

## ROZDZIAŁ VII

### POMIARY OBJĘTOŚCI PRZEPŁYWU WODY

Zagadnienie pomiaru objętości przepływu wody powstało już u cywilizowanych ludów świata starożytnego. Pierwsze próby pomiaru wody wykonywane były przez Rzymian za czasów cesarza Nerry w sto lat po Nar. Chr. Obliczenia zużywanej wody wodociągowej dokonywano przy pomocy wbudowanych kalibrowanych dysz wpływowych. Miarą objętości była Quinaria; przekrój równy  $4,454 \text{ cm}^2$ . Nie orientowano się jeszcze, że o objętości przepływu decyduje przekrój i prędkość przepływu. W miarę rozwoju nauk matematyczno-technicznych sposoby pomiaru się doskonaliły i powstaje wiele metod, pozwalających na bardzo dokładne określenie przepływu sekundowego.

Metody określenia przepływu wody zgrupować można w pewne działy zależnie od sposobu przeprowadzania pomiaru oraz od rodzaju przewodu, w którym mierzymy przepływ. Z tego względu materiał podany niżej zgrupowano następująco: pomiary bezpośrednie, pomiary przepływu w przewodach otwartych, pomiary przepływu w przewodach zamkniętych, pomiary prędkości w przewodach otwartych i zamkniętych oraz przyrządy do pomiaru prędkości. Dalej podano zalecenia dotyczące stosowania omówionych metod. Następny rozdział jest w pewnym związku z poprzednimi, omawiając pomiary innych wartości, których znajomość jest często bardzo potrzebna hydrotechnikom, a następnie omawiając zastosowanie pewnych metod pomiarowych w poszczególnych wypadkach praktyki.

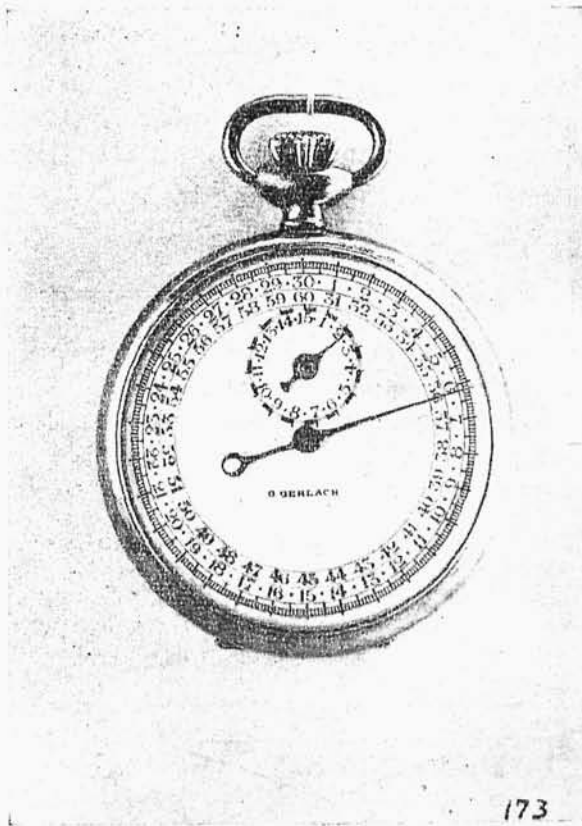
Jako uzupełnienie całości pomiarów wodnych omówiono pomiary zawieszin i rumowiska w rzekach.

#### 1. Pomiary bezpośrednie

Pomiar objętości wody przy pomocy cechowanego zbiornika jest najdokładniejszym z dotychczas znanych sposobów (o ile tylko pojemność zbiornika jest dostatecznie duża w stosunku do mierzonego przepływu, a cechowanie zbiornika zostało przeprowadzone dokładnie). Za zbiorniki do pomiaru służyć mogą zarówno przenośne

naczynia jak również stałe zbiorniki naturalne lub sztuczne, jeżeli są zabezpieczone od strat a ich pojemność jest niezmienna.

