

Pomiar strumienia przepływu

Pomiar strumienia przepływu jest to pomiar ilości przepływającego płynu przez przekrój w jednostce czasu. Może on być mierzony w jednostce objętości m^3/s lub masy kg/s . Jest wiele metod pomiaru strumienia przepływu płynów, niektóre z nich można stosować tylko i wyłącznie do cieczy, inne zarówno do cieczy jak i do gazów. Na potrzeby tego opracowania, opis metod pomiaru strumienia przepływu podzielono na dwa przypadki:

a) metody pomiaru strumienia w przewodach zamkniętych:

- objętościowa,
- masowa,
- zwężkowa,
- za pomocą rotametrów,

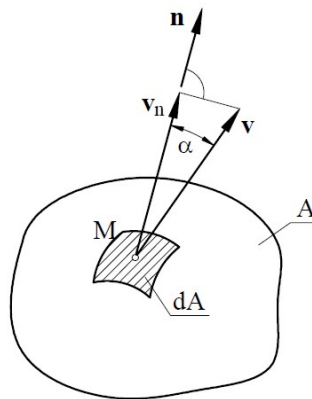
b) metody pomiaru w kanałach otwartych, za pomocą:

- koryta mierniczego,
- przelewu mierniczego.

1. Podstawowe równania

Elementarny strumień objętości przepływającego płynu dq_v przez elementarną powierzchnię dA można zapisać w postaci (rys. 1.1)

$$dq_v = v dA. \quad (1.1)$$



Rys. 1.1. Ilustracja elementarnego strumienia objętości

Natomiast całkowity strumień objętości to

$$q_v = \oint_A v dA, \quad (1.2)$$

a po scałkowaniu równania (1.2) po powierzchni A otrzymujemy równanie na strumień objętości przepływającego płynu w postaci

$$q_v = v_s A, \quad (1.3)$$

w którym v_s to prędkość średnia płynu w przekroju, A to pole przekroju przepływu. Jednostką strumienia objętości jest m^3/s .

Analogicznie do równania (1.1) można zapisać równanie na jednostkowy strumień masy przepływającego płynu w postaci:

$$dq_m = \rho v dA, \quad (1.4)$$

oraz

$$q_m = \oint_A \rho v dA, \quad (1.5)$$

a po scałkowaniu równania (1.5) po powierzchni otrzymujemy równanie na strumień masy przepływającego czynnika w postaci:

$$q_m = \rho v_s A, \quad (1.6)$$

w którym ρ jest gęstością płynu. Jednostką strumienia masy jest kg/s.

Zgodnie z zasadą zachowania masy, w żadnym punkcie pola prędkości masa nie może się tworzyć ani znikać. W płynie nieściśliwym ($\rho = \text{const}$) tylko takie pole prędkości będzie spełniało tę zasadę, w którym w każdej chwili do obszaru ograniczonego powierzchnią kontrolną będzie wpływała taka sama objętość płynu, jaka będzie wypływać. . Warunek ten jest identyczny dla przepływów ustalonych i nieustalonych. Podczas przepływu płynu ściśliwego ($\rho \neq \text{const}$) w ruchu ustalonym musi być zachowany powyższy warunek, ponieważ masa zawarta wewnątrz powierzchni kontrolnej jest niezmienna w czasie. W przepływie nieustalonym, z upływem czasu gęstość może ulegać lokalnym zmianom, co może wywołać zmianę masy płynu.

2. Metoda objętościowa pomiaru strumienia objętości

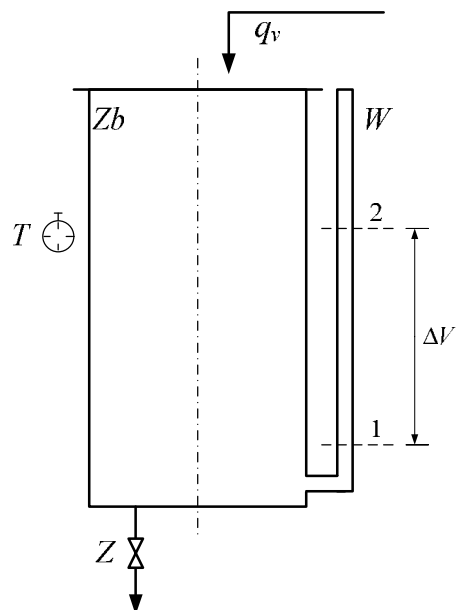
Istotą metody objętościowej jest pomiar czasu t przepływu określonej objętości V . W przypadku przepływu ustalonego, strumień objętości można zapisać w postaci

$$q_v = \frac{V}{t}, \quad (2.1)$$

w którym V oznacza objętość cieczy, natomiast t czas.

Do wykonania pomiarów służą zbiorniki miernicze zaopatrzone w wodowskaz oraz zawór wypływowy (rys. 2.1). Wodowskaz to zwykle przezroczysta rurka o średnicy co najmniej 13 mm. Czas t mierzony jest za pomocą sekundomierza. W tej metodzie objętość V oraz czas t dobiera się w taki sposób, aby błąd pomiaru nie przekraczał określonej dopuszczalnej wartości. Zależy on od dokładności pomiaru czasu i objętości.

Obsługa zbiornika mierniczego sprowadza się do zamykania i otwierania zaworu wypływowego. Po zamknięciu zaworu poziom cieczy w zbiorniku zaczyna podnosić się i w momencie, w którym osiągnie ustalony poziom początkowy włącza się sekundomierz. Pomiar czasu t trwa tak długo, aż ciecz osiągnie ustalony na wodowskazie poziom końcowy. Po osiągnięciu poziomu końcowego sekundomierz jest zatrzymywany i odczytywany jest czas t przyrostu określonej objętości V . Na tej podstawie, za pomocą równania (2.1) wyznaczany jest strumień objętości przepływającej cieczy.



