

Ponieważ z równania Bernoulli'ego /a/

$$H_0 - \frac{p_0 - p_a}{\gamma} = \frac{v_0^2}{2g} + \sum_{(L+l)} h$$

więc

$$C'C_0 = Z_c = \frac{v_0^2}{2g} + \sum_{(L+l)} h \dots (f) \dots /104/$$

171. W poprzednich dwóch artykułach wskazana została droga do wyznaczenia linii ciśnień dla cieczy rzeczywistej. Widzieliśmy, że do tego trzeba umieć obliczać straty w przewodach. Do tego też przedmiotu obecnie przejdziemy.

Przedewszystkiem zauważmy, że podczas ruchu cieczy rzeczywistej w przewodach dopatrujemy się strat energii tej cieczy dwóch rodzajów: mogą to być takie straty, które powstają we wszystkich miejscach przewodu od początku do końca oraz takie straty, które mają swe źródło wyraźnie miejscowe, związane ze specjalnymi warunkami danego przekroju, albo najbliższego odcinka.

Pierwszy rodzaj strat przypisujemy istnieniu tarcia cząsteczek cieczy o ścianki przewodu i tarcia cząsteczek bliższych do ścianek przewodu o

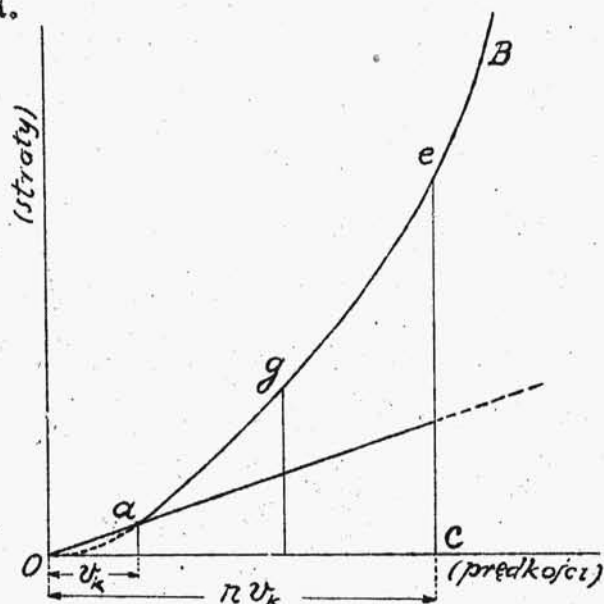
cząsteczki bliżej osi przewodu płynące.

Drugi rodzaj strat przypisujemy zaburzeniom w ruchu cieczy, spowodowanym mniej lub więcej raptowną zmianą przekroju mniejszego na większy lub odwrotnie; następnie zmianą raptowną lub stopniową kierunku ruchu o mniejszy lub większy kąt, wreszcie ruch cieczy w przewodzie spotykać może przeszkody w postaci zaworów, zasuw, klap i t.p.

172. Zajmiemy się stratami, spowodowanymi tarciem.

Doświadczenie wskazuje, że straty tego rodzaju są zależne w bardzo znacznym stopniu od średniej prędkości, z którą ciecz płynie w przewodzie. Mówimy tu o średniej prędkości, gdyż cząstki cieczy, płynące tuż przy ścianie przewodu, doznają znacznego zwolnienia prędkości ruchu. Cząsteczki dalej od ścianek przewodu położone, dzięki lepkości wewnętrznej, doznają zwolnienia, ale mniejszego i jeśli będziemy obserwowali cząstki, leżące dalej od powierzchni przewodu, tem mniej będzie odczuwany wpływ ścianek przewodu na ruch cieczy. Największą prędkość winny posiadać cząstki płynące po osi prze-

wodu.



rys.122.

Dajmy na to, że mamy przewód o określonej średnicy i długości. - Przepuszczajmy przez ten przewód pewną ciecz z różnemi prędkościami, po-

czynając od bardzo małych, niewiele różniących się od zera, a następnie zwiększając te prędkości do granic, na które doświadczenie dozwoli. Mierzmy straty energii cieczy, które przy różnych prędkościach będziemy mogli ocenić, mierząc zmiany w ciśnieniu. Wyniki pomiarów przedstawmy wykreślnie: Na osi poziomej odkładajmy prędkości, na osi pionowej odpowiednio znalezione straty.

Z badań i z wykresu dostrzeżemy takie rezultaty:

1/ podczas zwiększania prędkości od 0 do pewnej wartości, którą mamy na wykresie oznaczoną odcinkiem *Ob*, Straty rosną zawsze, przy różnych pró-

bach według prostej Oa , czyli powiemy, że straty rosną proporcjonalnie do prędkości, póki ta prędkość nie otrzyma wartości pewnej; oznaczmy ją przez v_k .

