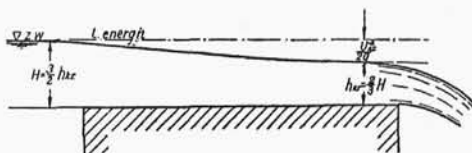


Tabela 29.

$\frac{y}{a}$	$\frac{x}{b}$	$\frac{y}{a}$	$\frac{x}{b}$
0,1	0,805	5,0	0,268
0,2	0,732	6,0	0,247
0,3	0,681	7,0	0,230
0,4	0,641	8,0	0,216
0,5	0,608	9,0	0,205
0,6	0,580	10,0	0,195
0,7	0,556	12,0	0,179
0,8	0,536	14,0	0,166
0,9	0,517	16,0	0,156
1,0	0,500	18,0	0,147
2,0	0,392	20,0	0,140
3,0	0,333	25,0	0,126
4,0	0,295	30,0	0,115

4. Pomiar na podstawie głębokości krytycznej

Na progach jazów, szerokich koronach przelewów, upustach itp. można dość ściśle określić przepływ wody z głębokości krytycznej, jaka się tam wytworzy. Wobec zmiany ruchu wody z nadkrytycznego w podkrytyczny w pewnym przekroju profilu podłużnego powstaje głębokość krytyczna (rys. 203). Przepływ obliczamy



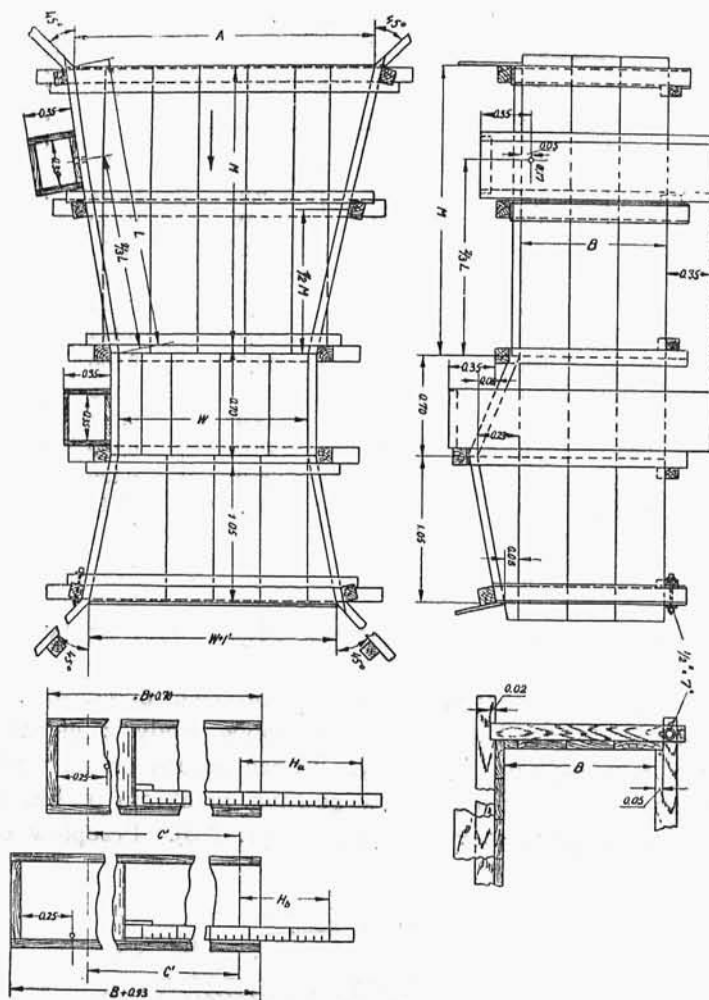
Rys. 203.

Przelew o szerokiej krawędzi.

z zależności $Q = A v_{kr} = b h_{kr} \sqrt{2g(H - h_{kr})}$ m³/sek; gdzie b — szerokość przekroju, h_{kr} — głębokość krytyczna, H — wzniesienie nieobniżonego zwierciadła wody ponad koroną przelewu lub wzniesienie linii energii, które z dostateczną dokładnością można przyjąć w poziomie zwierciadła wody górnej.

$$H = h_{kr} + \frac{v_{kr}^2}{2g}$$

Rys. 204.
Koryto Parshalla.



Podstawiawszy dalej $v_{kr} = \sqrt{h_{kr}g}$, otrzymujemy $H = \frac{3}{2} h_{kr}$, oraz

$$Q = b \frac{2}{3} H \sqrt{2g \frac{1}{3} H} = 0,385 b H^{\frac{3}{2}} \sqrt{2g} \text{ m}^3/\text{sek.}$$

Po wprowadzeniu współczynnika wydatku wzór otrzymuje wartość

$$Q = 0,35 b H^{\frac{3}{2}} \sqrt{2g} \text{ m}^3/\text{sek.} \quad (75)$$

Dla określenia więc przepływu należy znać szerokość koryta przepływowego oraz wysokość nieobniżonego poziomu zwier-

ciadła wody górnej. Pomiaru samej głębokości krytycznej nie daje się wykonać, gdyż nie jest z góry wiadome miejsce jej wytworzenia się. Jak wykazują ostatnie doświadczenia amerykańskie⁹⁵⁾, miejsce tworzenia się głębokości krytycznej jest zmienne i zależne od różnych okoliczności.

