

Ćw. 13 A. PRZEPIYWOMIERZE ZWĘŻKOWE B. WSPÓLCZYNNIK STRATY HYDRAULICZNEJ

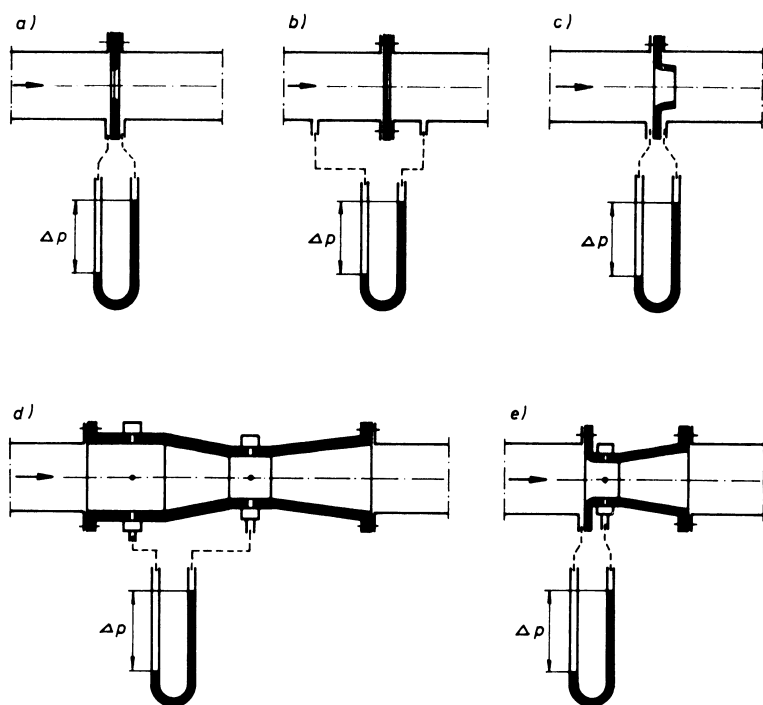
Część A. PRZEPIYWOMIERZE ZWĘŻKOWE

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest: a) zapoznanie się z zasadą pomiaru wydatku przepływomierzami zwężkowymi, b) wzorcowanie zwężki Venturiego oraz kryzy zastosowanych do pomiaru wydatku wody.

2. Podstawy teoretyczne

Przepływomierze zwężkowe służą do wyznaczania natężenia przepływu (wydatku) płynu na podstawie pomiaru różnicy ciśnień na zwężce.



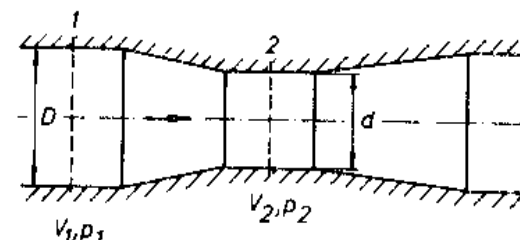
Rys. A.1. Przepływomierze zwężkowe: a) kryza ISA z pomiarem przytarczowym, b) kryza ISA z pomiarem "vena contracta" (łac. struga przewężona), c) dysza przepływowa ISA, d) zwężka Venturiego, e) dysza Venturiego.

Należą do nich (rys. A.1): a) kryza ISA z pomiarem przytarczowym, b) kryza ISA z pomiarem "vena contracta" (łac. struga przewężona), c) dysza

przepływowa ISA, d) zwężka Venturiego, e) dysza Venturiego. Ponadto pomiaru natężenia przepływu płynu można dokonywać za pomocą przepływowej kryzy segmentowej (z prostoliniową krawędzią wlotową), dopływowej kryzy ISA lub dyszy ISA, wypływowej kryzy ISA, dyszy ISA czy kryzy segmentowej.