Rys. 2.1. Schemat układu do pomiaru strumienia objętości cieczy
Zb – zbiornik mierniczy, *W* – wodowskaz, *Z* – zawór zamykający, *T* – sekundomierz

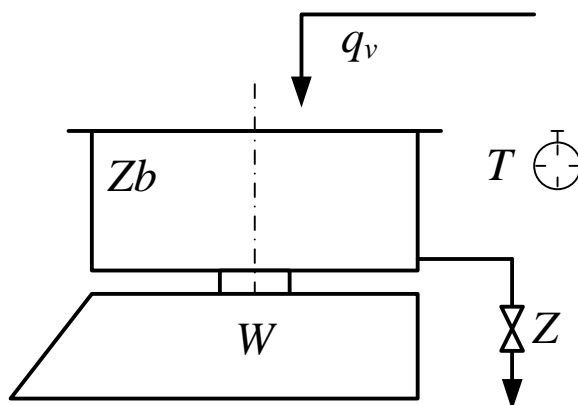
3. Metoda masowa pomiaru strumienia masy

Istotą metody masowej jest pomiar czasu t przepływu określonej masy m . W przypadku przepływu ustalonego, strumień masy można zapisać w postaci

$$q_m = \frac{m}{t}, \quad (3.1)$$

w którym m oznacza masę płynu, natomiast t czas.

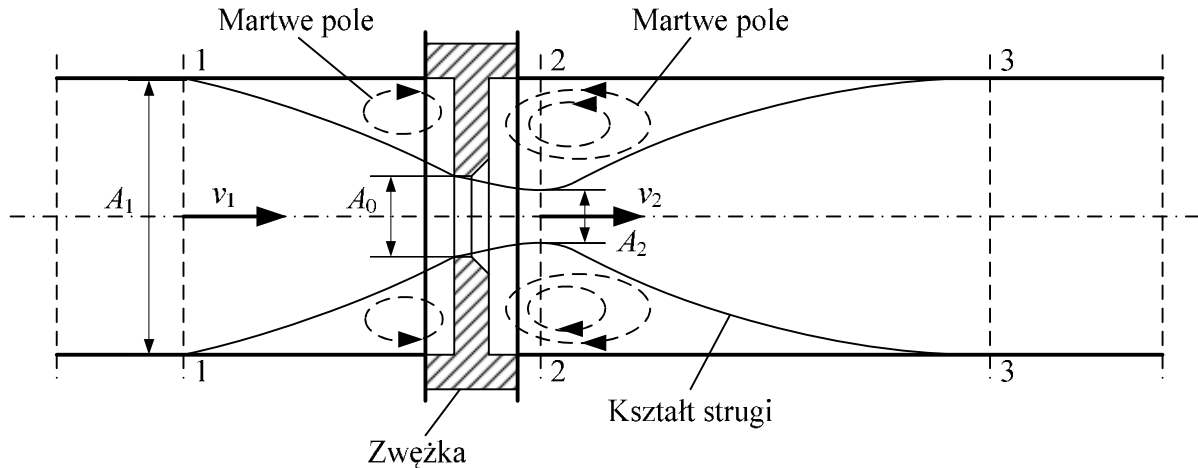
Do wykonania pomiarów wykorzystywana jest waga oraz sekundomierz (rys. 3.1). Pomiar polega na tym, że w chwili włączenia stopera należy wagę wytarować i zmierzyć odpowiednio dużą masę cieczy m . Stąd po podstawieniu do równania (3.1) zmierzonych wartości masy m oraz czasu t otrzymujemy strumień masy przepływającej cieczy.



Rys. 3.1. Schemat układu do pomiaru strumienia masy cieczy
Zb – zbiornik, *W* – waga, *Z* – zawór zamykający, *T* – sekundomierz

4. Metoda zwężkowa pomiaru strumienia objętości

Metoda ta polega na wstawieniu w rurociąg zwężki (rys. 4.1) w celu wywołania spadku ciśnienia. Zgodnie z równaniem ciągłości w miejscu zwężenia przekroju nastąpi wzrost prędkości. Wzrostowi prędkości towarzyszy jednocześnie spadek ciśnienia, który jest istotą pomiaru. Mierząc spadek ciśnienia pomiędzy wybranymi przekrojami 1-1 i 2-2 oraz mierząc ciśnienie i temperaturę płynu można obliczyć wartość strumienia objętości.



Rys. 4.1. Schemat zwężki pomiarowej

W celu wyprowadzenia równania na zależność strumienia objętości płynu od spadku ciśnienia przyjęto założenie, że przepływ jest jednowymiarowym, ustalonym ruchem płynu idealnego. W takim przypadku można napisać równanie Bernoulliego w postaci

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \text{const}, \quad (4.1)$$

w którym poszczególne człony to: z – wysokość położenia przekroju, $p/\rho g$ – wysokość ciśnienia, $v^2/2g$ – wysokość prędkości. Stosując równanie (4.1) napisane dla przekrojów 1-1 i 2-2 przyjętych na rys. 4.1 otrzymujemy

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}. \quad (4.2)$$

Położenie wybranych przekrojów 1-1 i 2-2 znajduje się na tej samej wysokości, stąd $z_1 = z_2$, a równanie (4.2) uprasza się do następującej postaci