Tam gdzie rzeka niesie dużą ilość rumowiska i namułu, które zaszutrowałyby w krótkim czasie przestrzeń przed przelewem, oraz tam gdzie ze względu na spiętrzenia nie daje się zastosować przelewu, można użyć do pomiaru tzw. koryta Venturiego (Venturi-flume, Venturi-Kanalmesser). Jest to koryto o zwężającym się odpowiednio przekroju przepływowym, na skutek czego wytwarza się w nim ruch podkrytyczny i niewielki odskok poza nim. Na rys. 204 pokazano urządzenie takiego koryta z desek według Parshalla⁹⁶⁾ Ilość wody oblicza się ze wzoru

$$Q = 2,38 W^{1,04} H^{1,57} \quad \text{m}^3/\text{sek.} \quad (76)$$

We wzorze tym przez W oznaczono szerokość gardła a przez H — głębokość wody górnego poziomu. Badania amerykańskie wykazały, że można pomiar wykonać dość ściśle aż do granicy podtopienia dolną wodą na 70%. Największym dotychczas zainstalowanym urządzeniem tego rodzaju jest żelbetowe koryto na kanale nawadniającym pod La Yunta Colorado szerokości 12 m dla przepływów do 51 m³/sek.

Obecnie coraz częściej stosuje się koryto Venturiego do określania przepływów w przewodach kanalizacyjnych. G. Kent⁹⁷⁾ podaje wzór do obliczenia przepływu, opierając się na zasadzie Bernoullego i ciągłości ruchu (rys. 205):

$$Q = \mu H_1^{3/2} B_1 \sqrt{2g} \sqrt{\frac{(1-h)h^2}{b^2-h^2}} \quad \text{m}^3/\text{sek} \quad (77)$$

gdzie $h = \frac{H_2}{H_1}$ zaś $b = \frac{B_1}{B_2}$.

⁹⁵⁾ J. Woodburn. Tests of broad-crested weirs. Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1932. Str. 387.

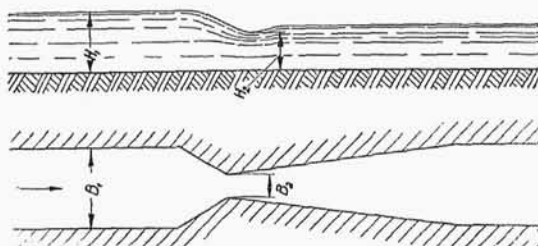
⁹⁶⁾ R. Parshall. The improved Venturi flume, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1925. Nr 7, Wzór podany w cytowanej pracy dla jedno-

stek angielskich ma nieco odmienny kształt: $Q = 4WH^{1,522} W^{0,026}$ stóp sześciennych na sekundę. Na zasadzie przedstawionych tam pomiarów przy przeróbce wzoru na jednostki metryczne dało się ustalić dużo prostszą zależność, którą podano wyżej w tekście. Odchyłki wartości obliczonych i mierzonych mieszczą się w granicach znacznie mniejszych niż dla wzoru podanego przez R. Parshalla.

R. Parshall. Measuring large flows of water. Engineering News Record. 29.I.1931.

⁹⁷⁾ G. Kent. The Venturi-flume meter. Engineering. 28.XII.1934.

W pewnym miejscu zwężenia powstanie głębokość krytyczna i—zależnie od warunków ruchu poniżej zwężenia—utrzyma się dalej ruch podkrytyczny lub przejdzie odskokiem w nadkrytyczny.



Rys. 205.
Koryto Venturiego.

W wypadku drugim obliczymy przepływ ze wzoru:

$$Q = 0,385 \mu B_2 H_1^{3/2} \sqrt{2g} \quad \text{m}^3/\text{sek} \quad (78)$$

W wypadku pierwszym

$$Q = \mu k B_2 H_2 \sqrt{H_1 - H_2} \quad \text{m}^3/\text{sek} \quad (79)$$

$$\text{gdzie } k = \sqrt{\frac{2g}{1 - \frac{h^3}{b^3}}}$$

Pomiar w wypadku drugim ogranicza się do zmierzenia H_1 , w pierwszym należy znać H_1 i H_2 . Współczynnik μ określa się z doświadczeń (cechowań).

Kształt koryta tak się ustala na podstawie doświadczeń, aby otrzymać przy różnym wydatku możliwie stałe k . Ściany koryta zwykle robi się z gładkiego betonu, czasami wykłada się blachą z materiału nierdzewiącego. Często umieszcza się przyrządy samopiszące do notowania przepływu. Na rys. 206 pokazano koryto pomiarowe na kanale.