Przepływomierze zwężkowe są przedmiotem normy PN-65/M-53950. Przepływomierz wykonany, zainstalowany i stosowany zgodnie z normą nie podlega wzorcowaniu.

Zasadę działania przepływomierza zwężkowego rozpatrzmy na przykładzie klasycznej zwężki Venturiego (rys. A.2).



Rys. A.2. Zwężka Venturiego

Jeśli przepływającym płynem jest ciecz, to przyjmując model płynu nieściśliwego ($\rho = \text{const}$ i nielepkiego (brak strat hydraulicznych) oraz zakładając, że przepływ jest jednowymiarowy można wykorzystać równanie ciągłości i energii w postaci

$$V_1 D^2 = V_2 d^2 \quad (1)$$

$$\frac{V_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{V_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} \quad (2)$$

Wprowadzając tzw. moduł zwężki

$$m = \left(\frac{d}{D}\right)^2 \quad (3)$$

otrzymany z równań (1) i (2) wyrażenie na wydatek teoretyczny (objętościowy) Q_t w postaci

$$Q_t = \frac{m}{\sqrt{1 - m^2}} \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} \quad (4)$$

gdzie: $\Delta p = p_1 - p_2$.

Jeśli płynem przepływającym przez zwężkę jest gaz (płyn ściśliwy) to odpowiednie równania ciągłości i energii przybierają postać

$$\rho_1 V_1 D^2 = \rho_2 V_2 d^2 \quad (5)$$

$$\frac{V_1^2}{2} + \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{V_2^2}{2} + \frac{k}{k-1} \frac{p_2}{\rho_2} \quad (6)$$

gdzie $k = \frac{c_p}{c_v}$ - stosunek ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu i objętości.

Wykorzystując równanie izentropy (przepływ bez strat) dla przekrojów 1 i 2

$$\frac{p_1}{\rho_1^k} = \frac{p_2}{\rho_2^k}, \quad (7)$$

otrzymamy po przekształceniach zależność na wydatek objętościowy w postaci

$$Q_t = m \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] / \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{2}{k}} - m^2 \right]} \quad (8)$$

Wprowadzając oznaczenie $\Delta p = p_1 - p_2$ można wzór (3.8) przekształcić do postaci analogicznej do wzoru (3.4):

$$Q_t = \frac{m}{\sqrt{1-m^2}} \frac{\pi D^2}{4} \varepsilon \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho_1}} \quad (9)$$

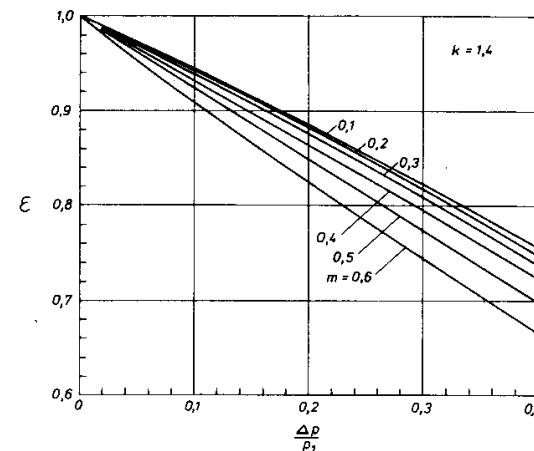
gdzie liczba ekspansji ε wyraża wpływ ściśliwości gazu i wynosi

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\frac{k}{k-1} \frac{1}{\Delta p} \left(1 - \frac{\Delta p}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} \left[1 - \left(1 - \frac{\Delta p}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}{1 - m^2 \left(1 - \frac{\Delta p}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}}}} \quad (10)$$

Zależność $\varepsilon = f \left(m, \frac{\Delta p}{p_1} \right)$ dla powietrza ($k = 1,4$) pokazano na rys. A.3.