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}. \quad (4.3)$$

Następnie prędkość w przekroju 1 zostanie zastąpiona prędkością w przekroju 2 korzystając z równania

$$\frac{\rho d_1^2}{4} v_1 = \frac{\rho d_2^2}{4} v_2 \quad \text{®} \quad v_1 = v_2 \frac{d_2^2}{d_1^2}, \quad (4.4)$$

Dodatkowo zdefiniowany zostanie moduł m i przewężenie b zwężki

$$m = \frac{A_2}{A_1} = \frac{a_2}{a_1} = b^2. \quad (4.5)$$

Podstawiając równania (4.4) i (4.5) do (4.3) otrzymano

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} m^2 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}, \quad (4.6)$$

a następnie wyznaczono prędkość w przekroju 2

$$v_2 = \sqrt{\frac{1}{1-b^4}} \sqrt{\frac{2Dp}{\rho}}. \quad (4.7)$$

Stąd strumień objętości jest równy

$$q_v = v_2 A_2 = A_2 \sqrt{\frac{1}{1-b^4}} \sqrt{\frac{2Dp}{\rho}}. \quad (4.8)$$

Po wyprowadzeniu tej zależności wprowadza się poprawki uwzględniające straty energii przepływającej strugi, wielowymiarowość ruchu oraz ściśliwość, jeżeli przepływającym płynem jest gaz. Jednowymiarowy, ustalony ruch płynu odbywa się w polu sił ciężkości.

Na rysunku 4.1 przedstawiono kształt strugi przepływającej przez zwężkę. Kształt ten wynika z działania siły bezwładności, która powoduje powstawanie wirów, czyli obszarów płynu poruszających się po torach zamkniętych, w narożach utworzonych przez kryzę i rurociąg. Są to tzw. „martwe pola” wpływające na występowanie strat energii w wyniku nagłego zwężenia i rozszerzenia przekroju przepływającej strugi. Oprócz tego wpływ na mierzoną wartość strumienia objętości ma zaburzenie profilu prędkości w przewodzie i przewężeniu, straty hydrauliczne, usytuowanie punktów odbioru ciśnienia, liczba Reynoldsa. Wszystkie te czynniki uwzględnia się w postaci współczynnika poprawkowego C nazywanego współczynnikiem przepływu zwężki. Równanie (4.8) przyjmuje następującą postać

$$q_v = \frac{C}{\sqrt{1-b^4}} e \frac{\rho d_0^2}{4} \sqrt{\frac{2Dp}{\rho}}, \quad (4.9)$$

w którym:

C – współczynnik przepływu zwężki, $C = f(\text{Re})$

b – współczynnik konstrukcyjny (moduł) d_3/d_1 zwężki,

e – współczynnik ekspansji, $e = f(p_2/p_1, b)$ (dla cieczy $e = 1$, dla gazów $e < 1$),

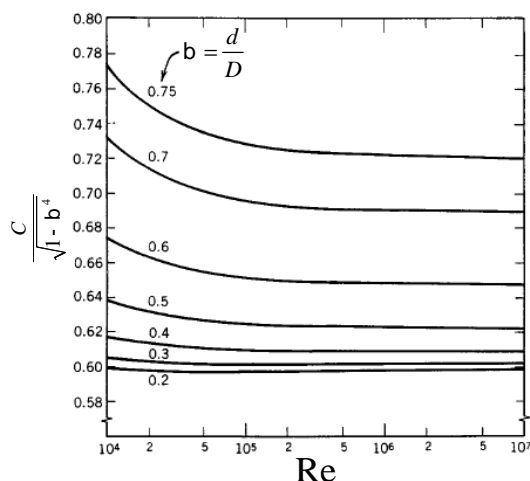
d_0 – średnica otworu zwężki,

ρ – gęstość płynu w przekroju pomiarowym zwężki (dla cieczy $\rho_1 = \rho_2 = \rho$)

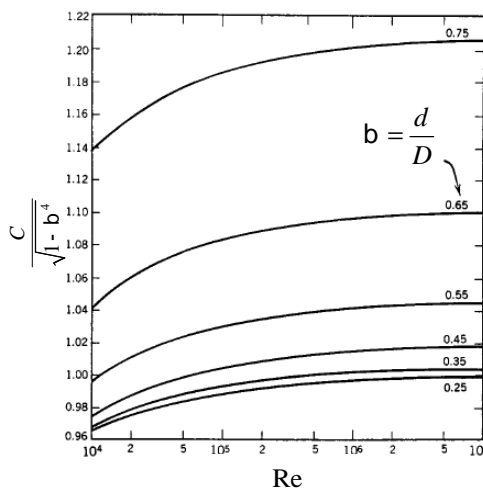
Dp – różnica ciśnienia zmierzona przed i za zwężką w miejscach ustalonych zgodnie z odpowiednią normą.

Ze względu na budowę i geometrię zwężki pomiarowe mogą być różnego typu. Do najczęściej spotykanych zwęzek zalicza się kryzę, dyszę, zwężkę Venturiego. Współczynnik

przepływu dla tych zwężek przyjmuje różne wartości i tak np. dla kryz ma wartość ok. $C \approx 0,6$, natomiast dla zwężek Venturiego i dysz ok. $C \approx 0,98$. Także zależność współczynnika przepływu od liczby Reynoldsa zależy od typu zwężki. Dla ze wzrostem liczby Reynoldsa współczynnika przepływu dla dysz również rośnie, natomiast dla kryz maleje. Powyżej pewniej wartości liczby Reynoldsa współczynnik przepływu ma wartość prawie stałą. Na rys. 4.2 i 4.3 przedstawiono przykładowe zależności współczynnika przepływu od liczby Reynoldsa dla kryz i dysz.