Identyczny wzór dla koryta Venturiego podaje F. Engel⁹⁸⁾:

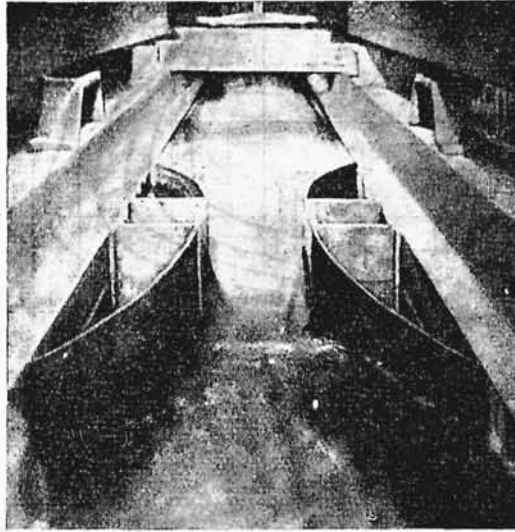
$$Q = c \frac{B_2 H_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{B_2 H_2}{B_1 H_1}\right)^2}} \sqrt{2g(H_1 - H_2)} \quad \text{m}^3/\text{sek} \text{ ustalony na podstawie}$$

⁹⁸⁾ F. Engel. Wassermengenmessung mit offenen seitlich eingeschnürten Kanälen (Venturi-kanälen), Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, 1933, Nr 48.

doświadczeń w City and Guilds Engineering College w Londynie. Współczynnik c uzależnia Engel od dwóch bezwymiarowych cyfr: cyfry Boussinesq'a i Froude'a.

$$\text{Cyfra Boussinesq'a } B_{ou} = \frac{v_{\delta r}}{\sqrt{gR}} = \frac{v_{\delta r}}{\sqrt{g \frac{2BH}{H+B}}}$$

(R oznacza podwójny promień hydrauliczny).

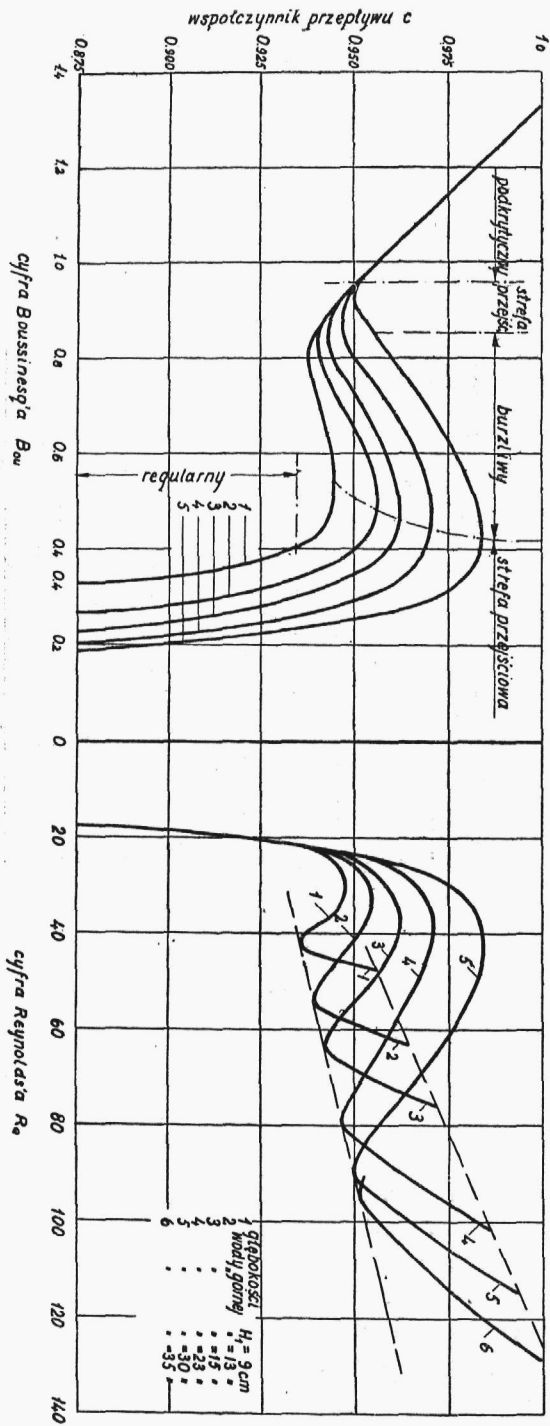


Rys. 206.
Koryto Venturiego.

Pomiędzy cyfrą Froude'a i Boussinesq'a istnieje zależność

$$B_{ou} = F_r \sqrt{\frac{H}{B} + \frac{1}{2}}$$

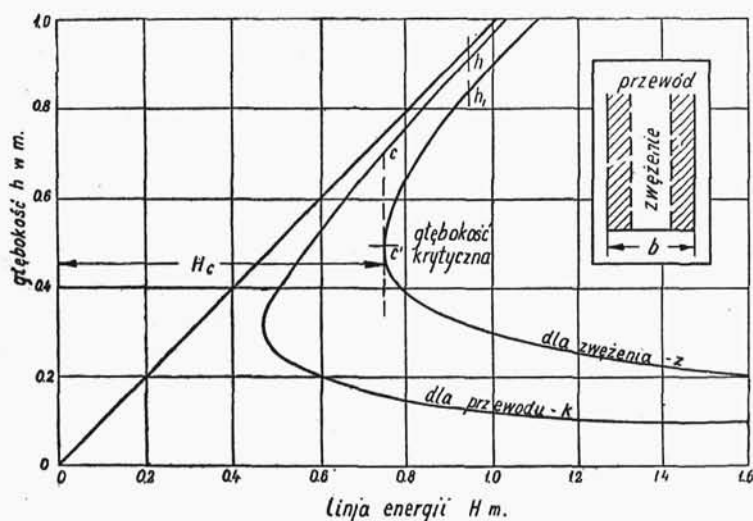
Na wykresach (rys. 207) podanych przez Engla współczynnik c jest uzależniony od wartości cyfry B_{ou} albo R_e (Reynoldsa). W strefie ruchu regularnego współczynnik c jest tylko funkcją cyfry Reynoldsa: $c = f(R_e)$. W strefie ruchu burzliwego c jest zależne zarówno od cyfry Reynoldsa jak i Boussinesq'a: $c = f(R_e, B_{ou})$. W strefie ruchu podkrytycznego współczynnik c zależy tylko od cyfry B_{ou} i to liniowo: $c = f(B_{ou})$.