Należy zaznaczyć, że wzór (10), oprócz zwężki Venturiego, jest słuszny także dla dyszy ISA i dyszy Venturiego. W przypadku kryzy ISA z pomiarem przytarczowym liczba ekspansji ε może być wyznaczona ze wzoru empirycznego

$$\varepsilon = 1 - (0,3707 + 0,3184 m^2) \left[1 - \left(1 - \frac{\Delta p}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} \right]^{0,935} \quad (11)$$



Rys. A.3 Zależność liczby ekspansji od różnicy ciśnień w zwężce

Należy przypomnieć, że przy wyprowadzaniu zależności (4) i (9) nie uwzględniono strat przepływu oraz niejednorodnego rozkładu prędkości. Z tych powodów objętościowy wydatek rzeczywisty płynu przepływającego przez zwężkę jest mniejszy od teoretycznego i wynosi

$$Q = K Q_t \quad (12)$$

gdzie K jest współczynnikiem zwężki.

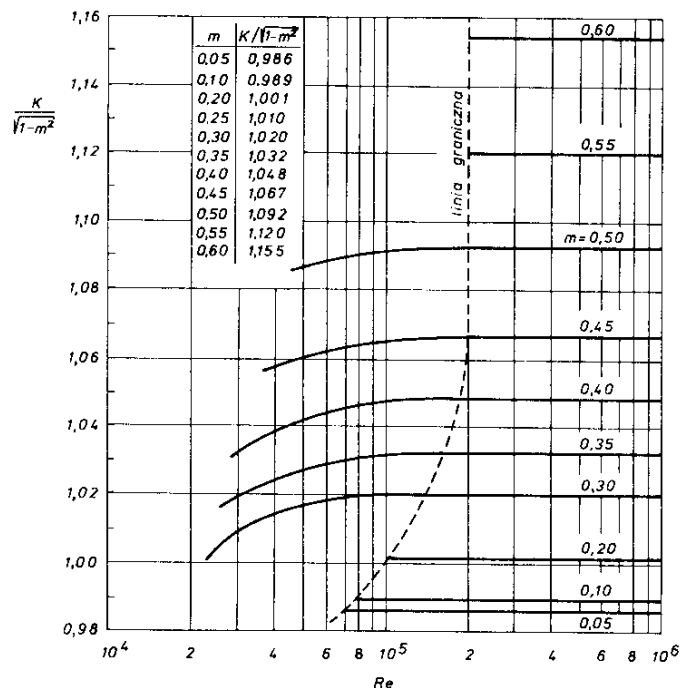
Odpowiednio wydatek masowy wyrazi się zależnością

$$Q_m = K \rho_1 Q_t \quad (13)$$

W ogólnym przypadku K zależy od rodzaju i modułu zwężki oraz liczby Reynoldsa.

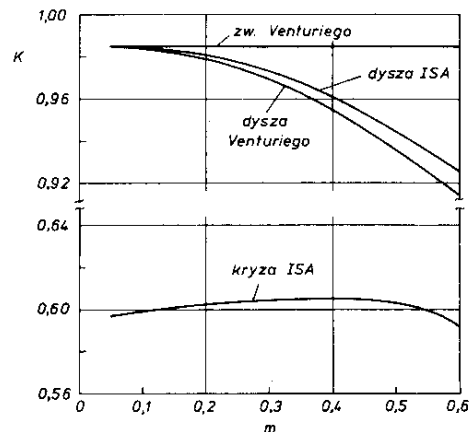
$$K = f(\text{rodzaj zwężki}, m, Re)$$

Przykładową zależność dla dyszy Venturiego pokazano na rys. 4 (wielkość $K / \sqrt{1 - m^2}$ zamiast K pozwala na uzyskanie lepszej rozdzielczości wykresu). Jak widać, powyżej pewnej wartości granicznej $Re_{gr} = f(m)$ wartość K nie zależy od Re (lub może być przyjęta za stałą w przypadku innych zwężek). Stąd te wymiary instalacji pomiarowej dobiera się tak, aby spełnić warunek $Re > Re_{gr}$. Jeśli warunek ten nie jest spełniony, to do wyznaczenia wartości $K / \sqrt{1 - m^2}$ należy zastosować procedurę kolejnych przybliżeń.



