

## 2.2. Przepływ cieczy rzeczywistej przez przewody zamknięte

### 2.2.1. Przepływ cieczy przez przewody o stałym przekroju

Charakter przepływu w przewodach zamkniętych o niezmiennym przekroju poprzecznym określa w sposób jednoznaczny *bezwymiarowa liczba podobieństwa Reynoldsa*

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (2.13)$$

której wartość krytyczna  $Re_{cr} = 2000 \div 2400$  stanowi kryterium przejścia ruchu uwarstwionego w ruch burzliwy.

Liczba Reynoldsa i chropowatość ścian występują we wzorach określających współczynnik oporu liniowego w rurach jako niezależne parametry.

Według R. Misesa, przy przepływach odbywających się ze średnimi prędkościami znacznie większymi od krytycznych, współczynnik oporu można wyrazić zależnością

$$\lambda = 0,0096 + \sqrt{\frac{\chi}{d}} + \frac{1,7}{\sqrt{Re}} \quad (2.14)$$

gdzie  $\chi$  — współczynnik chropowatości w m, określony doświadczalnie [16] dla różnych materiałów,  $d$  — średnica rury w m.

W przypadku przewodów o innym przekroju należy obliczyć średnicę zastępczą

$$d = \frac{4A}{U} \quad (2.15)$$

gdzie:  $A$  — przekrój przewodu w  $m^2$ ,  $U$  — obwód przekroju w m.

Dla wody o temperaturze poniżej  $20^\circ C$  wzór (2.14) przyjmie prostszą postać

$$\lambda = 0,01 + \sqrt{\frac{\chi}{d}} + \frac{0,0023}{\sqrt{vd}} \quad (2.16)$$

Wysokość strat przepływu w przewodach zamkniętych o niezmiennym przekroju można obliczyć wg Misesa z zależności

$$\Delta h = \lambda \frac{1}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \text{ m} \quad (2.17)$$

gdzie  $l$  — długość przewodu w m.

Należy pamiętać o tym, iż osadzanie się zawiesin cieczy na ściankach przewodów powoduje znaczne zmiany wysokości strat; zmienia się bowiem współczynnik oporu  $\lambda$  (może ulec zwiększeniu lub zmniejszeniu) oraz zmniejsza się średnica przewodu, co powoduje wzrost oporów przepływu (proporcjonalnie do piątej potęgi średnicy).

Obecnie do obliczania współczynnika oporu przepływu  $\lambda$  w przewodach zamkniętych coraz częściej jest stosowana *formuła Colebrooka i White'a*, wykorzystująca wyniki badań hydraulicznych Nikuradsego [16]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left( \frac{2,5l}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,72d} \right) \quad (2.18)$$

gdzie  $k$  — chropowatość bezwzględna w mm.

Do szybkiego określenia współczynnika  $\lambda$  służą wykresy  $\lambda = f(Re)$  dla rur o różnych średnicach, różnych wartościach  $d/k$ , wykonanych z różnych materiałów. Wartości współczynnika  $\lambda$  są zawarte w granicach  $0,01 \div 0,08$  (patrz wyd. I oraz [16]).

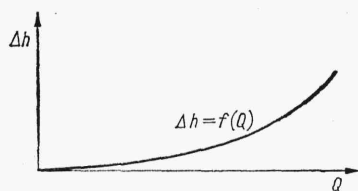
Jeżeli przewód składa się z  $i$  poszczególnych odcinków o różnych średnicach, wtedy całkowity opór przepływu równa się sumie oporów tych odcinków

$$\Delta h = \sum \lambda_i \frac{l_i}{d_i} \cdot \frac{v_i^2}{2g} \quad (2.19)$$

Według badań Nikuradsego współczynnik  $\lambda$  dla przepływu burzliwego ma wartość prawie niezmienną. Dlatego do obliczeń technicznych przyjmuje się uproszczoną postać wzoru (2.19)

$$\Delta h = \text{const } Q^2 \quad (2.20)$$

Wykresem tej zależności jest parabola przedstawiona na rys. 2.2, zwana potocznie *krzywą charakterystyczną* lub *charakterystyką rurociągu*.



