRUMIENIA OBJĘTOŚCI

- ZWĘŻKA POMIAROWA

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie współczynnika przepływu zwężki pomiarowej oraz jej charakterystyki przepływu.

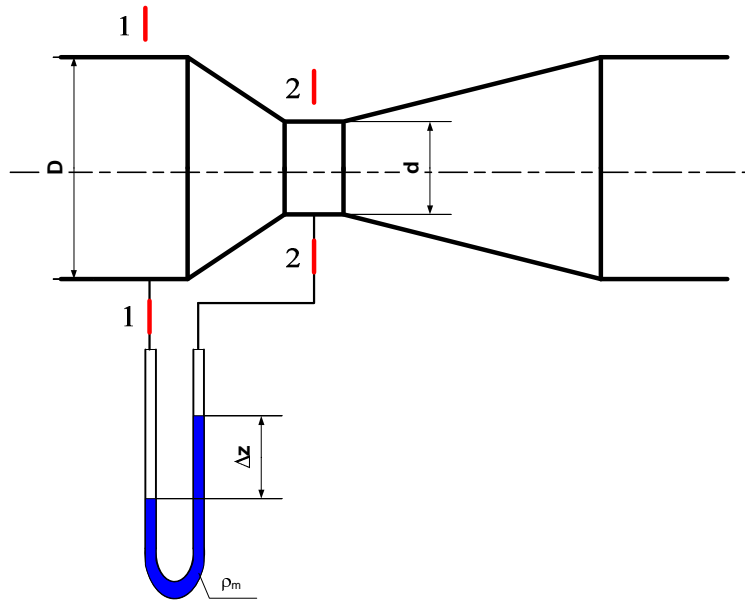
2. Wstęp teoretyczny

Zwężką pomiarową nazywamy przewężenie w przewodzie zamkniętym, zazwyczaj współśrodkowe, wywołujące spadek ciśnienia będącego podstawą pomiaru strumienia objętości. Zwężki pomiarowe dzielimy na trzy zasadnicze grupy:

- kryzy,
- dysze,
- zwężki Venturiego.

W kryzach przepływająca struga odrywa się od krawędzi wlotowej. Przewężenie wywołuje wzrost prędkości płynu od prędkości przed kryzą w przekroju 1 do prędkości większej w niewielkiej odległości za kryzą w przekroju 2. Zwężenie strugi rozpoczyna się już przed kryzą i trwa, aż do uzyskania przekroju minimalnego, znajdującego się w niewielkiej odległości za kryzą, po czym struga rozszerza się, stopniowo wypełniając całą powierzchnię przewodu. Ciśnienie płynu przed kryzą nieco wzrasta i zmniejsza się do minimum za kryzą w najwęższym przekroju strumienia. Strata części ciśnienia jest wywołana stratą energii na tarcie i tworzenie się wirów. Oderwanie strugi w dyszach – struga płynie wzdłuż jej powierzchni wewnętrznej, po czym odrywa się od niej przy wylocie z części cylindrycznej. Na wylocie struga osiąga prędkość maksymalną a ciśnienie jest minimalne. Przewężenie strugi na wylocie z dyszy powoduje powstawanie wirów. W zwężkach natomiast struga jest ograniczona elementami zwężki na całej długości. Te zasadnicze różnice w przebiegu strug wywierają decydujący wpływ na charakter zjawiska ruchu płynu, a zwłaszcza na wielkość strat energetycznych.

Prześledźmy ustalony ruch płynu nielepkiego i nieściśliwego w poziomej rurze, w której pewien odcinek zastąpiono przewężeniem – zwężką (rys. 1).



Rys. 1. Spadek ciśnienia przy przepływie przez zwężkę

W przypadku zwężek pomiarowych do wyznaczenia równania na strumień objętości przepływającego płynu stosuje się równanie Bernoulliego dla płynu idealnego ze względu na wstępne uproszczenia, które umożliwiają rozwiązanie zagadnienia przepływu. Równanie Bernoulliego dla rozważanych przekrojów 1-2 ma postać:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g}, \quad (1)$$

W równaniu pominięto wysokość z_1 i z_2 ze względu na to, że znajdują się na tym samym poziomie.