Metoda ta znajduje przeważnie zastosowanie przy pomiarach niewielkich przepływów. Pomiar polega na odczytaniu różnicy napełnienia zbiornika przed doprowadzeniem mierzonego przepływu i po pewnym ściśle określonym czasie dopływania wody. Mając, na podstawie uprzedniego cechowania, ustaloną zależność pomiędzy



Rys. 173.  
Stoper.

stanem wody w zbiorniku i jego pojemnością, określamy objętość wody  $V$ , która w zmierzonym czasie  $t$  dopłynęła do zbiornika. Przepływ sekundowy obliczymy dzieląc  $V$  przez czas  $t$ :

$$Q = \frac{V}{t} \quad \text{m}^3/\text{sek.}$$

Czas trwania dopływu wody do zbiornika mierzymy przy pomocy czasomierzy (stoperów) lub chronografów. Stoper (rys. 173) obecnie używane mają na tarczy podziałki co 0,1 sekundy, a dają się zatrzymywać na  $\frac{1}{30}$  sekundy, tak że można odczytać czas z tą ostatnią dokładnością.

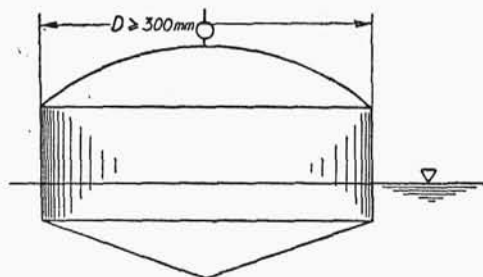
Czas obserwacji według norm szwajcarskich winien trwać co najmniej 20 sekund, aby błąd pojedynczej obserwacji czasu można było utrzymać w granicach nie dochodzących do  $\pm 1\%$ .

Również różnica napełnienia zbiornika w czasie  $t$  nie powinna być mniejsza od 100 mm dla utrzymania poniżej  $\pm 1\%$  błędu obserwacji poziomów wody.

Jeśli z pewnych względów powyższe warunki nie mogą być zachowane, to pomiar trzeba przeprowadzać kilkakrotnie, aby średni błąd średniej arytmetycznej z poszczególnych pomiarów nie był większy niż  $\pm 1\%$ .

$$\Delta Q = \pm \sqrt{\frac{\sum_1^n (\Delta Q)^2}{n(n-1)}}; \quad \varphi_{sr} = 100 \frac{\Delta Q}{Q} < \pm 1\%.$$

Obserwacje czasu i poziomu wody mogą być dokonywane tylko przy ustalonym stanie wody w zbiorniku. Jeśli do pomiaru używa się dużych zbiorników naturalnych, a okres obserwacji trwa czas dłuższy, to należy uwzględnić wpływ parowania i ewentualnych opadów. Zmiany poziomów wody należy obserwować i przedstawić



Rys. 174.  
Pływak.

wykreślić jako funkcję czasu. Pozwoli to stwierdzić błędy obserwacji i umożliwi ich wyrównanie. Do określenia wysokości spadłego deszczu lub wysokości warstwy wyparowanej wody można użyć cylindrycznych naczyń, które ustawia się w jednakowych odstępach na obwodzie zbiornika, lub umieszcza się je na pływakach na wodzie.

Do pomiaru zwierciadła wody używa się wodowskazów szpilkowych lub pływaków (rys. 44 i 174) dostatecznie czułych na zmia-

nę poziomu wody (średnica pływa-  
ka  $\geq 300$  mm). Dla osiągnięcia możli-  
wie dużej dokładności przy pomiarze  
poziomu zwierciadła wody trzeba się  
starać nie wywoływać falowań, na-  
leży więc uspokoić doprowadzany do-  
pływ przy pomocy różnego rodzaju  
urządzeń. Pomiary na dużych prze-  
strzeniach wodnych można przepro-  
wadzać tylko przy pogodzie bez-  
wietrznej.