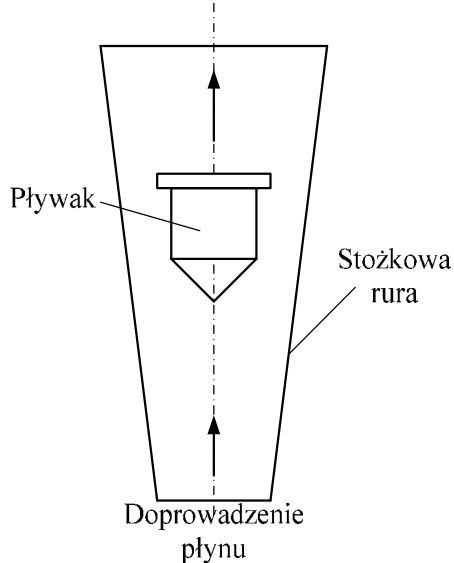
Rys. 4.2. Zależność współczynnika przepływu od liczby Reynoldsa dla kryz



Rys. 4.3. Zależność współczynnika przepływu od liczby Reynoldsa dla dysz

5. Pomiar strumienia objętości płynu za pomocą rotametu

Rotametr (rys. 5.1) jest przyrządem pływakowym służącym do pomiaru strumienia objętości płynu. Może być wykorzystywany zarówno do pomiaru strumienia objętości przepływającej cieczy jak i gazu. Główną częścią rotametu jest stożkowa rurka oraz pływak o określonym kształcie. Pływak posiada zwykle kilka ukośnych nacięć wprowadzających go w ruch wirowy w czasie przepływu płynu. Zabieg ten sprzyja jego stabilizacji. Płyn do rotametu zawsze doprowadzany jest od dołu.



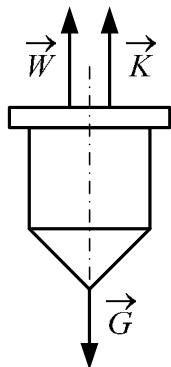
Rys. 5.1. Schemat rotametu

Do podstawowych zalet rotametrów należą:

- prostota budowy,
- możliwość stosowania do płynów agresywnych i nieniutonowskich,
- szeroki zakres pomiarowy,
- równomierna podziałka,
- możliwość pomiaru niewielkich strumieni objętości cieczy (np. 0,1 dm³/h wody) i gazów.

Do najważniejszych wad rotametrów należy ich przydatność ograniczająca się do płynów użytych do ich wzorcowania oraz ich parametrów: temperatury, ciśnienia, czy w przypadku gazów – wilgotności. Wzorcowanie polega na określeniu różnicy pomiędzy wskazaniem przyrządu wzorcowego (do pomiaru strumienia objętości) a wskazaniem rotametru wzorcowanego, z uwzględnieniem niepewności pomiaru dokonanego za pomocą przyrządu wzorcowego. Zastosowanie rotametrów do pomiaru w warunkach różnych od warunków wzorcowania wymaga odpowiedniej korekty ich wskazań. Rodzaj płynu oraz warunki wzorcowania są zawsze oznaczone na rotametrze.

Równanie przepływu dla rotametrów można otrzymać podobnie jak dla zwężek, przyjmując przepływ płynu idealnego. Dopiero po wyznaczeniu równania przepływu wprowadza się odpowiednie współczynniki poprawkowe. Układ sił działających na pływak przedstawiono na rys. 5.2.



Rys. 5.2. Siły działające na pływak

Ogólne równanie równowagi sił działających na pływak, zawieszony w przepływającym płynie idealnym, można przedstawić następująco

$$\vec{G} + \vec{W} + \vec{K} = 0, \quad (5.1)$$

w którym:

$$\vec{G} = m\vec{g} = V_p \rho_p \vec{g} \text{ – ciężar pływaka,} \quad (5.2)$$

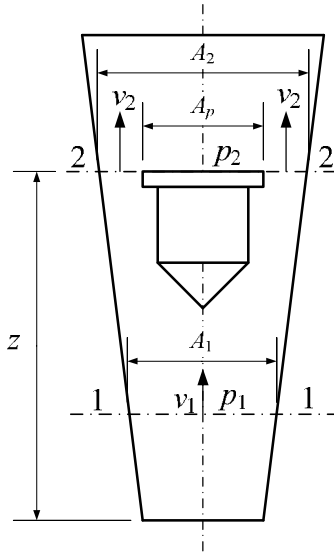
$$\vec{W} = V_p \rho_f \vec{g} \text{ – siła wyporu,} \quad (5.3)$$

$$\vec{K} = (p_1 - p_2) A_p \vec{n} \text{ – siła wynikająca z różnicy ciśnień statycznych.} \quad (5.4)$$

Uwzględniając w równaniu (5.1) zależności od (5.2) do (5.4) oraz wiedząc, że siła wyporu i siła wynikająca z różnicy ciśnień statycznych działają w kierunku przyływu, natomiast ciężar pływaka przeciwnie stąd:

$$V_p (r_p - r) g - (p_1 - p_2) A_p = 0, \quad (5.5)$$

w którym: V_p – to objętość pływaka, r_p – jego gęstość, r – gęstość płynu, A_p – przekrój poprzeczny pływaka, p_1 – ciśnienie w przekroju 1-1, a p_2 – ciśnienie w przekroju 2-2 (rys. 5.3).