Rys. 207.
Współczynnik c w zależności od cyfry Bousinesq'a i Reynoldsa.

Sprawę pomiaru przepływu przy pomocy koryta Venturiego w przewodach ze swobodnym zwierciadłem wody obszerniej i racjonalniej ujął H. Palmer⁹⁹⁾. Zasada pomiaru oparta jest na określeniu wysokości linii energii.

W pewnych warunkach określenie przepływu może być wykonane przez prosty pomiar głębokości wody (płynącej w przewodzie o regularnym przekroju) w odpowiednim punkcie bezpośrednio przed wlotem do pomiarowego odcinka zwężonego koryta. Jest to możliwe jedynie wówczas, gdy zwężenie wywołuje w ruchu wody przejście przez głębokość krytyczną. Dla każdego przewodu głębokość krytyczna jest funkcją przepływu. W pobliżu miejsca o głębokości krytycznej w zwężonym korycie wielkość głębokości jest wartością nieokreśloną, natomiast określona wartość posiada wysokość linii energii.



Rys. 208.

Wysokość linii energii dla przekroju prostokątnego.

Jeśli więc zwężenie jest zaprojektowane tak, że powoduje przepływ przy głębokości krytycznej, to głębokość w przewodzie powyżej będzie równą średniej wysokości linii energii mniej wysokość prędkości w tym punkcie. Nie uwzględniamy tu strat wskutek oporów ruchu.

Dla uproszczenia rozważmy przepływ w korycie prostokątnym

⁹⁹⁾ H. K. Palmer. Adaptation of Venturi flumes to flow measurements in conduits, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1935, Nr 7.

(rys. 208). Wysokość linii energii określa wzór

$$H = h + \frac{v^2}{2g} \quad (80)$$

gdzie h jest głębokością przepływu, v — średnią prędkością, g — przyspieszeniem ziemskim. Ponieważ $v = \frac{Q}{A}$, więc

$$H = h + \left(\frac{Q}{A}\right)^2 \frac{1}{2g} \quad (81)$$

Dla przekroju prostokątnego $A = b h$ i wtedy

$$v = \frac{Q}{b h}$$

$$H = h + \left(\frac{Q}{b h}\right)^2 \frac{1}{2g} \quad (82)$$

Na rys. 208 krzywe k i z wyrażają równanie (82) dla koryta i zwężenia (oczywiście dla tego samego przepływu Q). Przy pominięciu oporów ruchu przepływ odbywa się bez straty energii, czyli objętość Q , płynąca w przewodzie przy głębokości h , przejdzie przez zwężenie przy głębokości h_1 . Teoretycznie można określić Q mierząc te dwie głębokości h i h_1 . Konieczność takich dwóch pomiarów jest niedogodna. Jeśli przepływ Q ma miejsce w zwężeniu przy głębokości krytycznej (punkt „c”), to głębokość w przewodzie określi punkt „c”. Będzie to minimalna głębokość przed zwężeniem, gdyż dla mniejszej głębokości energia jest niedostateczna do przeprowadzenia objętości Q przez zwężenie.

Rysując podobne pary krzywych dla innych wartości Q można znaleźć krzywą zależności między Q i h (rating curve), co wymaga jednak dużej ilości pracy.

Dla każdego wymiaru zwężenia wartość wysokości prędkości $k = \frac{v^2}{2g}$ jest określoną funkcją Q , możemy więc napisać

$$Q = f(k) \quad (83)$$

Gdy znane jest H oraz Q możemy znaleźć drogą prób wielkość k , a odejmując ją od H otrzymamy głębokość $h = H - k$ (rys. 208).

Dla prostokątnych zwężeń równanie (83) otrzymuje formę prostą, dla innych kształtów przekroju postać funkcji $f(k)$ jest bardzo skomplikowana, łatwiej więc jest obliczyć kilka punktów krzywej i przygotować krzywą zależności Q i h wykreślnie. Najpraktyczniej jest przyjąć różne głębokości krytyczne w zwężonym gardle i obliczyć Q oraz H z następujących równań.

Przy głębokości krytycznej $\frac{dH}{dh} = 0$. Zróżniczkujemy równanie (81):

$$\frac{dH}{dh} = 1 - \frac{Q^2}{g} \frac{1}{A^3} \frac{dA}{dh}$$

Przyrównując powyższą wartość do zera i podstawiając b (szerokość zwierciadła wody) jako równowartość $\frac{dA}{dh}$, otrzymujemy

$$1 - \frac{Q^2 b}{g A^3} = 0 \text{ zaś stąd}$$

$$Q = A \sqrt{\frac{A}{b} g} \quad \text{m}^3/\text{sek}^{100)} \quad (84)$$

Równanie (84) daje związek pomiędzy przepływem i głębokością krytyczną w kanale o dowolnym przekroju. Podstawiając wartość $Q = A v$ w równanie (84) przekształcimy je na $\frac{v^2}{2g} = \frac{A}{2b}$, co daje nam dla równania Bernoullego wyrażenie