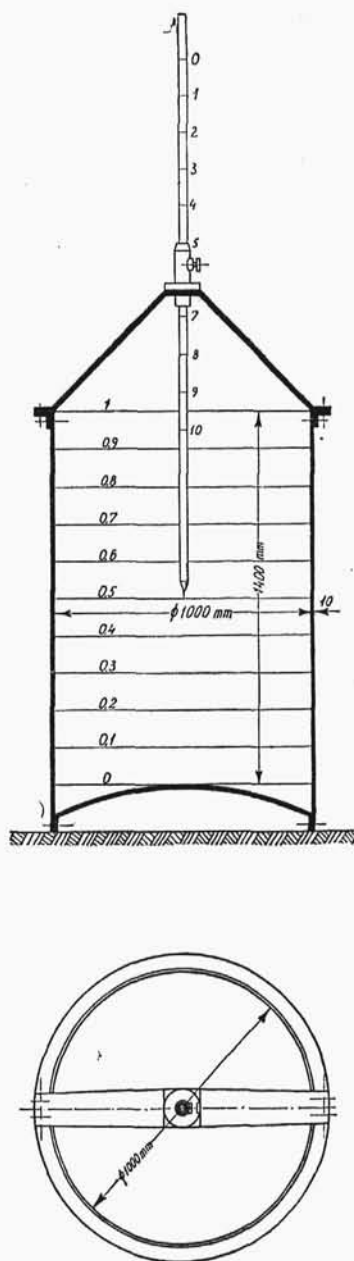
Z wymagań stawianych dokła-  
dności pomiaru różnicy poziomów  
zwierciadła wody i pomiaru czasu  
wynika dla każdej objętości najmniej-  
sza dopuszczalna powierzchnia dna.

Jeśli do pomiarów używa się  
naczyń przenośnych, to powinny one  
mieć taki kształt i taką grubość ścian,  
by z powodu wewnętrznego ciśnienia  
w czasie napełniania nie następowa-  
ło odkształcenie. Dla ułatwienia kon-  
troli obserwacji i prostego wyrówna-  
nia błędów obserwacji najkorzystniej-  
sze i najdogodniejsze jest naczynie  
o kołowym przekroju poziomym, sta-  
łym na całej wysokości.

Szwajcarskie przepisy<sup>74)</sup> pole-  
cają następujące wymiary kołowych  
zbiorników (rys. 175):

	do pomiaru przepływu				
	5	15	30	120	l/sek
używać naczyń o wymiarach					
średn.	500	700	1000	1400	mm
wysok.	700	1000	1400	2000	mm
grub. bl.	3	5	10	15	mm

Dla uniknięcia nawet małych  
zmian przekroju ściany zbiornika nie  
powinny być nitowane tylko spawa-



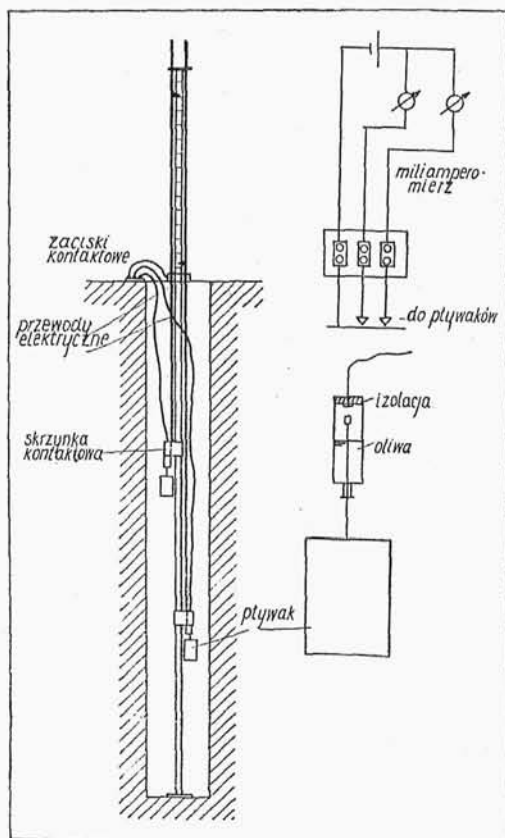
Rys. 175.