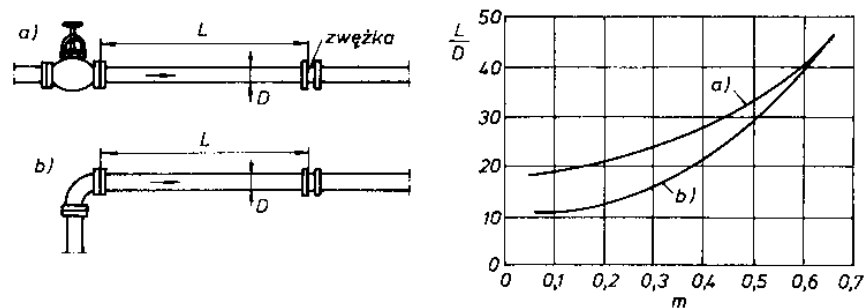
Rys. A.4. Zależność współczynnika zwężki Venturiego od jej modułu i liczby Reynoldsa

Wartości $K = f(m)$ dla różnych zwęzek, odpowiadające zakresowi, w którym K nie zależy od Re pokazano na rys. A.5. Zwraca uwagę mała wartość K (duże straty) dla kryzy ISA w porównaniu ze zwężką Venturiego (stała wartość $K = 0,985$), dyszą ISA i dyszą Venturiego.



Rys. 5. Zależność współczynnika zwężki od jej rodzaju oraz modułu

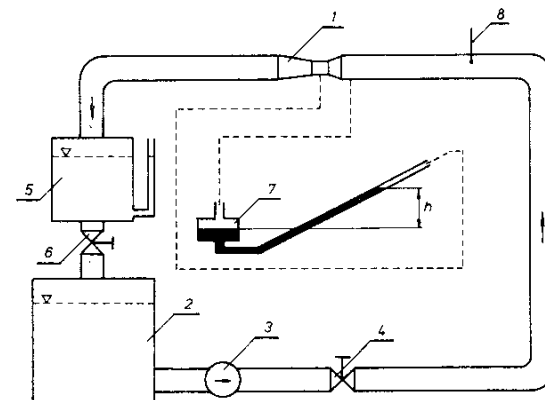
Oprócz dobrania wymiarów zwężki w zależności od zakresu pomiarowego, należy zapewnić odpowiednią długość odcinka przewodu przed zwężką (dla zapewnienia wyrównania rozkładów prędkości). Przykładowe wielkości L/D w zależności od m (dla instalacji z zaworem grzybkowym oraz za kolankiem) pokazano na rys. A.6. Dla pomiarów technicznych wartości L/D mogą być o 50% mniejsze.



Rys. A.6. Prawidłowe umiejscowienie zwężki na rurociągu

3. Stanowisko pomiarowe - Wzorcowanie zwężki lub kryzy dla cieczy

Stanowisko pomiarowe wykorzystywane do wzorcowania zwężki pomiarowej dla wody pokazano na rys. A.7. Badana zwężka (lub kryza) 1 zasilana jest wodą ze zbiornika 2 pompą 3 poprzez zawór regulacyjny 4. Rzeczywisty wydatek wody mierzy się za pomocą zbiornika 5 zaopatrzonego w wodowskaz i zawór odcinający 6. Różnicę ciśnień na zwężce (lub kryzie) mierzy manometr rtęciowy 7, natomiast temperaturę wody wskazuje termometr 8.