$$H = h_{kr} + \frac{A}{2b} \quad (85)$$

W wypadku prostokątnego zwężenia $A = b h_{kr}$, a więc

$$Q = b \sqrt{g h_{kr}^{\frac{3}{2}}} \quad \text{m}^3/\text{sek} \quad (86)$$

$$\frac{v^2}{2g} = \frac{h_{kr}}{2};$$

$$H = \frac{3}{2} h_{kr} \quad (87)$$

Po podstawieniu wartości h_{kr} , otrzymanej z równania (87), w równanie (86) znajdujemy

$$Q = 1,705 b H^{\frac{3}{2}} \quad \text{m}^3/\text{sek} \quad (88)$$

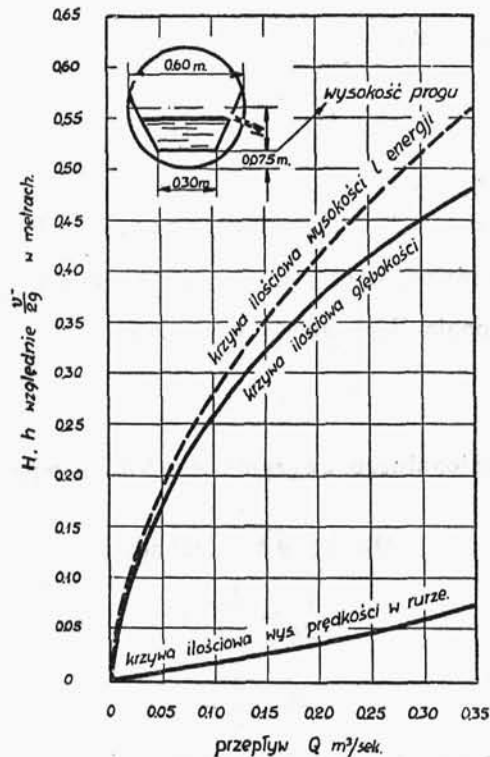
co określa nam wartość funkcji równania (83). Przy innych kształtach przekroju konieczne jest stosowanie równań (84) i (85).

Po wykreśleniu krzywej ilościowej linii energii dla danego przewężenia (rys. 209) należy dalej obliczyć i wykreślić krzywą ilościową wysokości prędkości dla przekroju koryta.

Dla znalezienia wysokości prędkości przy danym Q należy

¹⁰⁰⁾ B. Bakhmeteff, Hydraulics of open channels, New York, London, 1932.

przyjąć przybliżoną prawdopodobną wartość k (tj. założyć pewną głębokość h i dla niej przeprowadzić rachunek), odjąć ją od wartości wysokości linii energii określając tym samym głębokość h . Jeśli ta ostatnia odbiega od założonej wartości, robi się drugie przybliżenie; wystarczy zwykle jedno lub dwa przybliżenia. Rysując krzywą prędkości wygodniej jest zacząć od małych wartości Q , ponieważ błąd w przyjętej wartości wysokości prędkości jest wówczas stosun-



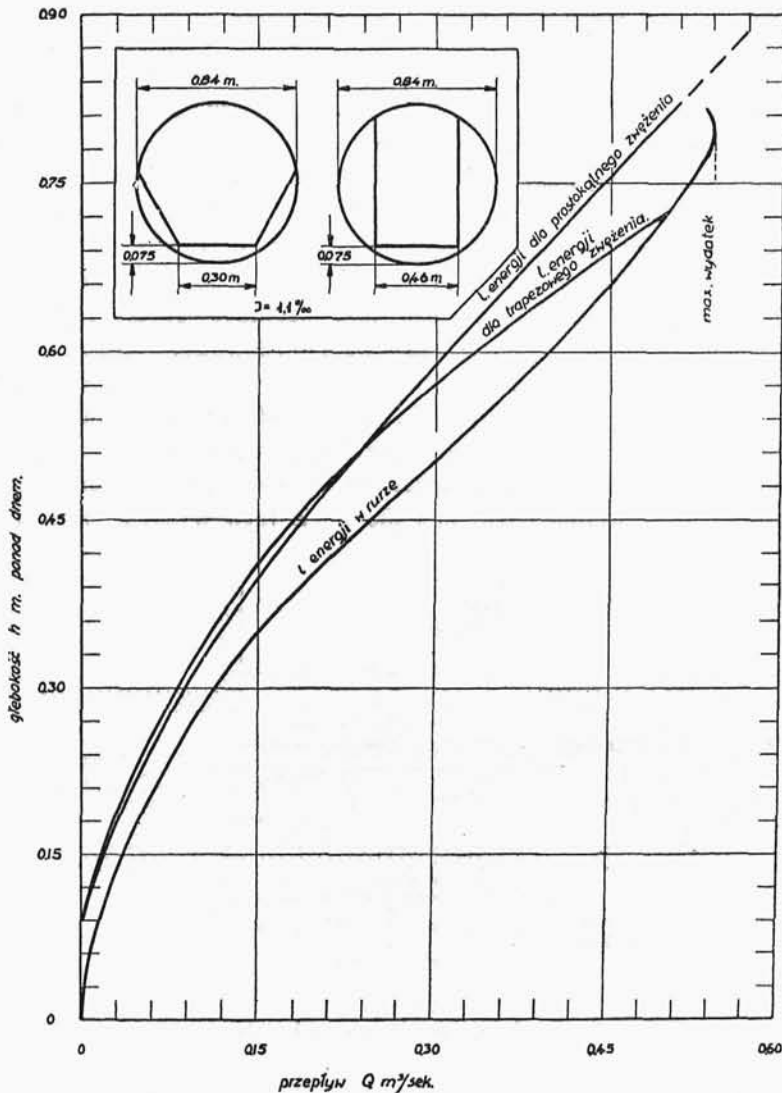
Rys. 209.