**Rys. 2.2.**  
Zależności oporów przepływu  $\Delta h$  od natężenia przepływu  $Q$  w przewodzie zamkniętym

### 2.2.2. Przepływ cieczy przez przewody o zmiennym przekroju

Przepływ cieczy w przewodach zamkniętych o zmiennym przekroju zależy zarówno od liczby Reynoldsa, jak i od zmian przekroju poprzecznego do kierunku przepływu. W przewodach zbieżnych (*konfuzorach*), jak również w rozbieżnych (*dyfuzorach*) zachodzi wzajemna przemiana cząstkowych energii wg równania Bernoulliego, przy czym przy przepływie cieczy rzeczywistej występują opory przepływu  $\Delta h$  (2.12).

### 2.2.3. Przepływ cieczy przez kształtki

Przy przepływie cieczy przez kształtki o różnych przekrojach i kształtach (zawory, zasuw, trójniki, prostki wlotowe i wylotowe, kłapy zwrotne, kosze itp.), wobec trudności w określeniu współczynników oporu przepływu  $\lambda$ , w obliczeniach technicznych stosuje się wzór uproszczony

$$\Delta h = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (2.21)$$

gdzie  $\zeta$  — współczynnik bezwymiarowy oporu określony doświadczalnie [10]; wartość jego zawiera się w granicach  $0,1 \div 9,0$  (patrz wyd. I).

Oczywiście w odniesieniu do wzoru (2.17) istnieje związek

$$\zeta = \lambda \frac{l}{d} \quad (2.22)$$

W literaturze są podane niekiedy dla poszczególnych rodzajów kształtek odpowiednie *zastępcze długości rur* o tych samych średnicach, których opory są równoważne oporowi przepływu przez kształtki. Ułatwia to sumaryczne obliczanie oporów przepływu układu rurociągów.

#### 2.2.4. Przepływ cieczy zawierającej zawiesiny

Pompy wirowe są niejednokrotnie stosowane do podnoszenia cieczy zawierającej *zawiesiny*, czyli cząstki stałe unoszone przez ciecz. Obecność tych cząstek wywiera decydujący wpływ na sprawność mechaniczną i hydrauliczną pompy.

Należy zdawać sobie sprawę z tego, że energia kinetyczna oraz energia położenia cząstek stałych unoszonych przez płynącą ciecz nie może być zmieniona w energię ciśnienia, ponieważ cząstki te nie biorą udziału ani w utrzymaniu, ani w przenoszeniu energii ciśnienia. Przy pompowaniu mieszaniny zwiększa się jedynie energia kinetyczna cząstek stałych kosztem energii zawartej w płynącej cieczy. Energia kinetyczna cząstek stałych nie może być zamieniona w energię ciśnienia, lecz ulega rozproszaniu. Dlatego też energia mieszaniny jest mniejsza od energii samej cieczy o tej samej objętości co mieszanina. Transport cząstek stałych w cieczy powoduje dodatkowe straty hydrauliczne wywołane tarciami cząstek cieczy o powierzchnie ciał stałych i tarciami unoszonych cząstek stałych o ściany przewodu. Straty te wzrastają w miarę zwiększania się zawartości cząstek stałych w cieczy. Jednocześnie maleje wysokość podnoszenia i sprawność pompy.

### 2.3. Ruch okrężny cieczy

---

Działanie wszystkich pomp wirowych oraz niektórych pomp wyporowych opiera się na *ruchu okrężnym* podnoszonej cieczy, stąd przy rozpatrywaniu pracy tych pomp jest konieczna znajomość rodzajów ruchu okrężnego, zjawisk towarzyszących takiemu ruchowi oraz zależności określających parametry tego ruchu.

Rozróżniamy dwa podstawowe rodzaje ruchu okrężnego — *ruch okrężny swobodny*, występujący w układzie odosobnionym i oparty na zasadzie zachowania energii, oraz *ruch okrężny wymuszony*, występujący w wyniku dostarczania energii z zewnątrz.

W celu uproszczenia rozumowania rozpatrzmy ruch okrężny cieczy doskonałej, odbywający się wyłącznie pod wpływem sił zachowawczych, w którym linie prądu są kołami koncentrycznymi leżącymi w płaszczyznach prostopadłych do osi wirowania.