Rys. 5.3. Parametry przepływu w rotametrze

Z równania (5.5) wyznacza się różnicę ciśnienia Dp_{12}

$$Dp_{12} = (p_1 - p_2) = \frac{V_p (r_p - r) g}{A_p}. \quad (5.6)$$

Pływak zawieszony w płynie powoduje przewężenie strugi. Stąd też, można w tym miejscu wykorzystać analogię do przepływu przez zwężkę pomiarową, opisaną w rozdziale 4. Stąd równanie na strumień objętości przepływającego płynu przez zwężkę pomiarową

$$q_v = a (A_2 - A_p) \sqrt{\frac{2 Dp_{12}}{r}}, \quad (5.7)$$

w którym A_2 oznacza pole przekroju rury w przekroju 2, $(A_2 - A_p) = A(z)$ jest polem przekroju przepływającego płynu zależnym od wysokości z , natomiast współczynnik a jest współczynnikiem przepływu zależnym od $\frac{(A_2 - A_p)}{A_1}$ i liczby Re . Podstawiając równanie (5.6) do równania (5.7) otrzymuje się zależność na strumień objętości przepływającego płynu przez rotametr w postaci

$$q_v = a A(z) \sqrt{\frac{2V_p (r_p - r) g}{r A_p}}. \quad (5.8)$$

W równaniu (5.8) współczynnik a uwzględnia siły, które nie występują w przepływie płynu idealnego m.in. tarcie powodujące straty energii. Stąd też energia w przekroju 2-2 jest mniejsza niż energia w przekroju 1-1 oraz na dolną powierzchnię pływaka działa siła pochodząca od naprężeń stycznych, wywołanych przepływem płynu lepkiego.

Równanie (5.8) przedstawia zależność strumienia objętości q_v od wysokości położenia pływaka w rotametrze – wartość pola przekroju $A(z)$ wzrasta ze wzrostem wysokości z . Jeżeli znany jest przekrój rury oraz znana jest zależność współczynnika przepływu a od liczby Re dla tej rury oraz pływaka, można wtedy wyznaczyć podziałkę rotametu.

W przypadku, w którym chcemy wykonać pomiar strumienia objętości płynu o innych parametrach (oznaczonych w równaniach indeksem x), wtedy należy wyznaczyć współczynnik poprawkowy k

$$q_{vx} = k q_v. \quad (5.9)$$

W równaniu (5.9) q_{vx} to strumień objętości w warunkach pomiaru, natomiast q_v to odczyt z podziałki rotametu. Wartość współczynnika poprawkowego k oblicza się z równania (5.10)

$$k = \frac{a_x}{a} \sqrt{\frac{r (r_p - r_x)}{r_x (r_p - r)}}. \quad (5.10)$$

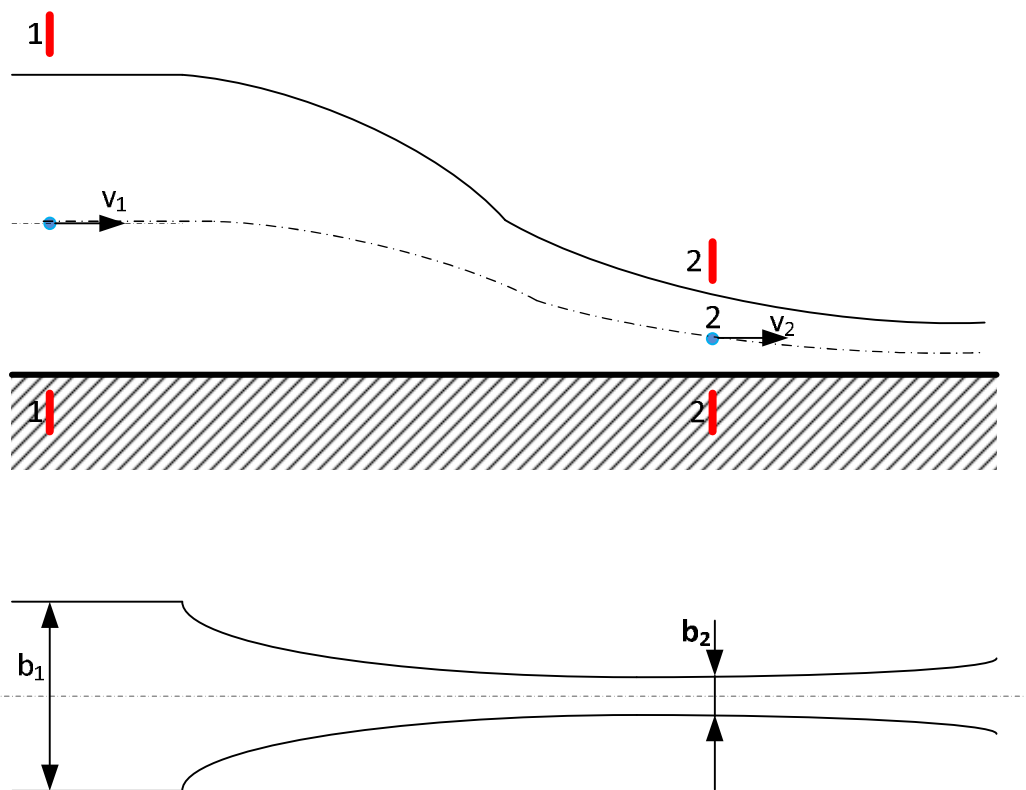
W przypadku pomiaru tego samego płynu o różnych parametrach w równaniu (5.10) $a_x/a \gg 1$, natomiast dla gazów współczynnik poprawkowy k oblicza się na podstawie równania (5.11)

$$k = \sqrt{\frac{r}{r_x}}. \quad (5.11)$$

gdzie: r - gęstość gazu w warunkach wzorcowania, r_x - gęstość gazu w warunkach wykonywanego pomiaru.