Uwzględniając, że strumień objętości jest stały w całym układzie szeregowym:

$$q_v = vA = \text{const} \quad (2)$$

oraz zależność, z której wynika, że:

$$v_1 = v_2 \left(\frac{d}{D} \right)^2 = \beta^2 v_2, \quad (3)$$

W którym $\beta = d/D$ oznacza stosunek średnicy otworu (gardzieli) zwężki (d) do średnicy wewnętrznej rurociągu (D) i nazywa się przewężeniem.

Podstawiając równanie (3) do równania (1) wyznaczono prędkość przepływu płynu v_2 :

$$v_2 = \sqrt{\frac{2g}{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{p_1-p_2}{\rho g}}, \quad (4)$$

a zatem miarą średniej prędkości przepływu przez zwężkę jest spadek ciśnienia ($\Delta p = p_1 - p_2$) między jej przekrojami mierniczymi, zwany ciśnieniem różnicowym. W przypadku pomiaru ciśnienia różnicowego za pomocą manometru różnicowego zależność (4) przyjmuje postać:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2g}{1-\beta^4}} \sqrt{\Delta z \left(\frac{\rho_m}{\rho} - 1 \right)}. \quad (5)$$

Na podstawie wartości prędkości średniej obliczamy strumień objętości przy znanych wartościach bezwzględnych ciśnień statycznych w obu przekrojach (lub ich różnicy):

$$q_v = A_2 v_2 = \frac{\pi d^2}{4} \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (6)$$

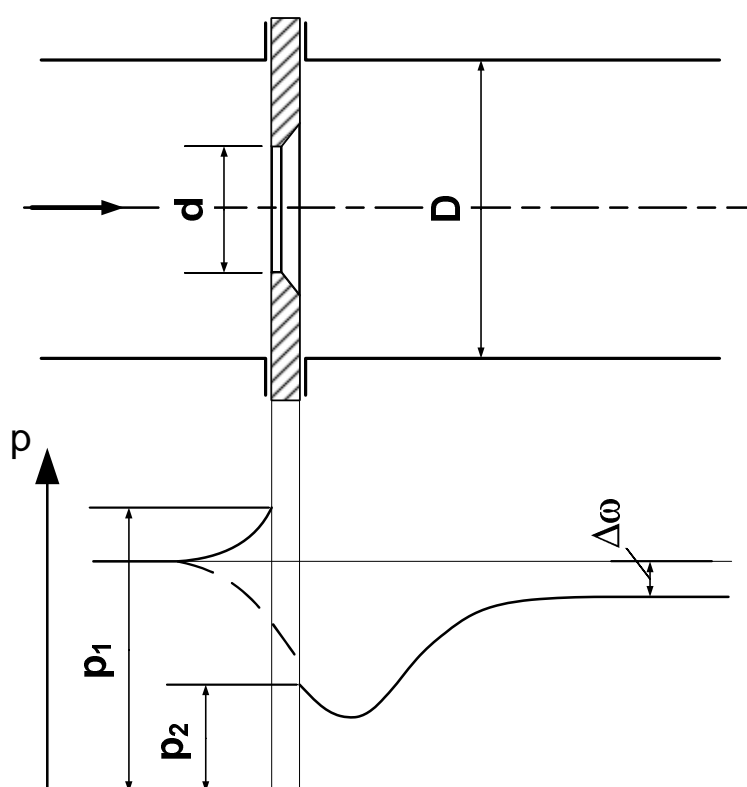
Ponieważ wyprowadzone równanie (5) dotyczy przepływu płynu doskonałego, stąd nie uwzględnia zjawisk występujących podczas przepływu płynów lepkich. Zmierzony w ten sposób strumień objętości różni się od rzeczywistego ze względu na istnienie oporów wywołanych lepkością płynu. Strumień objętości rzeczywisty będzie mniejszy od obliczonego z równania (6). Konieczne jest wprowadzenie współczynnika korygującego C , zwanego współczynnikiem przepływu, charakteryzującego zależność pomiędzy strumieniem objętości zmierzonym i rzeczywistym. Współczynnik ten jest indywidualną wartością wyznaczaną doświadczalnie dla każdej zwężki pomiarowej. Zależy on jedynie od liczby Reynoldsa $C = C(\text{Re})$ dla danego typu zwężki pomiarowej. Jeśli ponadto płyn jest ściśliwy, to trzeba wprowadzić do równania następny współczynnik ε (wyznaczony doświadczalnie i podany w normie), zwany liczbą ekspansji. Liczba ta (odniesiona do przekroju przepływowego przed zwężką) uwzględnia zmianę gęstości przepływającego płynu wskutek spadku ciśnienia w przewężeniu. Liczba ekspansji nie zależy od liczby Reynoldsa, a dla danego przewężenia zwężki pomiarowej zależy wyłącznie od ilorazu ciśnienia różnicowego i ciśnienia absolutnego przed zwężką $\Delta p/p_1$ oraz od wykładnika izentropy danego gazu. Dla praktycznie nieściśliwych cieczy $\varepsilon = 1$; dla płynów ściśliwych $\varepsilon < 1$.