Rys. 7. Schemat stanowiska do wzorcowania zwężki dla cieczy

4. Wykonanie ćwiczenia

1. Zapisać wymiary zwężki lub kryzy do protokołu pomiarowego.
2. Włączyć pompę i zaworem 4 ustalić wydatek wody.
3. Odczytać wskazanie h manometru 7.
4. Zmierzyć czas τ napełniania zbiornika 5 (objętość $V_z = 5 \text{ l}$).
5. Powtórzyć pomiary dla pięciu różnych wskazań manometru (wydatku wody).
6. Odczytać temperaturę wody.
7. Wyznaczyć wydatek teoretyczny ze wzoru (4). Różnicę ciśnień Δp obliczyć jako $\Delta p = (\rho_{\text{Hg}} - \rho_{\text{H}_2\text{O}}) g h$, gdzie h wskazania manometru. Gęstość wody przyjąć $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$.
8. Obliczyć wydatek rzeczywisty $Q = V_z / \tau$ a następnie współczynnik zwężki lub kryzy

$$K = \frac{Q}{Q_t}$$

9. Obliczyć liczbę Reynoldsa

$$Re = \frac{V_l D}{\nu} = \frac{4Q}{\pi D \nu}$$

(Współczynnik lepkości kinematycznej ν odczytać dla zmierzonej temperatury wody.)

10. Powtórzyć obliczenia (punkty 7 ÷ 9) dla pozostałych pomiarów.
11. Wykonać wykres $K = f(Re)$.

Część B. WSPÓŁCZYNNIK STRATY HYDRAULICZNEJ

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie współczynnika liniowej straty hydraulicznej w przepływie nieściśliwym laminarnym i turbulentnym.

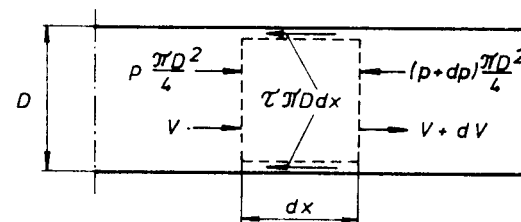
2. Podstawy teoretyczne

Przepływy płynów rzeczywistych przewodami cechuje występowanie strat energii w wyniku działania naprężeń stycznych przeciwdziałających ruchowi.

W rezultacie strumień energii maleje dla kolejnych, następujących w kierunku przepływu, przekrojów przewodu. W przypadku ogólnym, gdy w poszczególnych przekrojach strumienia występują wyraźne zróżnicowania pól prędkości, straty energii można określić dzieląc strumień płynu na elementarne strugi a następnie wyznaczając straty przepływu jako sumę elementarnych strat energii poszczególnych strug.

Jeśli przepływ ma charakter w pełni uformowany (profil prędkości w kolejnych przekrojach przewodu nie ulega zmianie) to straty przepływu można wyznaczyć korzystając z modelu przepływu jednowymiarowego. Z zasady zachowania pędu, zastosowanej do objętości kontrolnej płynu, wynika (porównaj rys. B.1)

$$V dV + \frac{dp}{\rho} + 4 \frac{\tau}{\rho} \frac{dx}{D} = 0. \quad (1)$$



Rys. B.1 Bilans pędu dla płynu w przewodzie

Naprężenie styczne τ występujące w tym równaniu można uzależnić od energii kinetycznej płynu, wyrażając siłę styczną na odcinku dx poprzez równoważną siłę ciśnieniową

$$\tau \pi D dx = dp \frac{\pi D^2}{4}. \quad (2)$$

Na podstawie analizy wymiarowej można różniczkę ciśnienia dp zapisać jako

$$dp = \lambda \frac{dx}{D} \frac{\rho V^2}{2}, \quad (3)$$

gdzie λ współczynnik liniowej straty hydraulicznej (wielkość bezwymiarowa).