6. Pomiar strumienia objętości przepływającej cieczy za pomocą koryta mierniczego

Koryto miernicze znajduje zastosowanie do pomiaru strumienia objętości cieczy w kanałach otwartych. Powstaje ono poprzez zabudowanie w kanale otwartym zwężenia powodującego wzrost prędkości przepływającej cieczy. W celu wyjaśnienia zasady działania koryta mierniczego wybrano na jego długości dwa przekroje poprzeczne 1-1 i 2-2 (rys. 6.1)



Rys. 6.1. Koryto miernicze Venturiego.

Przekrój 1-1 położony jest przed zwężeniem natomiast przekrój 2-2 leży w zwężeniu. Zakładając ustalony ruch cieczy zapisano uogólnione równanie Bernoulliego w postaci

$$h_1 + a_1 \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + a_2 \frac{v_2^2}{2g} + Dh_{12}^s \quad (6.1)$$

Wysokości h_1 i h_2 reprezentują głębokość odpowiednio w przekroju 1-1 i 2-2. W celu wyznaczenia z równania (6.1) strumienia objętości przepływającej cieczy zastosowane zostaną dwa uproszczenia. Jeżeli przekroje 1-1 i 2-2 oddalone są od siebie o niewielką odległość to straty hydrauliczne pomiędzy tymi przekrojami można pominąć. Dodatkowo ze względu na duże pole przekroju 1-1 wysokość prędkości w tym przekroju jest znacząco mniejsza od wysokości położenia h_1 , czyli spełniony jest warunek

$$\frac{a_1 \frac{v_1^2}{2g}}{h_1} \ll 1 \quad (6.2)$$

stąd człon wysokości prędkości w przekroju 1 w równaniu (6.1) może zostać pominięty. Po podstawieniu do wzoru (6.1) prędkość v_2 wyznaczoną z równania ciągłości przepływu otrzymamy

$$h_1 = h_2 + a_2 \frac{\left(\frac{q_v}{h_2 b_2}\right)^2}{2g}, \quad (6.3)$$

a po przekształceniu wyznaczony zostanie strumień objętości w postaci

$$q_{vt} = h_2 b_2 \sqrt{\frac{2g}{a_1} (h_1 - h_2)}. \quad (6.4)$$

Z równania (6.4) wynika, że do wyznaczenia strumienia objętości konieczny jest pomiar dwóch wysokości przed przewężeniem i w przewężeniu. Jest to niedogodność, która komplikuje pomiar strumienia objętości i jest źródłem dodatkowych błędów pomiaru. Stąd zastosowano przewężenie o specjalnej geometrii powodujące przejście ruchu spokojnego przed przewężeniem w ruch rwący w przewężeniu. Koryto takie nazywa się korytem mierniczym Venturiego.

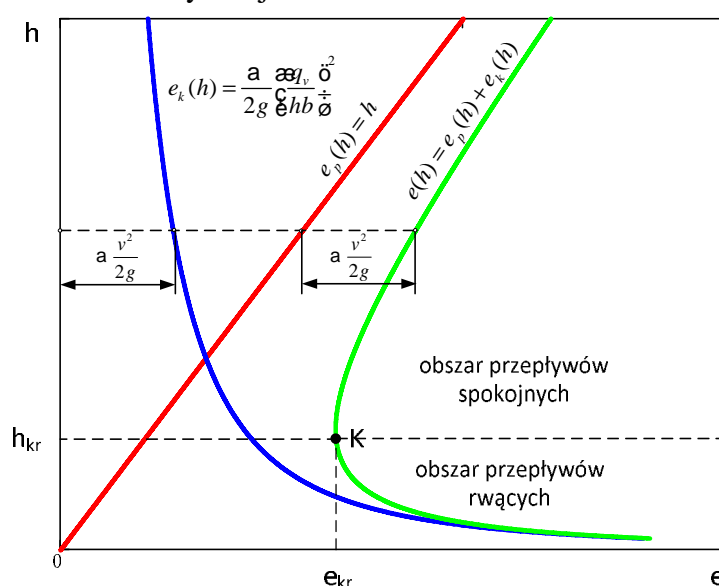
Energia rozporządzalna w dowolnym przekroju kanału wynosi

$$e = h + a \frac{v^2}{2g} \quad (6.5)$$

gdzie h reprezentuje energię potencjalną położenia e_p , natomiast $a \frac{v^2}{2g}$ energię kinetyczną e_k ruchu cieczy. Po podstawieniu do (6.5) równania ciągłości przepływu otrzymamy

$$e = h + a \frac{\left(\frac{q_v}{hb}\right)^2}{2g} = e_p + e_k \quad (6.6)$$

Z równania (6.6) wynika, że zarówno energia potencjalna położenia jak i energia kinetyczna ruchu zależna jest od wysokości h . Przy czym energia potencjalna położenia zależy liniowo od h , natomiast energia kinetyczna ruchu jest funkcją hiperboliczną. Na rys. 6.2 linią w kolorze czerwonym przedstawiono energię potencjalną położenia, linią w kolorze niebieskim energię kinetyczną ruchu, a linią w kolorze zielonym całkowitą energię rozporządzalną. Charakterystyka w kolorze zielonym przedstawiająca całkowitą energię rozporządzalną otrzymana została poprzez graficzne zsumowanie w poziomie funkcji energii potencjalnej położenia oraz kinetycznej ruchu.