Ostatecznie strumień objętości płynów rzeczywistych określa wzór:

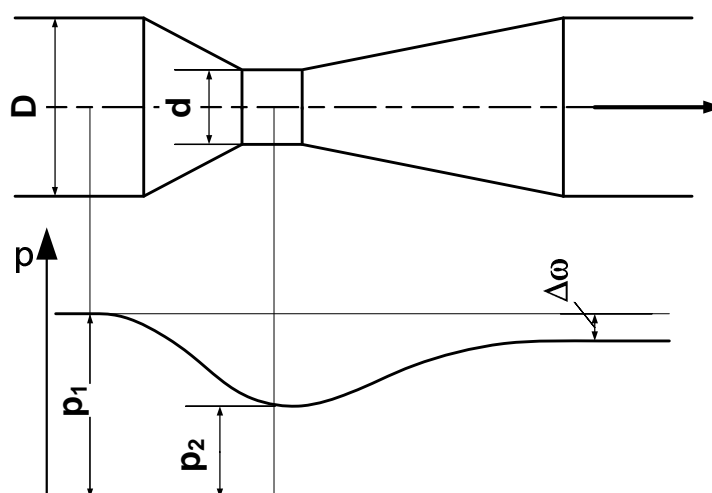
$$q_v = \varepsilon \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (6)$$

gdzie: Δp – jest ciśnieniem różnicowym mierzonym przed i za zwężką, ρ – gęstość płynu w przekroju mierniczym, ε – liczba ekspansji odniesiona do warunków przed zwężką.

Zależność $p=f(qv)$ określona równaniem (6) jest zwana charakterystyką zwężki. Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono schematy dwóch rodzajów zwęzek pomiarowych: kryzy pomiarowej i klasycznej zwężki Venturiego oraz pokazano rozkład ciśnienia wzdłuż osi przewodu (linią przerywaną) i w pobliżu ścian (linią ciągłą).



Rys. 2. Rozkład ciśnienia podczas przepływu przez rurę z kryzą pomiarową



Rys. 3. Rozkład ciśnienia wzdłuż klasycznej zwężki Venturiego

Przepływowi płynu rzeczywistego przez zwężkę towarzyszy strata energii. Wartość tej straty zależy przede wszystkim od przewężenia zwężki (β) oraz od sposobu dławienia strugi przepływającego czynnika, czyli od rodzaju zwężki. Najmniejszymi stratami energii charakteryzuje się zwężka Venturiego, w której nie ma gwałtownych zmian pola przekroju przepływowego. Największe straty wywołuje wbudowanie kryzy.

3. Opis stanowiska

Stanowisko pomiarowe składa się z następujących elementów:

- zbiornika zasilającego (1),
- pompy (2),
- zaworu regulacyjnego, (3)
- zaworów odcinających (4),
- przewężenia przewodu (5),
- manometru różnicowy (6),
- zbiornika mierniczego z wodowskazem (7),
- sekundomierza.

4. Procedura badawcza

Zapoznać się z budową stanowiska i sporządzić jego schemat, na którym należy zaznaczyć opisane w pkt. 3 elementy.

W celu wykonania pomiarów należy:

- przed włączeniem stanowiska upewnić się, że zawory odcinające (4) wodomierze są zamknięte,
- włączyć pompę (2),
- odkręcać zawór regulacyjny (3), aby uzyskać maksymalne wychylenie Δh na manometrze różnicowym (6),
- otrzymaną różnicę Δh podzielić równomiernie tak, aby uzyskać 15 serii pomiarowych,
- za pomocą zaworu regulacyjnego (3) zmniejszać wysokość spadku ciśnienia o ustalony krok pomiarowy,
- dla każdego kroku pomiarowego odczytać wskazanie manometru i zmierzyć strumień objętości przepływającej wody,

