

Postępując analogicznie jak w przypadku rur gładkich oblicza się z równania (6.41) stosunek prędkości średniej do dynamicznej. Po uwzględnieniu zależności (6.49) i scałkowaniu otrzymamy

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{5,75}{\sqrt{8}} \lg \frac{R}{k} + \frac{1}{\sqrt{8}} \left( 8,48 - \frac{3}{4,6} 5,75 \right),$$

ostatecznie

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \frac{R}{k} + 1,66, \quad (6.52)$$

Na podstawie przeprowadzonych przez Nikuradse doświadczeń, współczynniki wchodzące do tego wzoru zostały poprawione.

Otrzymano więc tzw. wzór Nikuradse na współczynnik  $\lambda$  dla rur chropowatych przy całkowicie rozwiniętym wpływie chropowatości

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \frac{R}{4} + 1,74 \quad (6.53)$$

lub

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \frac{d}{k} + 1,14, \quad (6.54)$$

gdzie  $d = 2R$ .

## 7. PRZEPŁYW CIECZY LEPKIEJ W PROSTYCH PRZEWODACH POD CIŚNIENIEM

### 7.1. PODSTAWOWE POJĘCIA I ZALEŻNOŚCI

W poprzednim rozdziale podaliśmy podstawowe równania ruchu płynu lepkiego oraz omówiliśmy najbardziej istotne właściwości przepływu laminarnego i turbulentnego na podstawie klasycznych badań teoretycznych i doświadczalnych.

Zajmiemy się teraz zastosowaniem teorii ruchu płynu nieściśliwego i lepkiego do zagadnień przepływu cieczy w przewodach pod ciśnieniem, tzn. w takich, które są całkowicie wypełnione cieczą pod ciśnieniem wyższym od atmosferycznego.

Zagadnienia te mają szczególne zastosowanie w praktyce inżynierskiej. Dotyczą one hydraulicznych obliczeń wszelkiego rodzaju przewodów zarówno prostych, pojedynczych jak i złożonych układów przewodów, sieci.

Hydrauliczne obliczenia przewodów polegają na określeniu wymiarów projektowanego przewodu, jak np. długości i średnicy zapewniającej uzyskanieżądanego wydatku lub też parametrów charakteryzujących przepływ, np. wydatku, prędkości, ciśnienia, mocy pompy itd., przy znanych wymiarach przewodu.

Przepływ w przewodach pod ciśnieniem będzie traktowany jako ustalony. Pewne przypadki ruchu nieustalonego będą omówione w ostatnim punkcie (7.6) tego rozdziału.

Zanim przystąpimy do omówienia metod obliczeniowych dla przepływu ustalonego cieczy lepiej przypomnijmy podstawowe pojęcia i zależności.

Obliczenie przepływu cieczy lepkiej w przewodach pod ciśnieniem opiera się na następujących podstawowych równaniach:

1) równanie Bernoulliego (6.10)

$$\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \sum_{1-2} h_{st}, \quad (7.1)$$

2) równanie ciągłości

$$v_1 F_1 = v_2 F_2 = Q, \quad (7.2)$$

3) równanie Darcy - Weisbacha (6.42)

$$h_{sl} = \frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}, \quad (7.3)$$

4) równanie strat miejscowych

$$h_{sm} = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (7.4)$$

gdzie:  $\sum_{1-2} h_{st}$  - suma strat liniowych i miejscowych między przekrojami 1-1, 2-2 rozpatrywanego odcinka przewodu,  
 $h_{sl}$  i  $h_{sm}$  - wysokości strat (opórów) liniowych i miejscowych,  
 $\lambda$  i  $\zeta$  - współczynniki oporów liniowych i miejscowych.

Równanie (7.1) wyraża bilans energii mechanicznej z uwzględnieniem współczynnika Coriolisa oraz strat energetycznych spowodowanych lepkością cieczy.

We wzorze (7.3) wysokość strat, względnie oporów liniowych, określona jest jako stosunek spadku ciśnienia do ciężaru właściwego.

Straty (opory) miejscowe wyznacza się ze wzoru (7.4).

Oprócz oporów liniowych uwzględnia się jeszcze opory miejscowe, które występują w tych miejscach przewodu, gdzie ulega zmianie wartość lub kierunek prędkości, są to np. załamania, zakrzywienia, zwężenia lub rozszerzenia, zawory itd.

We wszystkich wymienionych równaniach występują prędkości średnie w przekroju poprzecznym przewodu a ruch cieczy odbywa się w ziemskim polu grawitacyjnym.

Równanie (7.3) można wyrazić w postaci

$$I = \frac{h_s}{l} = \lambda \frac{v^2}{2g d}.$$

Wielkość  $I$  określającą stosunek wysokości strat do długości przewodu nazywamy spadkiem hydraulicznym.

Współczynnik oporów liniowych  $\lambda$  jest w ogólnym przypadku funkcją liczby Reynoldsa  $Re$  i chropowatości względnej  $\varepsilon$  wewnętrznych ścianek przewodu

$$\lambda = \lambda(Re, \varepsilon). \quad (7.5)$$

Chropowatość względną  $\varepsilon$  określamy jako stosunek chropowatości bezwzględnej  $k$  do średnicy przewodu  $d$  ( $\varepsilon = \frac{k}{d}$ ). Wielkość chropowatości  $k$  zależy od średniej wysokości wybojów ściennych, od kształtu i rozmieszczenia tych nierówności.

Wartości współczynnika  $k$  w zależności od materiału i wewnętrznej powierzchni przewodu zestawiono w tablicy 7.1.