Zbiornik do pomiaru przepływu.

<sup>74)</sup> Normen für Wassermessungen bei Durchführung von Abnahmeversuche  
an Wasserkraftmaschinen. Normen des Schweizerischen Ingenieur und Architekten  
Vereines. 1924.

ne. Zbiorniki wykonuje się z blachy żelaznej, pocynkowanej po wykonaniu zbiornika (dla zabezpieczenia przeciwko rdzewieniu).

Cechowanie małych zbiorników odbywa się przez ważenie naczynia przy różnych napełnieniach. Jeżeli sposób ten jest niemożliwy do zastosowania, to robi się dokładny pomiar naczynia. Odstę-



Rys. 176.

Schemat sygnalizacji elektrycznej w Laboratorium Wodnym Politechniki Warszawskiej.

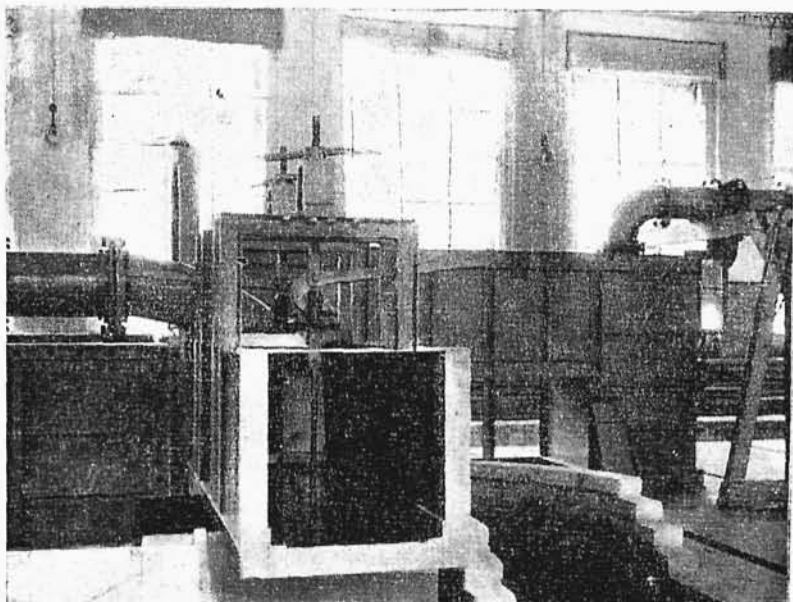
py wymiarów poziomych należy obierać nie większe niż  $\frac{1}{10}$  użytecznej wysokości zbiornika. W szczególności trzeba uwzględniać zmiany kształtu. Określenie pojemności zbiornika naturalnego, mającego służyć do celów pomiarowych, powinno nastąpić na podstawie zdjęć przekrojów \*).

\*) Pomiar pojemności zbiornika Boulder Canyon na rz. Colorado wykonano na podstawie zdjęć aerofotograficznych zbiornika przy różnych napełnieniach. Z konturów zalewów obliczono pojemność.

Dla każdego zbiornika pomiarowego trzeba ustalić (z cechowań) krzywą pojemności, z której dla każdego poziomu wody będzie można odczytać odpowiadającą mu objętość wody.

Bezpośredni pomiar objętości używany jest przeważnie w laboratoriach do cechowania innych przyrządów pomiarowych.

Najtrudniejszą rzeczą w tego rodzaju pomiarach jest uchwycenie położenia poziomu wody w zbiorniku w momencie rozpoczęcia i zakończenia obserwacji. Może to być wykonane przez zastosowanie sygnalizacji elektrycznej za pomocą pływaków (rys. 176 podaje sposób takiej sygnalizacji elektrycznej, zastosowanej w zbiorniku