Z porównania zależności (2) i (3) wynika, że

$$\tau = \frac{\lambda}{4} \frac{\rho V^2}{2}.$$

Wprowadzając tę wartość do równania pędu (1) otrzymamy ostatecznie

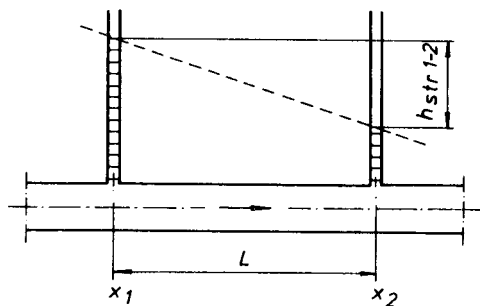
$$V dV + \frac{dp}{\rho} + \lambda \frac{V^2}{2} \frac{dx}{D} = 0. \quad (4)$$

w przypadku płynu nieściśliwego ($\rho = \text{const}$) i ruchu ustalonego ($V = \text{const}$) z równania (7.4) otrzymamy po scałkowaniu

$$p_1 - p_2 = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} = \rho g h_{str\ 1-2}, \quad (5)$$

gdzie: $p_1 - p_2 = \Delta p$ - jest stratą ciśnienia odcinka L poziomego rurociągu,

$h_{str\ 1-2}$ - "wysokość stracona", jest tradycyjną formą przedstawiania strat w obliczeniach rurociągów porównaj rys. B.2.



Rys. B.2. Strata hydrauliczna

Po przekształceniu (7.5) wyrażenie na współczynnik liniowej straty hydraulicznej przybiera postać

$$\lambda = \frac{2 \Delta p}{\rho V^2} \cdot \frac{D}{L} \quad (6)$$

W przypadku przepływu laminarnego ($Re < Re_{krI}$) straty przepływu można określić analitycznie korzystając z prawa Hagen-Poiseuille'a

$$\lambda = \frac{64}{Re}.$$

Dla przepływu turbulentnego ($Re > Re_{krII}$) współczynnik liniowej straty hydraulicznej określają wzory empiryczne wynikające z analizy wymiarowej

$$\lambda = k_1 + k_2 Re^{b_2} + k_3 Re^{b_3} + \dots$$

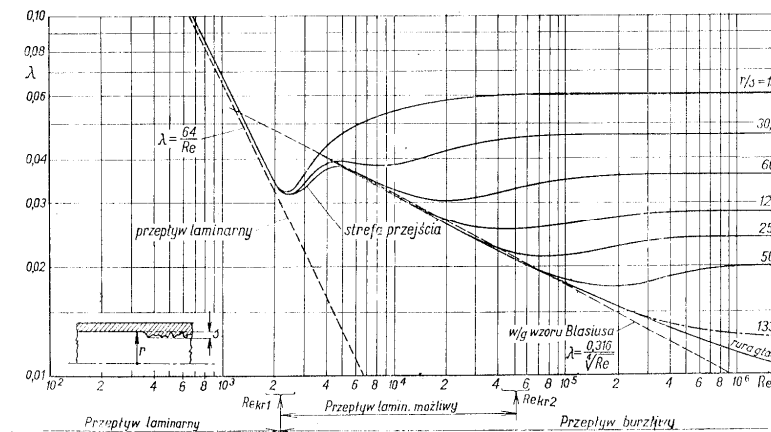
Dla $Re < 80\ 000$ współczynnik λ dobrze określa empiryczny wzór Blasiusa