Wzór (7.3) może być stosowany do obliczenia strat liniowych w przewodach o kołowym przekroju poprzecznym.

Przewody o przekroju niekołowym obliczamy przy pomocy tak zwanego promienia hydraulicznego  $R_h$ , który określa się jako stosunek przekroju czynnego  $F$  do obwodu zwilżonego  $U$

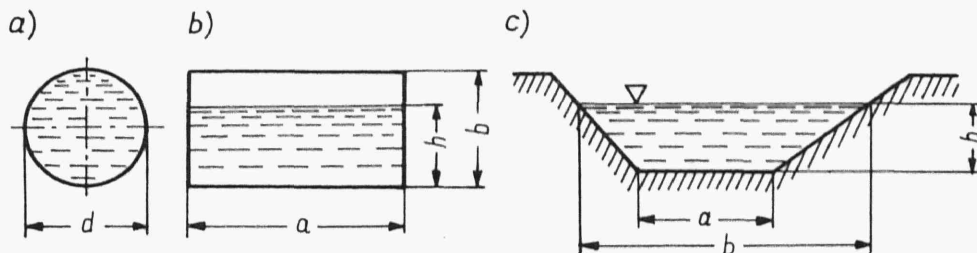
$$R_h = \frac{F}{U}. \quad (7.6)$$

Wprowadzenie pojęcia promienia hydraulicznego znacznie rozszerza zakres stosowalności odpowiednich wzorów na wszystkie przewody zarówno o przekroju kołowym jak i niekołowym, na przewody pod ciśnieniem i wypełnione cieczą częściowo, również na przewody otwarte.

Tablica 7.1

Rodzaj rur	Stan powierzchni wewnątrz przewodu	k [mm]
Rury walcowane z miedzi, mosiądzu aluminium	gładkie gładkie	0,0015 ÷ 0,01 0,015 ÷ 0,6
Rury stalowe walcowane	nowe, nie używane bituminizowane ciepłownicze przewody pary przegrzanej przewody nieznacznie skorodowane gazociągi po roku eksploatacji wodociągi w eksploatacji przewody z większymi osadami kamienia przewody z powierzchnią w złym stanie	0,02 ÷ 0,10 do 0,04 0,10 0,4 0,12 1,2 ÷ 1,5 3,0 5,0
Rury stalowe ocynkowane	nowe, czysto ocynkowane zwyczajnie ocynkowane	0,07 ÷ 0,10 0,1 ÷ 0,15
Rury żeliwne	nowe nowe, bitumizowane asfaltowane wodne w eksploatacji z osadami silnie skorodowane	0,25 ÷ 1,0 0,10 ÷ 0,15 0,12 ÷ 0,30 1,4 1,0 ÷ 1,5 do 3,0
Rury betonowe	średnie warunki gładkości	2,5
Rury azbesto- cementowe	nowe używane	0,05 ÷ 0,1 0,6

Na rys. (7.1) podano kilka przykładów określenia promienia hydraulicznego, w zależności od napełnienia i kształtu przekroju.



Rys.7.1

Obliczone  $R_h$  z zależności (7.6) są następujące:

a) dla koła  $R_h = \frac{d}{4}$ ,

b) dla prostokąta  $R_h = \frac{a h}{a + 2h}$ ,

c) dla trapezu  $R_h = \frac{0,5h(a + b)}{a + \sqrt{4h^2 + (b - a)^2}}$ .

Jak wynika z obliczenia średnica przekroju kołowego całkowicie wypełnionego cieczą jest czterokrotnie większa od promienia hydraulicznego,  $d = 4 R_h$ . W oparciu o tę zależność wzory na obliczenie przewodów o dowolnym kształcie przekroju poprzecznego można przedstawić w postaci:

$$h_{sl} = \lambda \frac{1}{4R_h} \frac{v^2}{2g}, \quad (7.7)$$

$$Re = \frac{v 4R_h}{\nu},$$

$$\varepsilon = \frac{k}{4R_h}.$$

Z przekształcenia wzoru (7.7) otrzymamy

$$I = \frac{h_{sl}}{l} = \lambda \frac{v^2}{8g R_h},$$

skąd

$$v = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \sqrt{I R_h}.$$

Oznaczając

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$$

otrzymamy wzór pod nazwą wzoru Chézy w postaci

$$v = C \sqrt{I R_h}. \quad (7.8)$$

Z prawa ciągłości napiszemy wzór na wydatek

$$Q = F v = C F \sqrt{I R_h}. \quad (7.8')$$

W strefie kwadratowej zależności oporów współczynnik  $C$  zależy od chropowatości ścianki przewodu, a nie zależy od liczby Reynoldsa.

Z dużej ilości wzorów empirycznych na obliczenie współczynnika  $C$  podajemy tylko bardzo prosty do obliczeń wzór Pawłowskiego

$$C = \frac{1}{n} R_h^y$$

oraz najczęściej stosowany wzór Manninga

$$C = \frac{1}{n} R_h^{1/6}, \quad (7.9)$$

gdzie  $n$  - współczynnik chropowatości zależny od rodzaju przewodu oraz od okresu i warunków eksploatacji.

Prawidłowe określenie strat liniowych i miejscowych na podstawie wzorów (7.3) i (7.4) uzależnione jest od dokładnego określenia wartości współczynników oporów liniowych i miejscowych.

## 7.2. WSPÓŁCZYNNIK OPORÓW LINIOWYCH

Obszerne badania współczynnika oporów liniowych przypadają na koniec XIX w., kiedy ustalono w oparciu o teorię podobieństwa, że