Krzywe ilościowe linii energii i wysokości prędkości.

kowo mały. Do nakreślenia krzywej wysokości prędkości wystarczy parę punktów. Rzędne krzywej ilościowej głębokości (rating curve) odpowiadają różnicy pomiędzy rzędnymi krzywej ilościowej linii energii i krzywej ilościowej wysokości prędkości. Ta krzywa ilościowa głębokości jest szukaną krzywą zależności Q i h (rating curve).

Doświadczenia wykazują, że dla otrzymania dobrych rezultatów długość przewężenia powinna być co najmniej równa średnicy przewodu (jeśli jest on kołowy).

Wielką zaletą koryta Venturiego jest możliwość jego zastosowania w przewodach ze swobodnym zwierciadłem wody o dowolnym kształcie przekroju oraz możliwość zainstalowania w miejscach trud-



Rys. 210.

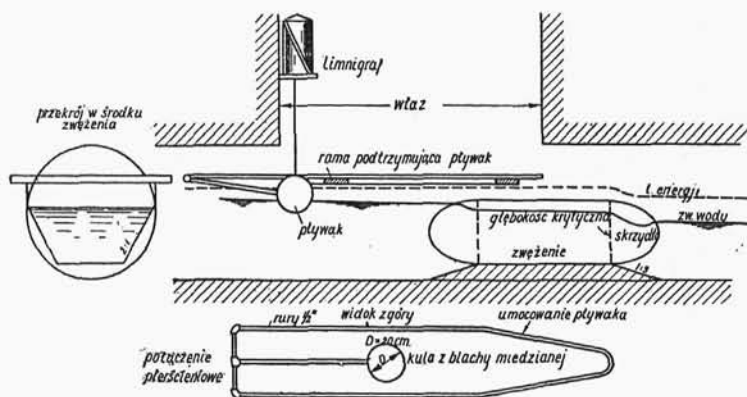
Krzywe ilościowe linii energii dla przekroju trapezowego i prostokątnego.

no dostępnych. Może ono być umieszczone z łatwością w przewodach już wybudowanych.

Rozmiary koryta zależą od wielkości przewodu i rozpiętości mierzonych przepływów. Idealne koryto miałoby takie rozmiary

i kształt, że stosunek przekroju zwilżonego w gardle i w przewodzie byłby ten sam dla wszystkich przepływów; zbudowanie takiego koryta nie jest możliwe i z tego powodu stosunek głębokości krytycznej do głębokości w przewodzie musi pozostawać zmienny.

Prawidłowa wielkość i właściwy kształt przewężenia dla pewnego przewodu są te, przy których wysokość linii energii jest wyższa od normalnej wysokości linii energii w przewodzie przy swobodnym przepływie Q . Rozwiązując praktycznie zagadnienie wyboru przekroju przewężenia, należy przygotować krzywe ilościowe linii energii dla różnych rozmiarów koryta Venturiego. Nakładając krzywą ilościową wysokości linii energii dla przewężenia na taką samą krzywą dla przewodu i przesuwając ją w górę i na dół, można określić, jaka musi być zastosowana wielkość gardła i jak wysoko umieszczone jego dno ponad dnem przewodu. Różnice tych dwóch linii energii wykazują straty wywołane przez koryto Venturiego przy różnych przepływach. Rys. 210 przedstawia typowe krzywe ilościowe linii energii dla przekroju trapezowego i prostokątnego, nałożone na krzywą ilościową wysokości linii energii przewodu kołowego średnicy 840 mm (33"). Z tego wykresu widać, że



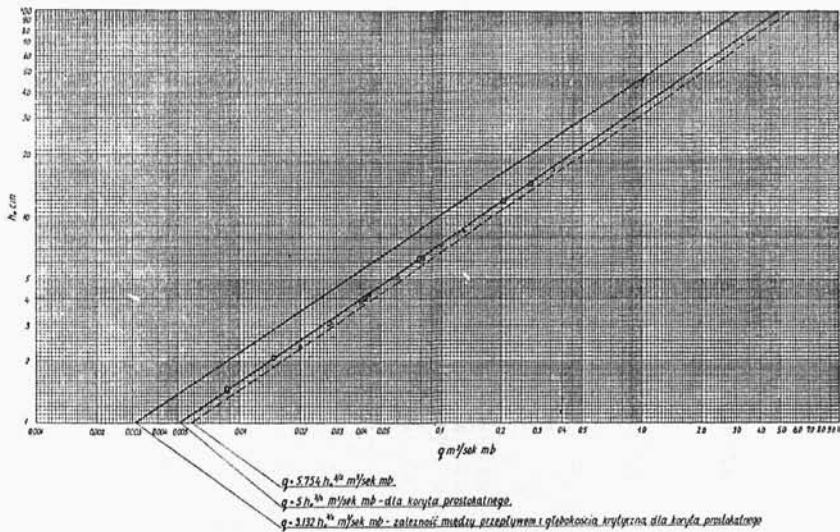
Rys. 211.
Urządzenie pomiarowe w kanale.

przekrój trapezowy może służyć do pomiaru przepływów aż do $0,51 \text{ m}^3/\text{sek}$; przy $0,54 \text{ m}^3/\text{sek}$, tj. przy maksymalnym wydatku rury pomiar już nie jest możliwy. Krzywa ilościowa linii energii przekroju prostokątnego leży wszędzie ponad linią energii dla rurociągu. Ten więc typ koryta daje możliwość pomiaru każdego przepływu, do pełnego wydatku rurociągu włącznie.