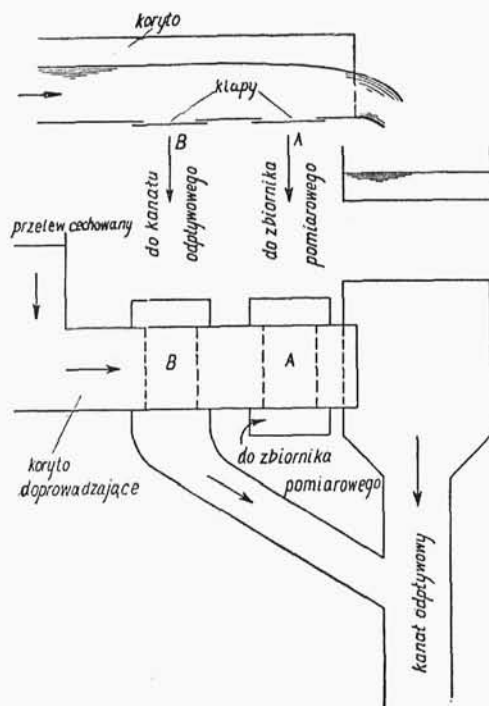


Rys. 177.

Urządzenie tarownicze Politechniki w Zurychu.

torowniczym Laboratorium Wodnego Politechniki Warszawskiej), albo przez nagłe wprowadzenie i odcięcie strumienia badanego przepływu do zbiornika pomiarowego. Fotografia 177 i rys. 178 przedstawiają sposób cechowania przelewu w laboratorium wodnym Politechniki w Zurychu. Woda z przelewu przechodzi do koryta, w którego dnie są umieszczone dwie kłapy „A” i „B” zamknięte w ten sposób, że jednym ruchem ręki można je otworzyć. Woda przechodzi początkowo przez koryto z zamkniętymi kłapami do kanału odprowadzającego. Po pewnym czasie, po ustaleniu się przepływu, przy jednoczesnym uruchomieniu stopera otwiera się kła-

pę „A” uderzeniem ręki, wprowadzając wodę do zbiornika pomiarowego. Po upływie określonego czasu otwiera się klapę „B”, zatrzymując stoper. W ten sposób dopływ wody do zbiornika zostaje odcięty nagle. Sposób opisany ma tę zaletę, że można czekać aż poziom wody w zbiorniku uspokoi się całkowicie i wówczas dokonać dokładnego odczytania wysokości zwierciadła wody, która w tych razach, gdy dopływu nie przerywamy, ulega stałym wahaniom.



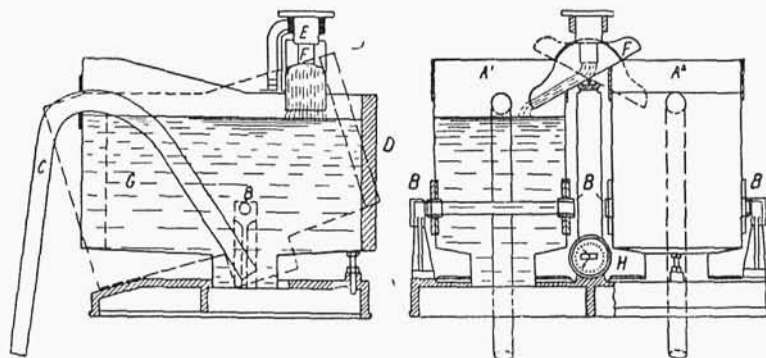
Rys. 178.

Schemat urządzenia tarowniczego Politechniki w Zurychu.

Przy pomiarze niewielkich przepływów wody stosowany bywa sposób bezpośredniego ważenia dopływającej wody. Używa się go przy próbach pomp, przy pomiarze wody zaopatrującej kotły i coraz częściej w laboratoriach wodnych do cechowania urządzeń pomiarowych. Określenie ilości wody przez bezpośrednie ważenie ma tę wyraźną wyższość, że na wyniki nie wywierają znacznego wpływu zmiany temperatury wody. Zwykle pomiar odbywa się przy pomocy dwóch naczyń, jedno jest napełniane, podczas gdy w tym czasie drugie jest ważone i opróżniane. Jako przykład podano urząd Linerta (rys. 179).

