Ćw. 4 WSPÓŁCZYNNIK LINIOWEJ STRATY HYDRAULICZNEJ

1. Cel ćwiczenia

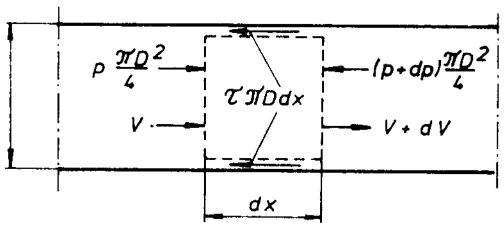
Celem ćwiczenia jest wyznaczenie współczynnika liniowej straty hydraulicznej w przepływie nieściśliwym laminarnym i turbulentnym.

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. 7.1)

$$V\,dV + \frac{dp}{\rho} + 4\,\frac{\tau}{\rho}\,\frac{dx}{D} = 0\,. \qquad (7.1)$$



Rys. 7.1. Bilans pędu dla płynu w przewodzie

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

$$\tau\,\pi D\;dx = dp\;\frac{\pi D^2}{4}\,. \qquad (7.2)$$

Na podstawie analizy wymiarowej można różniczkę ciśnienia $d\,p$ zapisać jako

$$dp = \lambda\,\frac{dx}{D}\,\frac{\rho V^2}{2}\,, \qquad (7.3)$$

gdzie λ współczynnik liniowej straty hydraulicznej (wielkość bezwymiarowa).

Z porównania zależności (7.2) i (7.3) wynika, że

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

Wprowadzając tę wartość do równania pędu (7.1) otrzymamy ostatecznie

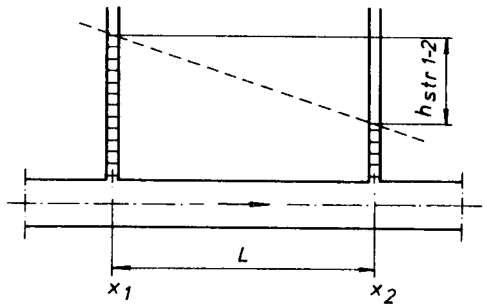
$$V\,dV + \frac{dp}{\rho} + \lambda\,\frac{V^2}{2}\,\frac{dx}{D} = 0\,. \qquad (7.4)$$

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

$$p_1 - p_2 = \lambda\,\frac{L}{D}\,\frac{\rho V^2}{2} = \rho\,g\,h_{str\,1\text{-}2}\,, \qquad (7.5)$$

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

$h_{str\,1\text{-}2}$ - "wysokość stracona", jest tradycyjną formą przedstawiania strat w obliczeniach rurociągów porównaj rys. 7.2.



Rys. 7.2. Strata hydrauliczna

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

$$\lambda = \frac{2\,\Delta p}{\rho V^2} \cdot \frac{D}{L} \quad (7.6)$$

W przypadku przepływu laminarnego $(Re < Re_{kr\,I})$ straty przepływu można określić analitycznie korzystając z prawa Hagena-Poiseuille'a

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

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

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

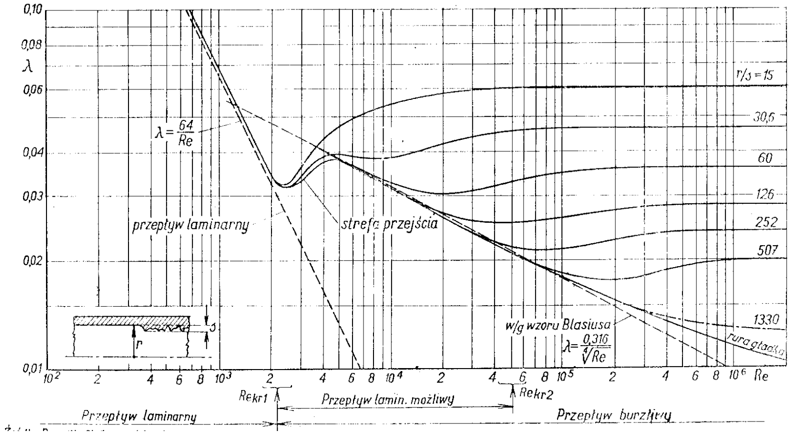
Dla $Re < 80\,000$ współczynnik λ dobrze określa empiryczny wzór Blasiusa

