

Doświadczenie Brabbee'go /1913/ wskazują, że współczynnik  $n = 6 - 6,5$ .

Znajomość tego współczynnika ułatwi nam określenie tych granic wartości prędkości, przy których ruch może być regularny lub burzliwy.

### 175. STRATY CIŚNIENIA NA TARCIE W RUCHU REGULARNYM.

Z poprzedniego widzieliśmy, że w ruchu regularnym cieczy, kiedy prędkość jest mniejsza niż krytyczna, otrzymujemy straty ciśnienia, wzrastające proporcjonalnie do prędkości. Ponieważ zazwyczaj będziemy mieli do czynienia, jak to zresztą widzieliśmy w równaniu Bernoulli'ego, z wysokościami, mierzącymi ciśnienie, zatem, mówiąc o stratach ciśnienia, będziemy obliczali straty odpowiednich wysokości.

Jeżeli oznaczymy przez  $h$  wysokość, straconą w przewodzie na pewnej długości  $L$ , możemy, zgodnie z doświadczeniem, napisać, że  $h = \beta \cdot v$ , gdzie  $\beta$  jest współczynnikiem proporcjonalności, zależnym od długości przewodu,  $\phi$  przewodu, temperatury cieczy i t.p. warunków. Naturalnem będzie, jeśli przyjmniemy, co zresztą potwierdza doświadczenie, że im

dłuższy przewód, tem większa będzie strata; możemy więc napisać, że:  $\beta = \zeta L$  ; zatem  $h = \zeta L \cdot v$

Spółczynnik  $\zeta$  możemy znaleźć częściowo drogą teoretycznych rozumowań, częściowo drogą doświadczalną.

Otrzymujemy:

$$\zeta = \frac{0,0058}{(1 + 0,0337t + 0,00022t^2)} \cdot \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{1}{D^2}.$$

Gdzie  $t$  oznacza temperaturę cieczy w stopniach Cel.,  $\gamma$  - ciężar właściwy cieczy, wyrażony w  $\text{kg/m}^3$  i  $D$  - średnica przewodu w m.

Przeważnie straty wysokości będziemy obliczali nie na całą długość przewodu, na której powstają, lecz na jednostkę długości przewodu, czyli będziemy obliczali  $\frac{h}{L}$  t.zw. stratę jednostkową; oznaczając ten stosunek przez  $J$  , otrzymamy:

$$J = \zeta \cdot v , \quad \text{albo} \quad v = \frac{1}{\zeta} J = k J \quad /107/$$

Podstawiając na  $\zeta$  wartość poprzednio przytoczoną, otrzymamy:

$$v = \frac{(1 + 0,0337t + 0,00022t^2) \gamma \cdot D^2}{0,0058} \cdot J \quad /108/$$

Jeżeli  $\gamma$  wstawimy w  $\text{kg/m}^3$  ,  $D$  - w m. , wówczas otrzymany  $v$  w m/sek.

Ruch regularny spotykamy w przypadku ruchu cieczy w rurkach włoskowatych, lub przez warstwę piasku, tworzącego filtr, albo też w przypadku ruchu wody w gruncie. Zagadnienia, dotyczące ruchu wody w gruncie, będą stanowiły odrębny dział rozważań.

#### 176. STRATY CIŚNIENIA NA TARCIE W RUCHU BURZLIWYM.

Jeżeli ciecz płynie w przewodzie z prędkością większą niż krytyczna, a jeszcze pewniej, jak o tem była mowa w art. 174, kiedy prędkość będzie większa niż 6-o krotna prędkość krytyczna, wówczas straty wysokości będą prawie proporcjonalne do kwadratu prędkości.

Ponieważ w naszych rozumowaniach mamy t.zw. wysokości prędkości  $\frac{v^2}{2g}$ , które są proporcjonalne do kwadratu prędkości, więc możemy powiedzieć, że wysokości, stracone na tarcie w przewodzie, będą proporcjonalne do wysokości prędkości.

Wyrazimy to w taki sposób:

$$h = \beta \cdot \frac{v^2}{2g} \quad , \quad \dots \dots \dots /109/$$

gdzie  $\beta$  jest pewien współczynnik proporcjonal-

ności, który możemy otrzymać częściowo z rozumowania, częściowo z doświadczeń.

Naturalnem wydaje się, jeśli przyjmiemy, że współczynnik  $\beta$  rośnie wraz z powiększeniem się długości  $L$  przewodu. Następnie  $\beta$  będzie większe jeśli przy jednakowej długości przewodu obwód  $O$ , na którym ciecz dotyka się ścianek przewodu, będzie większa. Dalej, współczynnik  $\beta$  przy tej samej długości  $L$  i obwodzie  $O$  będzie większy, im mniejsze obierzemy pole  $F'$  przekroju i odwrotnie. Wreszcie współczynnik  $\beta$  musi być zależny od rodzaju, jakości i temperatury cieczy, od materiału i stanu powierzchni przewodu i t.d.