Urządzenie składa się z dwóch naczyń „A<sup>1</sup>” i „A<sup>2</sup>”, każde z nich może obracać się koło osi „B—B”. Wodę wprowadza się

do korytka „F”, wychylającego się na boki, z którego wpada do naczynia „A<sup>1</sup>” lub „A<sup>2</sup>”. Naczynia mają po jednej stronie przeciwwagę „D” tak dobraną, że gdy pewna ilość wody o określonej wadze dopłynie do naczynia, obraca się ono do położenia oznaczonego na rysunku kreskami i woda zaczyna z niego wypływać przez lewar „C”. Gdy poziom wody opadnie, przeciwwaga „D” spowoduje obrót naczynia do położenia pierwotnego. Lewar działa aż do



Rys. 179.  
Przyrząd Linerta.

całkowitego opróżnienia naczynia. Gdy naczynie przekręca się w położenie kreskowane, uderza w korytko „F” i kieruje dopływ do sąsiedniego naczynia. Zegar „H” notuje czas, w ciągu którego następuje napełnienie naczynia, i wagę cieczy, przy której naczynie się opróżnia.

## 2. Wycechowane otwory w dnie lub ścianie zbiornika

Otwór w dnie (rys. 180): pomiar polega na doprowadzeniu wody do zbiornika i odczytaniu — po ustaleniu się zwierciadła wody — jego wysokości ponad dnem zbiornika. Objętość dopływu równą objętości wypływu obliczymy ze wzoru:

$$Q = \mu \cdot a \sqrt{\frac{2gh}{1 - \left(\frac{a}{A}\right)^2}} \quad (59)$$

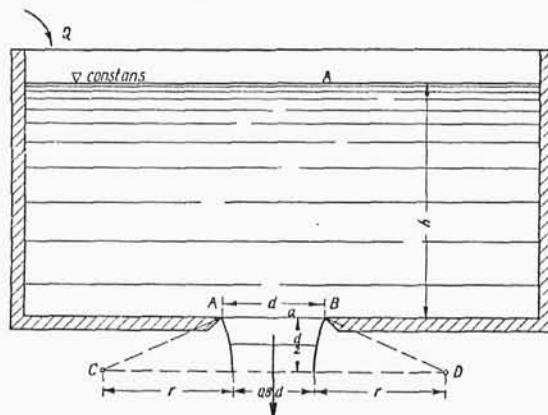
- $h$  — wysokość wody ponad dnem
- $a$  — przekrój otworu wypływowego
- $A$  — pole przekroju poziomego naczynia
- $g$  — przyspieszenie ziemskie.

Współczynnik  $\mu$  zależy od kształtu otworu wylotowego, a ponieważ nie jest stały w stosunku do różnych wartości  $h$ , musi więc



być naczynie pierwotnie wycechowane, t. zn. musi być znana zależność  $\mu = f(h)$ , by mogło służyć do dokładnych pomiarów.

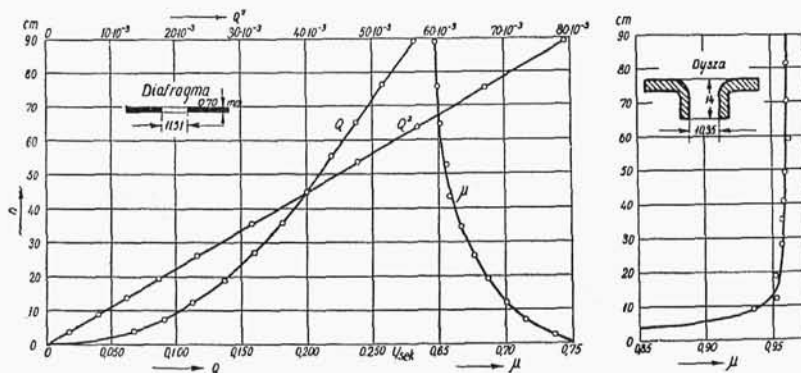
W niemieckiej literaturze pomiar ten nazwany jest pomiarem przy pomocy Danaidy. Otwory wypływowe są o ostrej krawędzi lub



Rys. 180.