Krzywą zależności Q i h (rating curve) lepiej określić z bezpośrednich pomiarów w skonstruowanym korycie, niż opierać się na krzywych zaprojektowanych.

Koryta takie (rys. 211) zastosowano po raz pierwszy w Stanach Zjednoczonych na kanale dla Sanitation Districts w Los Angeles County. W Niemczech w większym rozmiarze zainstalowane są one w zakładzie oczyszczania ścieków Stahnsdorf pod Berlinem i zakładzie oczyszczania ścieków miasta Norymbergi.¹⁰¹⁾

W wielu wypadkach możemy mierzyć głębokość wody na krawędzi rynien, nie mogąc sięgnąć dalej w górę rynny. Z uwagi na istnienie (jak wykazały doświadczenia) stałej zależności między przepływem wody i charakterystyczną wartością głębokości na krawędzi rynny, dla każdego przepływu wody można określić przepływ z pomiaru głębokości na krawędzi.

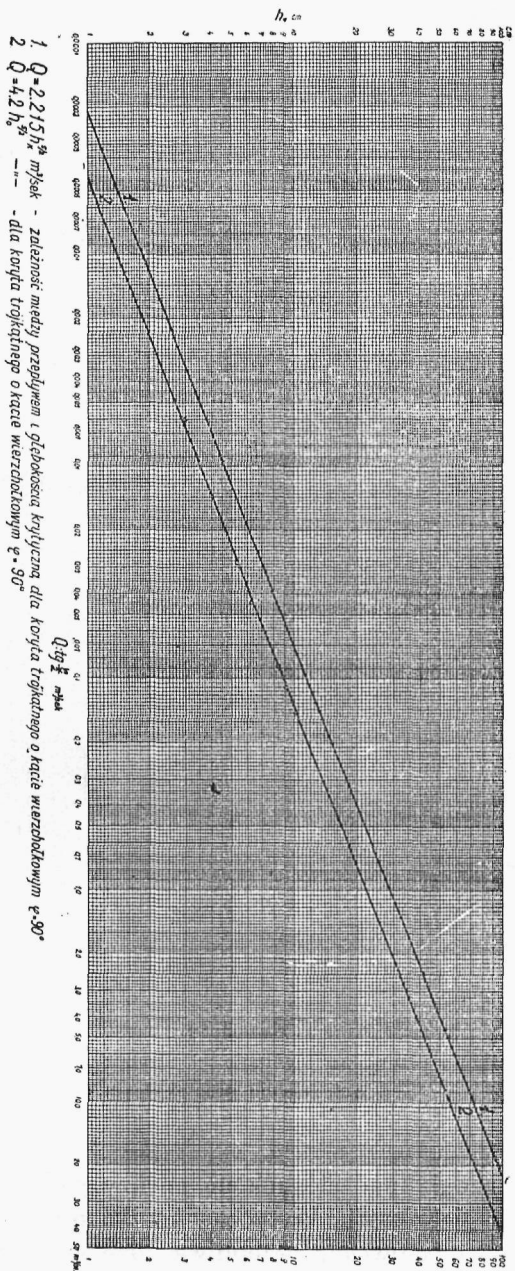


Rys. 212 a.

Wykres do określania przepływu i głębokości strumienia wody na krawędzi rynny o przekroju prostokątnym.

Doświadczenia nad stosunkiem między głębokością h_o na krawędzi rynny i głębokością krytyczną h_{kr} dla przekroju prostokątnego, trójkątnego i kołowego, przeprowadzone w Laboratorium Wod-

¹⁰¹⁾ A. Kufferath. Über den Venturi-Kanalmesser, Wasserkraft und Wasserwirtschaft, 1935, Nr 20.



Rys. 212 b.

Wykres do określania przepływu i głębokości strumienia wody na krawędzi rynny o przekroju trójkątnym i kącie wierzchołkowym 90° .