2/ Jeśli prędkość przekroczy wartość v_k , wówczas, zależnie od umiejętnego i ostrożnego prowadzenia doświadczenia, linja strat może być albo prosta Od , co wskazywać będzie na to, że straty wciąż pozostają proporcjonalne mi do prędkości odpowiednich, albo, jeśli zbyt pośpiesznie zwiększać będziemy prędkości, lub jeśli przewód będzie poddany wstrząśnieniom i t.d., wówczas albo odrazu od prędkości v_k albo też przy prędkości większej niż v_k , straty rosnąć będą zgodnie z krzywą ae ; bliższe pomiary krzywej wskażą, że straty rosną prawie proporcjonalnie do kwadratów prędkości odpowiednich. Ruch cieczy z prędkością v , zawartą w granicach między v_k i $n v_k$ ma jakgdyby charakter zjawiska chwiejnego.

3/ Wreszcie z szeregu doświadczeń możemy się przekonać, że jeśli prędkość przepływu powiększymy

ponad wartość pewną $n v_k$, wówczas żadne ostrożności nie wystarczą, aby udało się linję strat otrzymać jako prostą OR poza Od , lecz zawsze będzie się otrzymywała jako krzywa eB ; wskazuje to, że powyżej prędkości $= n v_k$ straty będą rosły prawie proporcjonalnie do kwadratu odpowiedniej prędkości.

Z powyższego wynika, że linje strat, wyrażające zasadniczy związek między prędkościami a odpowiednimi stratami, mogą być takie: jako pewne krańcowe położenia tych linii: $OadeB$ lub $OageB$, albo też którakolwiek linja pośrednia, naprz. $OafgeB$ i t.d.

Prędkość v_k , poniżej której straty $z a w s z$ będą proporcjonalne do prędkości, zgodnie z O. Reynolds'em, nazwiemy prędkością krytyczną. Wartość prędkości krytycznej, według O. Reynolds'a /1894 r./ zależy od średnicy przewodu, ciężaru właściwego cieczy i od t.zw. współczynnika lepkości. Ten ostatni współczynnik, według doświadczeń J.L. Poiseuille /1840/ zależy od temperatury cieczy.

Mianowicie według Reynolds'a:

$$v_k = \frac{2000 \cdot \eta \cdot g}{D \cdot \gamma}$$

... /105/

gdzie otrzymamy v_k w $\frac{m}{sek.}$, jeśli przyjmiemy
 g - przyspieszenie ziemskie $= 9,81 \frac{m}{sek.^2}$, D - średnicę przewodu w m ; γ ciężar właściwy cieczy w $\frac{kg}{m^3}$ oraz η - współczynnik lepkości, według Poiseuille w $\frac{kg \cdot sek.}{m^2}$.

$$\eta = \frac{0,0001814}{1 + 0,033t + 0,00022t^2}.$$

Temperatura t w stopniach C. Po wstawieniu η we wzór /105/ otrzymamy dla wody:

$$v_k = \frac{0,0036}{1 + 0,0033t + 0,00022t^2} \cdot \frac{1}{D} \quad \dots \quad /106/$$

Naprz. dla wody o temp.:

$t^\circ =$	0°	5°	10°	15°	20°	$30^\circ C.$
$v_k = \frac{0,0036}{D}$	$\frac{0,0036}{D}$	$\frac{0,0035}{D}$	$\frac{0,0034}{D}$	$\frac{0,0033}{D}$	$\frac{0,0031}{D}$	$\frac{0,0028}{D}$

Zobaczmy, jakie to będą prędkości krytyczne dla wody o temperaturze przeciętnej /naprz. $15^\circ C.$ / podczas przepływu w przewodach o

$$\phi \phi D = 0,01 m; \quad ; \quad = 0,1 m; \quad ; \quad = 1 m.$$

Po podstawieniu tych wartości D we wzór

$$v_k = \frac{0,0033}{D},$$

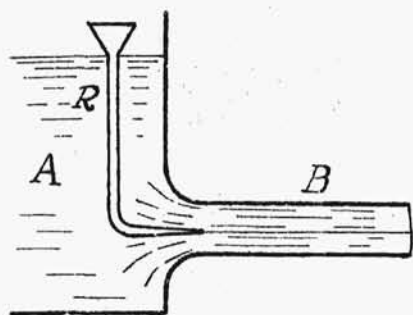
otrzymamy:

w przewodzie o ϕ	$D =$	0,01 m.	0,1 m.	1,0 m.
prędkość krytyczna ($v_{k_{t=15^\circ}}$)	$=$	0,36 $\frac{m}{sek.}$	0,04 $\frac{m}{sek.}$	0,004 $\frac{m}{sek.}$