Na podstawie powyższego możemy napisać:

$$\beta = L \cdot O \frac{1}{F'} \cdot \rho$$

gdzie przez  $\rho$  oznaczamy współczynnik, mający wyrazić zależność strat od innych czynników przez  $L, O, F'$ . Współczynnik  $\rho$  możemy wyznaczyć przedewszystkiem drogą doświadczalną.

Wobec powyższego napiszemy:

$$h = \rho L \cdot O \frac{1}{F'} \frac{v^2}{2g}$$

Ponieważ zwykle obliczamy straty, przypadające na jednostkę długości przewodu, więc:

$$\frac{h}{L} = \rho \cdot O \frac{1}{F'} \frac{v^2}{2g}$$

Stosunek  $\frac{h}{L}$ , jak poprzednio, nazwiemy stratą jednostkową, oznaczając go przez  $J$ ; wówczas:

$$J = \rho \cdot \frac{O}{F} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Często stosunek pola  $F$  przekroju do obwodu  $O$ , nazywanego zwykle "zwilżonym", oznaczamy przez  $R$ , nazywając go promieniem hydraulicznym.

Wtedy

$$J = \rho \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad \dots \dots \dots /110/$$

albo w innej postaci:

$$v = \sqrt{\frac{2g}{\rho} R J} = \sqrt{\frac{2g}{\rho}} \sqrt{J R} = k \sqrt{J R} \quad \dots \dots \dots /111/$$

gdzie dla skrócenia pisma wprowadziliśmy współczynnik  $k$  zamiast  $\sqrt{\frac{2g}{\rho}}$ . Ostatnie 2 wzory /110/ i /111/ będą często w rozmaity sposób stosowane. Wzór /111/ podali w 1755 r. Brahm i Chezy.

177. Niech przewód będzie okrągły o  $\phi$   $D$ ; będzie to, zresztą, bardzo pospolity przypadek; wtedy pole przekroju  $F = \frac{\pi D^2}{4}$ , obwód zwilżony:  $O = \pi D$  oraz promień hydrauliczny:

$$R = \frac{F}{O} = \frac{\pi D^2}{4 \pi D} = \frac{D}{4}$$

Wówczas z równania /110/ otrzymamy:

$$J = \frac{4\rho}{2g} \frac{v^2}{D} = \frac{4}{k^2} \frac{v^2}{D} \quad /112/$$

z równania zaś /111/

$$v = \frac{k}{2} \sqrt{J D} \quad . . . . . /113/$$

Możemy jeszcze inną nadać postać poprzednim równaniom, biorąc pod uwagę wydatek wody  $Q$ .

Wiemy, że

$$Q = F \cdot v = \frac{\pi D^2}{4} \cdot v.$$

Stąd

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2},$$

a następnie

$$J = \frac{4}{k^2} \frac{16 \cdot Q^2}{\pi^2 D^4 D} = \frac{64}{k^2 \pi^2} \cdot \frac{Q^2}{D^5},$$

albo, oznaczając dla skrócenia  $\frac{64}{k^2 \pi^2}$  przez  $\lambda$  napiszemy:

$$J = \lambda \cdot \frac{Q^2}{D^5} \quad . . . . . /114/$$

Jest to równanie Dupuit.

Równania /112/, /113/ i /114/ będą bardzo często stosowane dla przewodów o przekroju kołowym. - Warto jeszcze wyznaczyć zależność między  $k$  i  $\lambda$

Z poprzedniego wynika, że  $\lambda = \frac{64}{k^2 x^2} = \left(\frac{8}{x k}\right)^2$   
 $\lambda = \left(\frac{2,55}{k}\right)^2$ , albo  $k = \frac{2,55}{\sqrt{\lambda}} \dots \dots \dots /115/$

O ile będziemy mieli dane liczbowe co do wartości współczynników  $k$  i  $\lambda$ , będziemy mogli przystąpić do rozwiązywania zagadnień, dotyczących ruchu cieczy w przewodach o przekroju kołowym.

178. Wzorów, dających wartości współczynników  $k$  i  $\lambda$ , w literaturze można nalozyc parę dziesiątków.

Jedne z tych wzorów są mniej, inne więcej dogodnie w użyciu. W wielu przypadkach częstsze stosowanie jednych wzorów niż drugich jest sprawą mody, nieraz nawet pewnego patriotyzmu. Przytoczymy tu tylko kilka ważniejszych wzorów.

Jedną z pierwszych wartości współczynnika  $k$  była liczba podana przez Eytelweina:  $k = 50,93$ .

Jak później zobaczymy, wartość współczynnika  $k$  waha się w znacznych granicach. Dlatego też powyższą wartość  $k$  należy uważać jako daleką od dokładności.