$$\lambda = 0,316 \cdot Re^{-0,25},$$

$$(k_1 = k_3 = 0, \quad k_2 = 0,316, \quad b_2 = -0,25).$$

Dla większych Re , do ok. $1,5 \cdot 10^6$, można użyć wzoru Schillera-Hermana

$$\lambda = 0,0054 + 0,396 Re^{-0,3}.$$

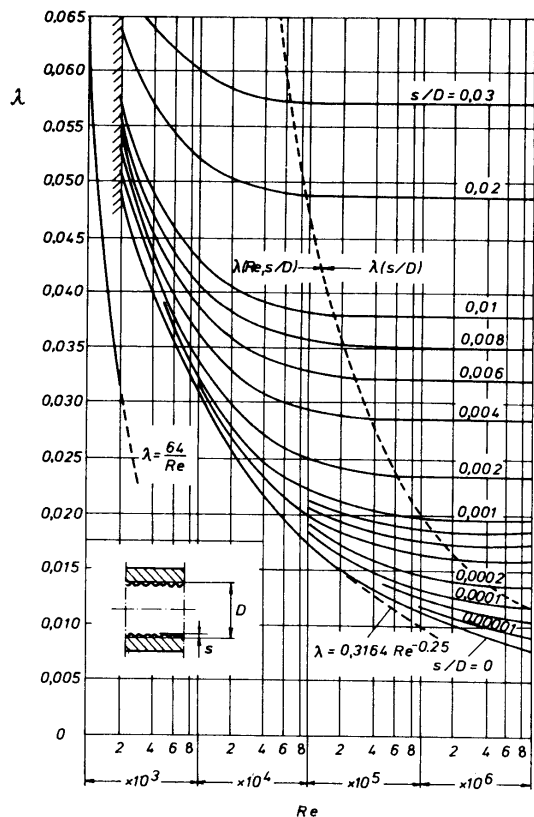


Rys. B.3a. Wykres współczynnika liniowej straty hydraulicznej od szorstkości rury i liczby Reynoldsa - wg Nikuradsego (przypadek rur o szorstkości kalibrowanej)

We wszystkich przypadkach dla obliczenia liczby Reynoldsa przyjmujemy jako wymiar charakterystyczny średnicę przewodu D

$$Re = \frac{VD}{\nu}.$$

Powyższe wzory empiryczne słuszne są jedynie w przypadku przewodów gładkich. Charakter zależności $\lambda(Re)$, w przypadku przepływów przewodami szorstkimi, pokazano na rys. 7.3 dla różnych wartości chropowatości względnej s/D . Wykresy takie uzyskuje się na drodze doświadczalnej.



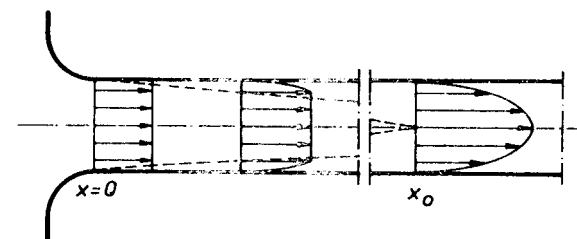
Rys. B.3b. Zależność współczynnika liniowej straty hydraulicznej od szorstkości rury i liczby Reynoldsa - dla rur przemysłowych

Przy przepływie płynu przewodami o przekroju innym niż kołowy, liczbę Reynoldsa należy określić korzystając z tzw. promienia hydraulicznego przewodu ($R_h = 2F/O$; gdzie F - pole przekroju przewodu, O - obwód zwilżony). Jak wymiar liniowy do liczby Reynoldsa należy podstawić wtedy cztery promienie hydrauliczne $Re = \frac{4 R_h V}{\nu}$.

2.3. Odcinek początkowy

Rys. 7.4 przedstawia rurę o zaokrąglonym wlocie, przez którą płyn wypływa ze zbiornika. W przekroju początkowym ($x = 0$) profil prędkości jest prostokątny. W kolejnych przekrojach elementy płynu w pobliżu ścianki ulegają przyhamowaniu w wyniku tarcia. Z kolei w otoczeniu osi rury (w tzw. rdzeniu) prędkość płynu wzrasta, co wynika z warunku ciągłości. Na odcinku

$x < x_0$ ma miejsce formowanie się profilu prędkości, charakterystycznego dla danego (laminarnego lub turbulentnego) rodzaju przepływu; tę część przewodu nazywa się odcinkiem początkowym. Dla $x > x_0$ profil prędkości nie ulega już zmianie, taki przepływ nazywamy uformowanym lub w pełni wykształconym.