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

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

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

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

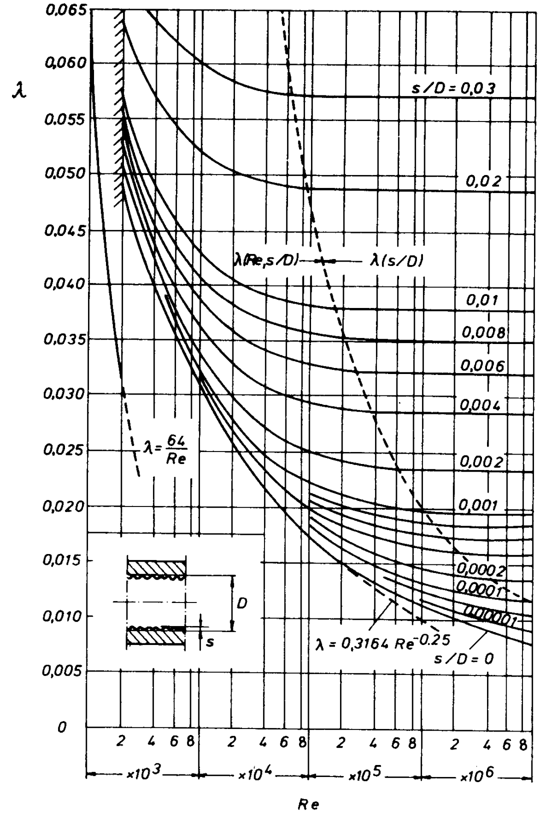


Rys. 7.3a. Wykres współczynnika liniowej straty hydraulicznej od szorstkości rury i liczby Reynoldsa - wg Nikuradsego (przypadek rur o szorstkości kalibrowanej)

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

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

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.

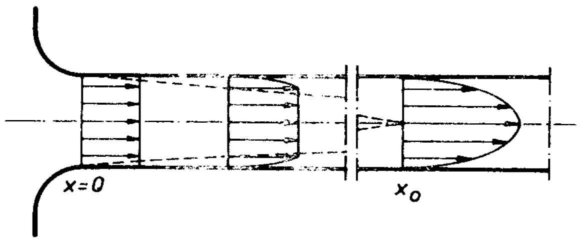


Rys. 7.3b. Zależność współczynnika liniowej straty hydraulicznej od szorstkości rury i liczby Reynoldsa - dla rur przemysłowych

Przy przepływie płynu przewodami o przekroju innym niż kołowy, liczbę Reynoldsa należy określić korzystając z tzw. promienia hydraulicznego przewodu ($R_h = 2\,F\,/\,O$; 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 $x < x_o$ ma miejsce formowanie się profilu prędkości, charakterystycznego dla danego (laminarnego lub turbulentnego) rodzaju przepływu; tę część przewodu nazywa się odcinkiem początkowym. Dla $x > x_o$ profil prędkości nie ulega już zmianie, taki przepływ nazywamy uformowanym lub w pełni wykształconym.