Możemy więc, jako dalekie przybliżenie przyjąć, wad przy wstępnych obliczeniach:

$$\text{oraz} \quad \left. \begin{array}{l} k = 50 \\ \lambda = \left(\frac{1}{20}\right)^2 \end{array} \right\} \dots \dots \dots /116/$$

Dokładniejsze wartości, otrzymamy ze wzoru W. K u t t e r a :

$$k = \frac{100 \sqrt{R}}{m + \sqrt{R}} = \frac{100 \sqrt{D}}{2m + \sqrt{D}} \text{ oraz } \lambda = \left[ 2,55 \frac{2m + \sqrt{D}}{100 \sqrt{D}} \right]^2 \quad /117/$$

w tych wzorach należy przyjmować na 172

	dla rur nowych	dla rur starych	średnio
przy wodzie czystej	$m = 0,20$	$m = 0,30$	$m = 0,25$
przy wodzie brudnej	$m = 0,30$	$m = 0,40$	$m = 0,35$

Podobny do wzoru Kuttera daje B a s i n  
/1897 r./

$$k = \frac{87}{1 + \frac{c}{\sqrt{R}}}$$

Wzór ten da się przekształcić w taki:

$$\left. \begin{array}{l} k = \frac{87 \sqrt{R}}{c + \sqrt{R}} \\ \text{oraz} \\ \lambda = \left[ 2,55 \frac{c + \sqrt{R}}{87 \sqrt{R}} \right]^2 \end{array} \right\} \quad /118/$$



zaś dla przewodów o przekroju kołowym

$$\left. \begin{aligned} k &= \frac{87 \sqrt{D}}{2c + \sqrt{D}} \\ \text{oraz} \quad \lambda &= \left[ 2,55 \frac{2c + \sqrt{D}}{87 \sqrt{D}} \right]^2 \end{aligned} \right\} \quad /119/$$

We wzorach Bazin'a można przyjmować:

dla rur nowych:  $C = 0,06 - 0,08$ .

" " starych:  $C = 0,16 - 0,20$ .

179. Istnieją wzory, wiążące  $J, D, v$  w odmienny od poprzedniego sposób:

Naprz. wzór H. Lang'a /1907/ daje taką zależność

$$J = \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{1}{D} \cdot \left( 0,02 + \frac{0,0018}{\sqrt{vD}} \right) \quad \dots /120/$$

Wartości  $\phi\phi$ , otrzymane z powyższego wzoru, proponuje Lang powiększyć o 20 mm., aby tą drogą uwzględnić późniejsze zmniejszenie się przekroju przewodu.

Następnie, znajdują częste zastosowanie wzory, nadające się do logarytmowania; przeważnie są to wyrażenia wykładnikowe postaci:

$$J = a \cdot \frac{v^m}{D^n},$$

gdzie  $a, m, n$  są wielkościami stałymi. Naprz.  
A. F l a m a n t na podstawie wyników doświad-  
czeń kilkudziesięciu badaczy ustala takie zależno-  
ści:

$$\left. \begin{aligned} J &= a_1 \cdot \frac{v^{1,75}}{D^{1,25}} \\ v &= a_2 \cdot D^{5/7} \cdot J^{4/7} \\ Q &= a_3 \cdot D^{19/7} \cdot J^{4/7} \end{aligned} \right\} \quad /121/$$

W tych wzorach Flamant zaleca stosować następu-  
jące wartości współczynników  $a_1, a_2, a_3$ :

	$a_1$	$a_2$	$a_3$
dla rur ołowianych, blaszanych i szklanych	0,00057	72	56
" nowych rur żeliwnych	0,00074	62	48
" rur żeliwnych, lub będących w użyciu	0,00092	54	43

Podobny kształt wzoru na  $J$  podaje L a m p e:

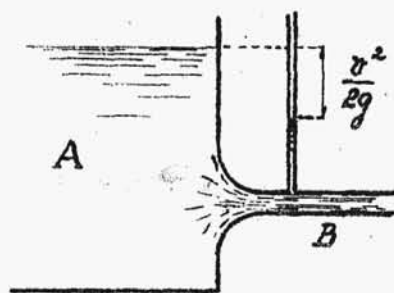
$$J = a \cdot \frac{v^{1,802}}{D^{1,25}},$$

gdzie  $a = 0,0007555$ .

Temi kilkoma wzorami, pozwalającymi obliczyć

straty, spowodowane przez tarcie w przewodach, ograniczymy się i przejdziemy do strat, których źródła są umiejscowione.

#### 180. Straty przy WEJŚCIU CIECZY ZE ZBIORNIKA DO PRZEWODU.



rys.125.

Gdyby ciecz była doskonała, wówczas przy wypływie ze zbiornika *A* do przewodu *B*, ciecz nie doznałaby żadnego oporu. Wówczas w piezometrze, wstawionym na po-

czątku przewodu, otrzymalibyśmy słupkę cieczy, nie dochodzący do swobodnej powierzchni cieczy o wysokości  $\frac{v^2}{2g}$ , jeżeli  $v$  jest prędkością cieczy w przewodzie. Nie należy tej wysokości uważać za straconą.

Ciecz rzeczywista dozna pewnej straty, którą możemy znacznie zmniejszyć, jeśli przejście ze zbiornika do przewodu wykonamy stopniowo zwężając je, jak to na rysunku pokazano. Mimo to, jednak, strata będzie, gdyż wysokość poprzedniego słupka cieczy w piezometrze zwiększy się