Rys. 6.2. Zależność energii potencjalnej położenia, energii kinetycznej ruchu oraz całkowitej energia rozporządzalnej w zależności od głębokości

Z rysunku 6.2 wynika, że jeśli $h \in [0, h_{kr}]$ to $e \in [e_{kr}, e_{max}]$ oraz jeśli $h \in [h_{kr}, h_{max}]$ to również $e \in [e_{kr}, e_{max}]$. Oznacza to, że na krzywej reprezentującej całkowitą energię rozporządzalną znajduje się minimum funkcji, w którym energia osiąga najmniejszą wartość przy wysokości h zmieniającej się od 0 do h_{max} . Minimum to występuje w punkcie K, który nazywa się punktem krytycznym. W punkcie krytycznym występują tzw. parametry krytyczne czyli wysokość krytyczna h_{kr} oraz energia krytyczna e_{kr} . Linia pozioma przechodząca przez punkt K rozdziela obszar przepływów spokojnych i rwących. Powyżej h_{kr} występują przepływy spokojne, natomiast poniżej h_{kr} przepływy rwące. Ze wzrostem głębokości energia rozporządzalna maleje w przepływach rwących, natomiast w przepływach spokojnych rośnie. W celu wyznaczenia wysokości krytycznej należy obliczyć minimum funkcji danej wzorem (6.6)

$$\frac{de}{dh} = 1 - \frac{b}{(bh)^3} a \frac{q_v^2}{g} = 0 \quad (6.7)$$

po rozwiązaniu równania (6.7) ze względu na h otrzymamy wysokość krytyczną

$$h = h_{kr} = \sqrt[3]{\frac{a q_v^2}{g b^2}} \quad (6.8)$$

Ze wzoru (6.8) wynika, że wysokość krytyczna jest zależna od strumienia objętości. W przypadku jeśli w przewężeniu koryta nastąpi zmiana ruchu ze spokojnego w rwący oznacza to, że w jakimś przekroju poprzecznym zwężenia energia rozporządzalna osiągnęła wartość minimalną (punkt K), a wysokość odpowiada wysokości krytycznej h_{kr} . Stąd wysokość h_2 w równaniu Bernoulliego (6.1) może zostać zastąpiona wysokością krytyczną i po przyjęciu tych samych uproszczeń co poprzednio wyznaczony strumień objętości

$$q_{v1} = \frac{1}{a_2} b_2 \sqrt{g} \frac{a_2}{c_2^3} h_1^{\frac{3}{2}} \quad (6.9)$$

Równanie (6.4) przedstawia strumień objętości w przypadku kiedy nie zachodzi zmiana rodzaju ruchu, natomiast równanie (6.9) ze zmianą rodzaju ruchu. Łatwo zauważyć, że w (9) występuję tylko jedna wysokość przed przewężeniem, przez co upraszcza się zasada pomiaru strumienia objętości z wykorzystaniem koryta mierniczego Venturiego. Żeby zapewnić zmianę ruchu ze spokojnego w rwący przewężenie w korycie mierniczym Venturiego musi mieć specjalną konstrukcję.

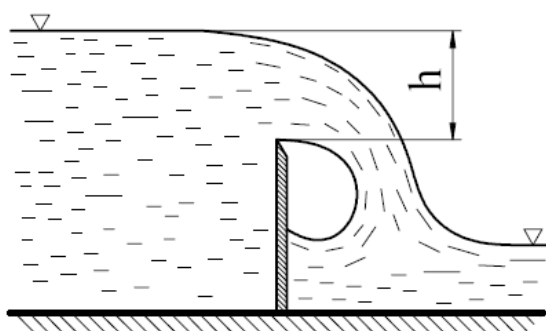
Do wyprowadzenia równania (6.9) zastosowano pewne uproszczenia polegające między innymi pominięciu strat hydraulicznych i wysokości prędkości w przekroju 1-1. Stąd w celu otrzymania rzeczywistego strumienia objętości równanie (6.9) musi być przemnożone przez współczynnik przepływu

$$q_v = m b_2 \sqrt{g} \frac{a_2}{c_2^3} h_1^{\frac{3}{2}} \quad (6.10)$$

Występujący w równaniu (6.10) współczynnik przepływu m uwzględnia pominięte wielkości (straty hydrauliczne i wysokości prędkości w przekroju 1) oraz nierównomierny rozkład energii kinetycznej w przekroju poprzecznym (współczynnik Coriolisa α_2). Dodatkowo współczynnik przepływu m zależy od geometrii przewężenia koryta (stosunku szerokości koryta do części zwężonej, długości przewężenia, chropowatości ścianek), ale także od właściwości fizycznych cieczy (lepkości, napięcia powierzchniowego). Współczynnik przepływu m przedstawia stosunek rzeczywistego strumienia objętości do strumienia objętości wyznaczonego dla płynu idealnego (z równania Bernoulliego bez strat).

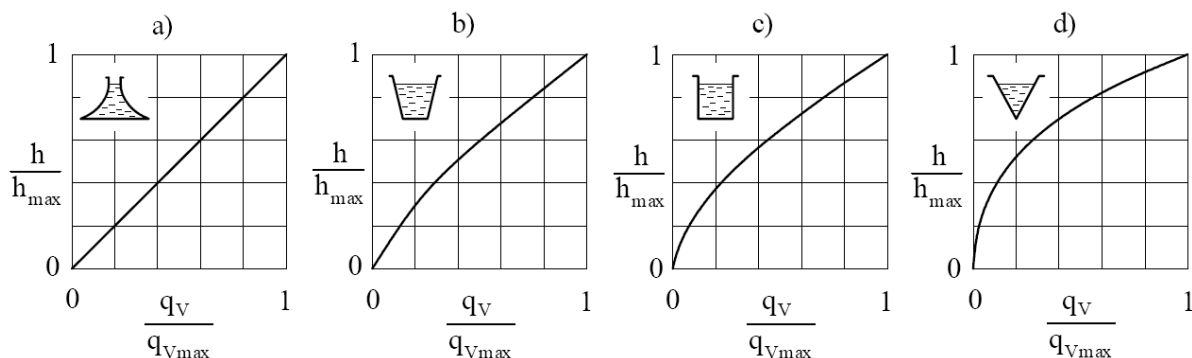
7. Pomiar strumienia objętości przepływającej cieczy za pomocą przelewu mierniczego

Przelew mierniczy jest przegradą ustawioną w poprzek przewodu otwartego służącą do pomiaru strumienia objętości. Wysokość strugi przelewowej h , mierzona w przekroju, w którym zaczyna się silniejszy spadek powierzchni swobodnej, nazywamy wysokością spiętrzenia (rys. 7.1).