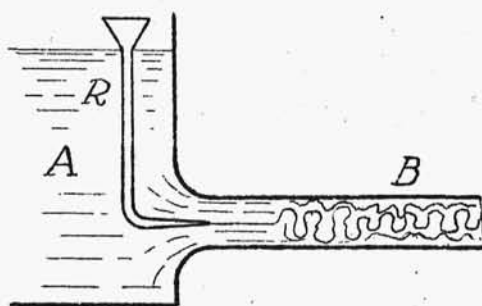
Jeżeli porównamy otrzymane tu prędkości krytyczne z temi prędkościami, jakie zwykle w przewodach rurowych w praktyce spotykać będziemy ($v = 0,5 \sim 1 \sim 1,5 \frac{m}{sek.}$) przyjdziemy do wniosku, że zazwyczaj mieć będziemy do czynienia z ruchami, których prędkości znacznie przekraczają prędkości krytyczne.

173. Z opisanego poprzednio doświadczenia wi-
dzieliśmy, że jeśli prędkość ruchu cieczy w prze-
wodzie jest mniejsza, niż prędkość krytyczna, wte-
dy straty wzrastają proporcjonalnie do prędkości;
jeśli zaś prędkość ruchu będzie większa niż prę-
dkość krytyczna, wówczas straty rosną znacznie szyb-
ciej, gdyż są prawie proporcjonalne do kwadratów
prędkości. Skąd pochodzi ta różnica? Wykazał to
O. Reynolds na takim doświadczeniu:

Z naczynia A wychodzi przewód B . Do tego
przewodu na samym jego początku wprowadzona jest
rurka R , zagięta pod kątem prostym i zakończona
wąskim otworkiem. Do rurki R , przy pomocy lejka,



rys. 123.



rys. 124.

wprowadzamy do wypływającej cieczy jakikolwiek barwnik w roztworze. Jeśli ciecz wypływa powoli z niewielką prędkością, wówczas sam strumień cieczy jest przezroczysty, - barwnik zaś płynie w postaci równej prostej nici. Jeżeli prędkość przepływu powiększymy, wówczas na pewnej odległości od początku przewodu strumień traci przejrzystość, robi się jakgdyby mętnym i wydaje się, że barwnik rozlewa się w całym strumieniu, płynącym przewodem B . Jeżeli będziemy strumień taki obserwować tylko chwilę - oświetlając go iskrą elektryczną, zauważymy, że nić barwnika wykonywa bardzo nieregularne i zawiłe ruchy, wskazując na to, że ruch cząsteczek cieczy jest wtedy bardzo złożony i nieprawidłowy.

Zmiana wyglądu strumienia zachodzi właśnie

w chwili, kiedy prędkość przepływu, zwiększając się od bardzo małej wartości, osiągnie wartości prędkości krytycznej. Ruch cieczy z prędkością poniżej krytycznej, nazywać będziemy *r u c h e m r e g u l a r n y m*, ruch zaś z prędkością powyżej prędkości krytycznej, nazwiemy *r u c h e m b u r z l i w y m*.

Zawiłe i nieprawidłowe ruchy cieczy podczas t.zw. ruchu burzliwego, powodują zjawiska dźwiękowe /szmer płynącej cieczy/, zjawiska mechaniczne /drżenie przewodu/ i w pewnej, jakkolwiek bardzo nieznacznej mierze, podniesienie się temperatury płynącej cieczy i samego przewodu. Tem też trzeba objaśnić straty energii cieczy znacznie większe podczas ruchu burzliwego, niż w przypadku ruchu regularnego.

174. W art.172, opisaliśmy otrzymanie wykresu linii strat, wskazującego na zależność między prędkościami a stratami energii. Mówiliśmy tam o istnieniu prędkości $= n v_k$, powyżej której straty rosną prawie proporcjonalnie do kwadratu prędkości; innymi słowy - ruch z prędkością powyżej prędkości $= n v_k$ będzie zawsze ruchem burzliwym.

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 β jest współczynnikiem proporcjonalności, zależnym od długości przewodu, ϕ przewodu, temperatury cieczy i t.p. warunków. Naturalnem będzie, jeśli przyjmniemy, co zresztą potwierdza doświadczenie, że im