- do pomiaru strumienia objętości (stosowana jest metoda objętościowa) służy zbiornik mierniczy z wodowskazem (7). W celu wykonania pomiaru należy zamknąć zawór odcinający zbiornik mierniczy (7). Po zamknięciu zaworu poziom wody w zbiorniku zaczyna się podnosić. W wodowskazie znajdują się dwie elektrody. W momencie, w którym zwierciadło wody dotknie pierwszej elektrody zapala się dioda – włączamy stoper. W momencie, w którym zwierciadło wody dotknie drugiej elektrody zapala się druga kontrolka – wyłączamy stoper. Jest to czas τ przyrostu $4,55 \text{ dm}^3$ objętości wody w zbiorniku. Odczytany ze stopera czas zapisać w protokole pomiarowym z taką dokładnością jak pokazuje stoper. Po skończonym pomiarze natychmiast otworzyć zawór odcinający, w celu opróżnienia zbiornika,
- odczytać temperaturę wody.

5. Tabela wielkości mierzonych

Tabela wielkości pomiarowych do tego ćwiczenia zamieszczona jest na końcu instrukcji. Tabelę należy uzupełnić o jednostki wielkości mierzonych.

6. Opracowanie wyników pomiarów

Opracowanie wyników pomiarów należy wykonać zgodnie z poniższymi wytycznymi:

1) na podstawie zmierzonych wartości obliczyć współczynnik przepływu zwężki pomiarowej pojedynczego pomiaru z równania:

$$C = \frac{4V}{\tau \pi d^2 \sqrt{\Delta h}} \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}.$$

a następnie wyznaczyć jego wartość średnią. Równanie to jest wynikiem przekształcenie równania (6), gdzie V jest stałą objętością wody napełnianą w zbiorniku w czasie τ . Δh jest różnicą wskazań różnicowego manometru „U”-rurkowego odwróconego.

2) obliczyć rzeczywisty i teoretyczny strumień objętości uwzględniający w równaniu (6) średnią wartość współczynnika C

$$q_v = \frac{V}{\tau}$$

$$q_{Vt} = \frac{C_{sr}}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2g\Delta h}$$

5) Na jednym wykresie sporządzić doświadczalną i teoretyczną charakterystykę przepływu zwężki $\Delta h = f(q_V)$

3) obliczyć liczbę Reynoldsa pojedynczego pomiaru,

$$Re = \frac{vd}{\nu}$$

Prędkość zależna jest od strumienia objętości i pola przekroju $v = \frac{4q_V}{\pi d^2}$, a strumień objętości wyznaczony jest metodą objętościową $q_V = \frac{V}{\tau}$. Podstawiając powyższe zależności do liczby Reynoldsa otrzymamy równanie w postaci końcowej

$$Re = \frac{4V}{\tau \pi D \nu}$$

4) Sporządzić charakterystykę $C = f(Re)$

7. Pytania kontrolne

- 1) Podać podział zwężek.
- 2) Do czego służy zwężka pomiarowa i na jakiej zasadzie działa.
- 3) W którym miejscu następuje oderwanie strugi w zwężkach?
- 4) Co to jest przewężenie zwężki?
- 5) Od czego zależny jest współczynnik przepływu?
- 6) Co to jest liczba ekspansji?
- 7) Ile wynosi liczba ekspansji dla płynów ściśliwych i nieściśliwych?
- 8) Od jakich parametrów zależy strumień objętości mierzony metodą zwężkową?

Tabela pomiarowa do L5

Data wykonania pomiarów:.....

| Lp. | Δh | τ | Lp. | Δh | τ |
|-------|------------|--------|-------|------------|--------|
| Jedn. | | | Jedn. | | |
| 1. | | | 9. | | |
| 2. | | | 10. | | |
| 3. | | | 11. | | |
| 4. | | | 12. | | |
| 5. | | | 13. | | |
| 6. | | | 14. | | |
| 7. | | | 15. | | |
| 8. | | | 16. | | |

Warunki pomiaru i wielkości stałe

| Symbol | Jednostka | Wartość |
|--------|-----------------|---------|
| d | mm | 10 |
| D | mm | 20 |
| T | °C | |
| V | dm ³ | 4,55 |

Sekcja nr

| Lp. | Nazwisko | Imię | Nr albumu |
|-----|----------|------|-----------|
| 1. | | | |
| 2. | | | |
| 3. | | | |

Data, podpis prowadzącego