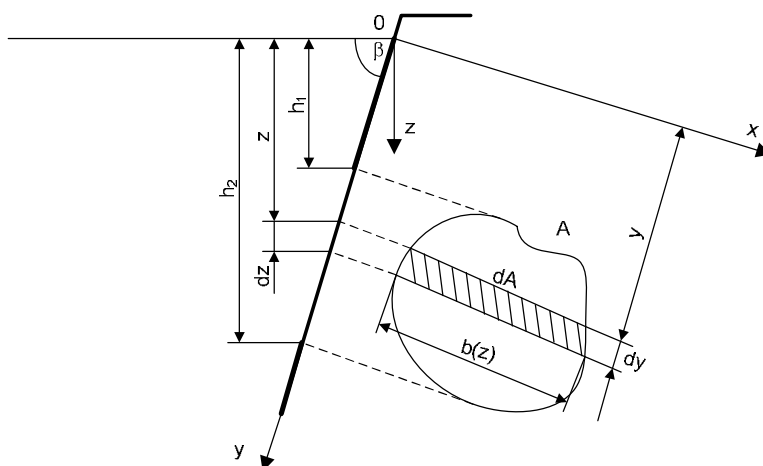
Rys. 7.1. Przelew mierniczy

Kształt strugi przelewowej zależy przede wszystkim od kształtu otworu, wysokości spiętrzenia strugi h oraz od warunków zewnętrznych normujących ruch (np. doprowadzenie powietrza pod strugę). Przelew mierniczy to ostro brzeżny przelew niezatopiony, w którym struga przelewowa opada swobodnie, nie zwilżając ściany przelewu położonej po stronie wody dolnej. Wysokość spiętrzenia zależy od wartości mierzonego strumienia objętości $h = f(q_v)$. Krzywa przedstawiająca tę zależność, dla przelewu o określonym kształcie i wymiarach geometrycznych nazywa się charakterystyką przelewu. Przykładowe bezwymiarowe charakterystyki przedstawiono na rys. 7.2.



Rys. 7.2. Bezwymiarowe charakterystyki przelewów mierniczych

Strumień objętości wypływającej cieczy oblicza się tak, jak dla wypływu cieczy przez duży otwór. W takim przypadku prędkość wypływu jest zmienna i zależy od głębokości zanurzenia otworu pod powierzchnią cieczy (współrzędna z). Na rys. 7.3 przedstawiono elementarne pole dA , znajdujące się na głębokości z , przez które wypływa z prędkością v elementarny strumień objętości dq_v . W ogólnym przypadku szerokość dużego otworu może zmieniać się z głębokością, co opisane jest zależnością $b(z)$.



Rys. 7.3. Wypływ przez duży otwór

Z równania ciągłości przepływu elementarny strumień objętości wynosi

$$dq_v = \mu v dA, \quad (7.1)$$

gdzie: μ – współczynnik przepływu przelewu (uwzględniający m.in. rodzaj krawędzi, lepkość płynu), v – prędkość wypływu, dA – elementarne pole powierzchni.

Po podstawieniu do równania (7.1) wzoru Torricellego na prędkość wypływu $v = \sqrt{2gz}$ oraz zależności $dA = b(z) dy$ otrzymamy

$$dq_v = \mu b(z) \sqrt{2gz} dy, \quad (7.2)$$

Przechodząc ze współrzędnej y na z wzór (7.2) będzie miał postać

$$dq_v = \mu b(z) \sqrt{2gz} \frac{dz}{\sin \beta}, \quad (7.3)$$

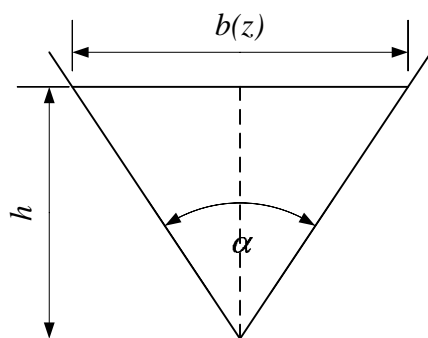
Dla przegrody ustawionej prostopadle do przepływu $\sin \beta = 1$, stąd otrzymujemy

$$dq_v = \mu b(z) \sqrt{2gz} dz, \quad (7.4)$$

Po obu stronach, scałkowaniu równania (7.4) i wyciągnięciu stałych przed całkę, mierzony strumień objętości wynosi

$$q_v = \mu \sqrt{2g} \int_0^h b(z) \sqrt{z} dz, \quad (7.5)$$

Kiedy np. otwór jest w kształcie prostokąta, wielkość $b(z)$ jest stała i podstawiamy za nią szerokość prostokąta b . W przypadku kształtu trójkątnego szerokość przelewu opisana jest funkcją liniową o równaniu $b(z) = b(h - z)/h$ (rys. 7.4).



Rys. 7.4. Przykład otworu w kształcie trójkąta