Rys. 7.4. Rozkłady prędkości w odcinku początkowym rury

Długość odcinka początkowego wyraża się dla przepływu laminarnego zależnością

$$x_o / D = 0{,}029 \ Re$$

a dla turbulentnego

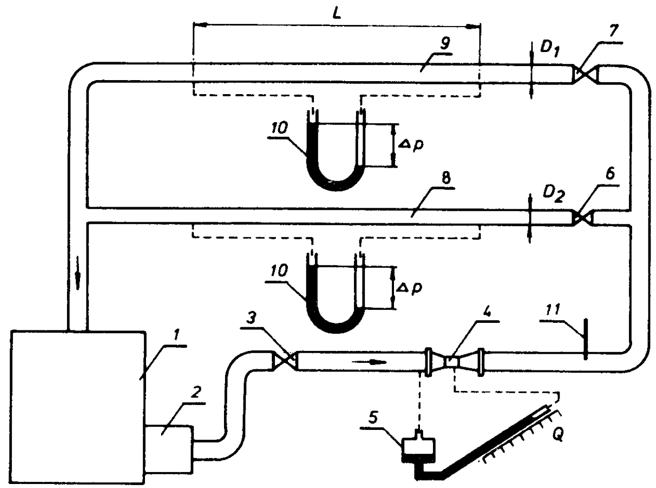
$$x_o / D = \frac{2{,}45}{\sqrt{\lambda}} \ .$$

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.

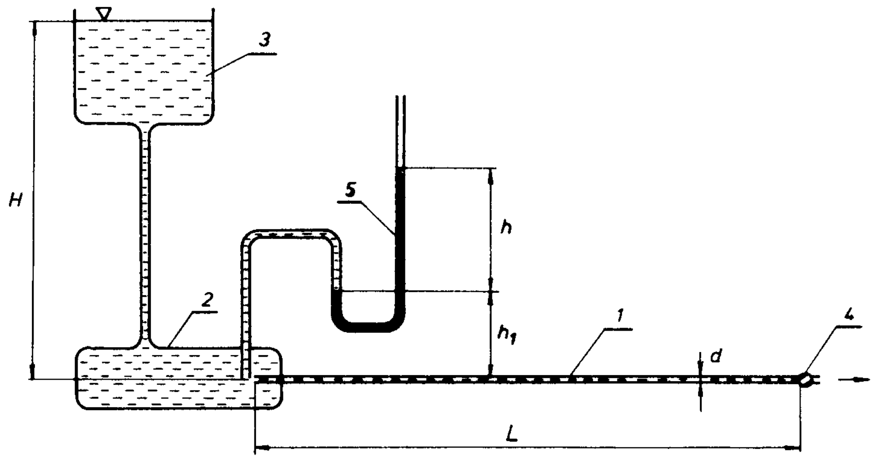
3. Stanowiska pomiarowe

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 wyznaczania współczynnika λ dla wody (dla przepływów turbulentnych)

Schemat stanowiska pomiarowego dla wyznaczania współczynnika λ dla wody w przypadku przepływów laminarnych przedstawia rys. 7.6. Stanowisko składa się z poziomej rurki pomiarowej 1 o średnicy d i długości L, zbiorniczka wyrównawczego 2, zbiornika z wodą 3 o zmiennym położeniu H, zaworu wylotowego 4 i manometru rtęciowego 5.



Rys. 7.6. Schemat stanowiska do wyznaczania współczynnika λ dla wody (dla przepływów laminarnych)

4. Wykonanie ćwiczenia

4.1. Wyznaczenie współczynnika λ dla przepływów turbulentnych

1. Otworzyć jeden z zawodów (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 (7.6) $(V = 4\,Q\,/\,\pi\,D^2)$.
   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.

4.2. Wyznaczenie współczynnika λ dla przepływów laminarnych

1. Ustawić zbiornik 3 na wysokości H .
2. Otworzyć zawór 4 a następnie zmierzyć za pomocą stopera i menzurki wydatek wody przepływającej rurką.
3. W międzyczasie zanotować wskazania manometru 5 oraz obliczyć różnicę ciśnień $\Delta p = p_1 - p_2 = g\left(\rho_{Hg}\ h + \rho_{H_2O}\ h_1\right)$
4. Zmierzyć i zanotować temperaturę wody.
4. Powtórzyć pomiary (p.1, 2, 3) dla kilku innych wartości H wysokości zbiornika 3.
5. Wyznaczyć wartości współczynnika λ wg wzoru (7.6) $(V = 4\,Q\,/\,\pi\,D^2)$.
6. Obliczyć wartości liczby Reynoldsa

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

   (wartość ν należy odczytać dla zmierzonej temperatury wody).
7. Otrzymane wartości λ nanieść na wykres $\lambda\,(Re)$.
8. Zinterpretować otrzymane wyniki.