Naczynie z otworem w dnie.

wykonywane jako dysze. Otworów lub dysz może być w dnie większa ilość, wówczas odstępów otworów wynoszą od dwukrotnej do czterokrotnej wartości średnicy otworów. Przy otworach o ostrej



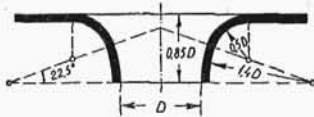
Rys. 181.

Wyniki cechowań A. Staussa.

krawędzi współczynnik  $\mu$  w miarę wzrostu ciśnienia maleje mniej więcej do wartości 0,64; przy dyszach rośnie szybko osiągając prawie stałą (przy dalszym wzroście ciśnienia) wartość 0,97. Wyniki cechowań dla obu wypadków przeprowadzone przez A. Staussa podano na rys. 181.

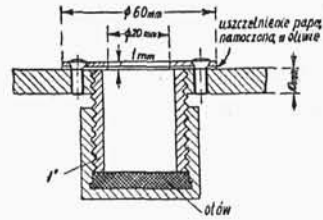
Wymiary znormalizowanej dyszy o współczynniku  $\mu = 0,97$  podaje rysunek 182, a otworu o ostrych krawędziach łącznie z ewentualnym zamknięciem — rysunek 183.

Wymiary otworów najlepiej wybierać tak, by wydatek jednego otworu wynosił około 1 litr/sek, ułatwi to cechowanie i sam pomiar. Najwyższe ciśnienie przyjmuje się  $h = 1,0 \dots 1,5$  m.



Rys. 182.

Znormalizowana dysza w dnie naczynia.

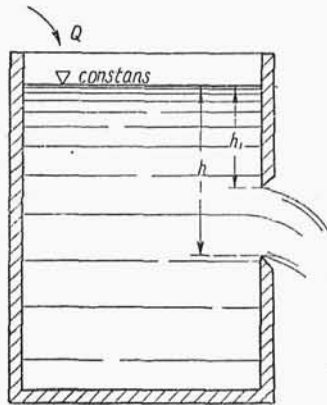


Rys. 183.

Zamykany otwór w dnie naczynia.

Dokładność pomiaru przy jego należytych przeprowadzeniu może być równa  $\pm 0,2\%$ .

Podobnie odbywać się będzie pomiar przez podstawione naczynie z otworem prostokątnym w ścianie (rys. 184). Ilość przepły-



Rys. 184.

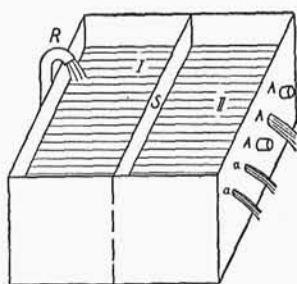
Otwór prostokątny w ścianie naczynia.

wu wyniesie:  $Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} (h^{3/2} - h_1^{3/2})$ , albo w razie większych prędkości przepływu wody przez naczynie:

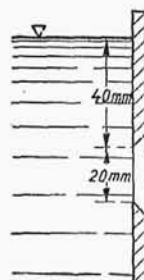
$$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} \left[ \left( h + \frac{v^2}{2g} \right)^{3/2} - \left( h_1 + \frac{v^2}{2g} \right)^{3/2} \right] \quad (60)$$

Oznaczają tu:  $h$  i  $h_1$  — głębokość górnej i dolnej krawędzi otworu pod zwierciadłem wody  
 $b$  — szerokość otworu  
 $v$  — prędkość dopływu wody.