Rys. B.4. Rozkłady prędkości w odcinku początkowym rury (przepływ laminarny)

Długość odcinka początkowego wyraża się dla przepływu laminarnego zależnością

$$x_0 / D = 0,029 Re$$

a dla turbulentnego

$$x_0 / D = \frac{2,45}{\sqrt{\lambda}}$$

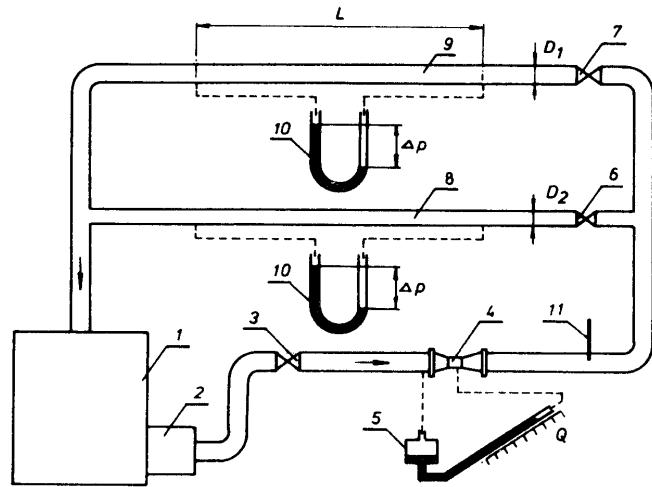
We wzorach tych wielkości Re i λ odnoszą się do przepływu uformowanego.

Na odcinku formowania się przepływu współczynnik liniowej straty hydraulicznej jest inny niż dla przepływu uformowanego.

3. Stanowiska pomiarowe

Do wyznaczenia współczynnika λ dla przepływu turbulentnego wody posłużymy się stanowiskiem pokazanym na rys. 7.5. Woda ze zbiornika 1 tłoczona jest pompą 2 poprzez zawór regulacyjny 3 przewodem z zainstalowaną zwężką Venturiego 4 do odcinka pomiarowego rury 8 lub 9, skąd powraca do zbiornika 1. Wyboru rury o średnicy D_1 lub D_2 dokonujemy poprzez zamknięcie zaworu 6 lub 7. Wydatek wody Q mierzony jest za pomocą zwężki Venturiego 4 połączonej z manometrem 5 lub bezpośrednio mierząc czas napełniania zbiornika 1. Spadek ciśnienia Δp na odcinku L rury pomiarowej

mierzony jest manometrem rtęciowym 10. Temperaturę wody wskazuje termometr 11.



Rys. 7.5. Schemat stanowiska do wyznaczenia współczynnika λ dla wody (dla przepływów turbulentnych)

4. Wykonanie ćwiczenia

4.1. Wyznaczenie współczynnika λ dla przepływów turbulentnych

1. Otworzyć jeden z zaworów (6 lub 7), włączyć pompę 2.
2. Za pomocą zaworu 3 ustalić wydatek wody i odczytać jego wartość na manometrze 5.
3. Odczytać wskazania manometru 10.
4. Czynności 2 i 3 powtórzyć dla pięciu różnych wydatków.
5. Wykonać pomiary wg p. 1÷4 dla drugiego przewodu.
6. Zamknąć zawór 3, wyłączyć pompę.
7. Odczytać temperaturę wody (termometr 11).
8. Wyznaczyć wartości współczynnika λ wg wzoru (6) ($V = 4 Q / \pi D^2$).
Obliczyć odpowiadające im wartości liczby Reynoldsa

$$Re = \frac{V D}{\nu}$$

Wartość ν należy odczytać dla danej temperatury.

9. Nanieść otrzymane wartości λ na wykres $\lambda(Re)$.

10. Zinterpretować otrzymane wyniki.