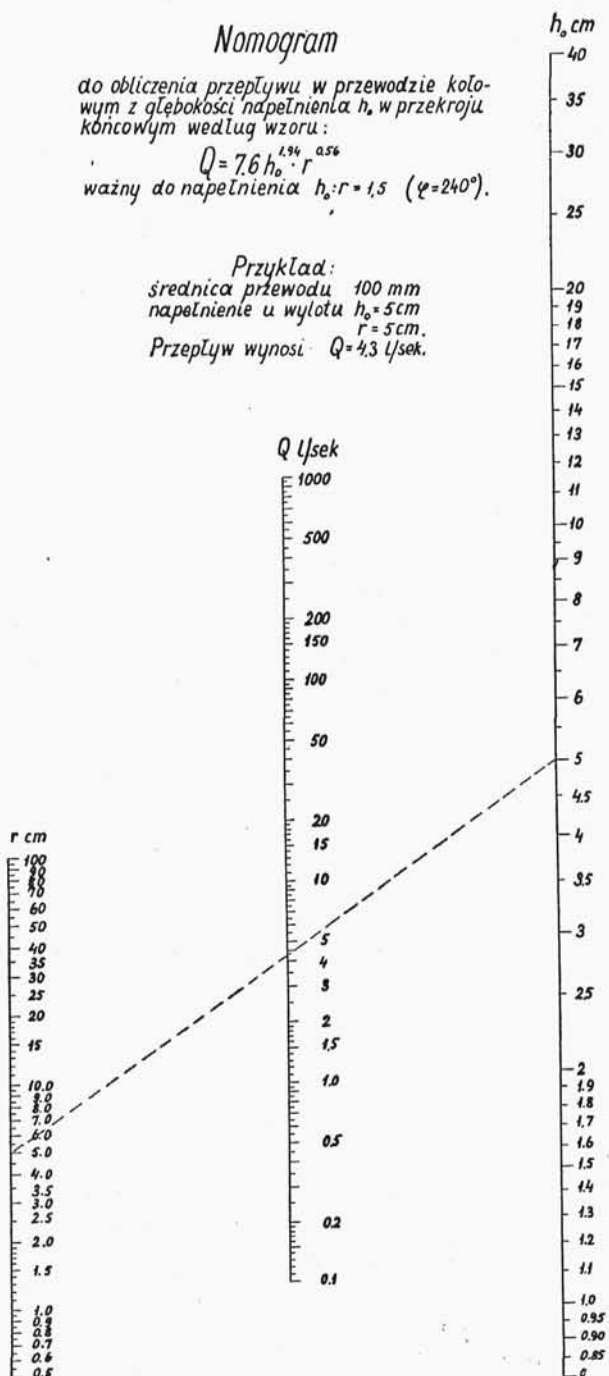
Nomogram

do obliczenia przepływu w przewodzie kołowym z głębokości napełnienia h_0 w przekroju końcowym według wzoru:

$$Q = 7.6 h_0^{1.94} r^{0.56}$$

ważny do napełnienia $h_0: r = 1,5$ ($\varphi = 240^\circ$).

Przykład:
średnica przewodu 100 mm
napełnienie u wylotu $h_0 = 5$ cm
 $r = 5$ cm.
Przepływ wynosi $Q = 4.3$ l/sek.



Rys. 213.

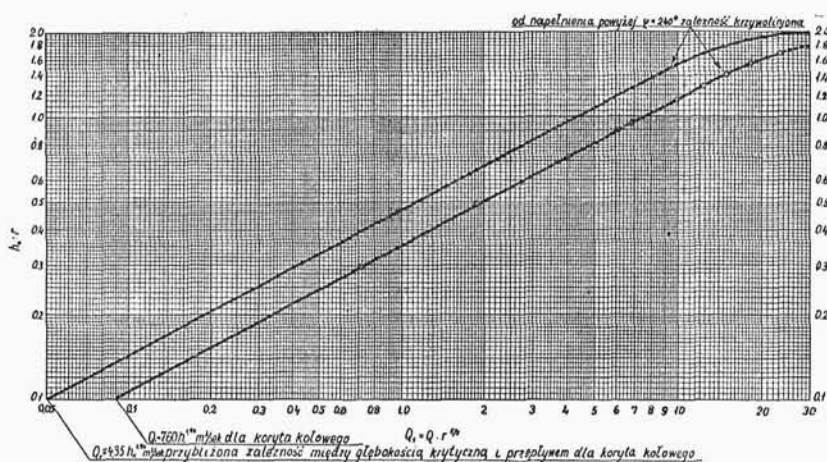
nym Politechniki Warszawskiej, doprowadziły do ustalenia wzorów uzależniających przepływ od głębokości końcowej h_o .¹⁰²⁾

Otrzymano takie wzory:

$$\text{dla przekroju prostokątnego } q = 5,0 h_o^{\frac{3}{2}} \text{ m}^3/\text{sek mb} \quad (89)$$

$$\text{" " trójkątnego } Q = 4,2 h_o^{\frac{5}{2}} \text{ m}^3/\text{sek} \quad (90)$$

$$\text{" " kołowego } Q = 7,6 h_o^{1,94} r^{0,56} \text{ m}^3/\text{sek} \quad (91)$$



Rys. 212 c.

Wykres do określania przepływu i głębokości strumienia wody na krawędzi rynny o przekroju kołowym.

Wzory powyższe rozwiązane w postaci wykresów w podziałce logarytmicznej podane są na rys 212 a, b, c oraz w formie nomogramu na rys. 213.

5. Metody chemiczne

Pomiary przepływu wody przy pomocy metod chemicznych zaczynają obecnie coraz bardziej wchodzić w użycie. Usiłowania określenia przepływu sekundowego z rozcieńczenia wpuszczonego do

¹⁰²⁾ Dokładniejszy opis doświadczeń z wywodem teoretycznym znajdzie czytelnik w artykule K. Wóycickiego „Wyznaczenie przepływu na podstawie głębokości strumienia wody na krawędzi rynien”, Gospodarka Wodna, Warszawa. 1937. Nr 1.