Rzadziej obecnie używany bywa sposób pomiaru przy pomocy tak zwanego ciał wodnego (rys. 185). W ścianie zbiornika pomiarowego zrobionych jest na jednym poziomie kilka otworów „A” „a” o ostrej krawędzi i różnej średnicy. Otwory są zamknięte przy pomocy korków. Wodę przeprowadza się przewodem „R” do komory I, skąd — dla uspokojenia — przechodzi do komory II przez otwory,

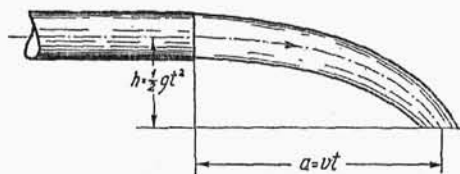


Rys. 185.  
Ciał wodny.



Rys. 186.  
Otwór  $\phi$  20 mm w ścianie naczynia.

wykonane w dolnej części przegrody „S”. Po doprowadzeniu wody do zbiornika pewną ilość dziur otwiera się, tak by woda w zbiorniku utrzymywała się na stałym poziomie. Ilość wypływu znajduje się na zasadzie poprzednio przeprowadzonych cechowań. Np. dla otworu  $\phi$  20 mm (rys. 186) i położeniu zwierciadła wody o 40 mm ponad górną krawędzią wypada  $Q = 0,23$  litr/sek lub 20 m<sup>3</sup>/dobę.



Rys. 187.  
Pomiar wypływu z przewodu rurowego.

Dość dokładne wyniki można też osiągnąć, określając prędkość wypływu z przewodu rurowego (rys. 187) na podstawie znajomości odległości  $a$  przecięcia się środka strugi wodnej z płaszczyzną poziomą odległą o  $h$  od osi rury.

Z zależności  $h = \frac{1}{2} g t^2$  oraz  $a = v t$  możemy napisać

$$v = a \sqrt{\frac{g}{2h}} = \frac{2,215 a}{\sqrt{h}}$$

$$Q = v \frac{\pi d^2}{4} \text{ m}^3/\text{sek}$$

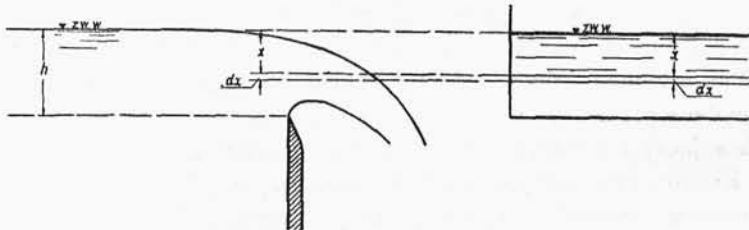
Jeżeli rura nachylona jest do poziomu pod kątem  $\alpha$ , wzór przekształci się na

$$v = \frac{2,215 a}{\cos \alpha} \sqrt{\frac{1}{h \pm a \operatorname{tg} \alpha}}$$

znak  $+$  dla pochylenia ku górze, — dla pochylenia ku dołowi. Doświadczenia wykonane w Politechnice Gdańskiej<sup>75)</sup> wykazały dokładność pomiaru obracającą się w granicach 0,4, ... 0,8%.

### 3. Pomiar przy pomocy przelewu

Pomiar przy pomocy przelewu polega na przegrodzeniu koryta przepływowego ścianą spiętrzającą wodę i zmierzeniu wysokości przelewającej się warstwy.



Rys. 188.  
Przelew.

Ilość wody obliczymy (rys. 188) wzorem:

$$dQ = dA v = dA \sqrt{2gx}; \quad Q = \int_0^h dA \sqrt{2gx}$$

$A$  oznacza pole przepływu,  $v$  — prędkość przepływu.

Przy założeniu regularnego kształtu przekroju przelewowego (prostokąta, trapezu, trójkąta lub koła) prawą stronę równania możemy zcałkować i otrzymać prosty wzór na wydatek wody. Np. dla przekroju prostokątnego o szerokości  $b$  otrzymujemy teoretycznie

$$Q = \int_0^h b \sqrt{2g} x^{1/2} dx = \frac{2}{3} b \sqrt{2g} h^{3/2} \text{ m}^3/\text{sek}.$$

<sup>75)</sup> R. Winkel. Ballistische Wassermengen-Ermittlung, Bautechnik, 1931 r. Nr 38, Hydrologia III.