

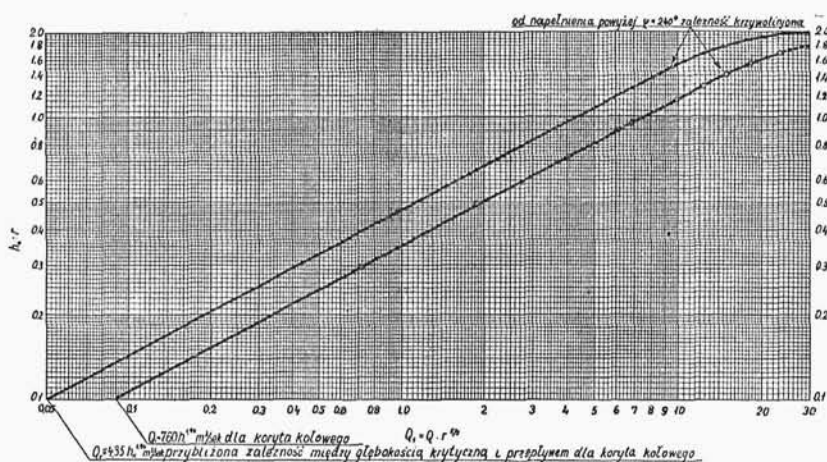
nym Politechniki Warszawskiej, doprowadziły do ustalenia wzorów uzależniających przepływ od głębokości końcowej h_o .¹⁰²⁾

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.

wody preparatu (soli lub farby) rozpoczęte były w połowie ubiegłego stulecia. Pierwsze próby robił M. Schlösing w 1863 roku. Dalsze próby przeprowadzali i metodę udoskonalali C. Stromenger (1896—1905) i F. Iterson (1900—1904). Właściwe jednak wprowadzenie w Europie pomiaru objętości przepływu wody przy pomocy rozrzedzenia roztworu soli przypisywane jest Szwajcarom, A. Boucherowi i R. Melletowi.

Zasadniczo rozróżniamy trzy chemiczne metody pomiaru przepływu wody. Czysto chemiczną (Salzverdünnungsverfahren), chemiczno-elektryczną Allena (Salzgeschwindigkeitsverfahren, Salt velocity method) oraz chemiczno-elektryczną Barbagelatę. We wszystkich powyższych metodach używa się roztworu soli, lecz zasada pomiaru jest różna.

Przy pierwszej z tych metod objętość przepływającej wody zostaje określona z rozcieńczenia silnego roztworu soli wprowadzane go przez pewien określony czas w stałej ilości na jednostkę czasu. Sposób drugi polega na mierzeniu prędkości przenoszenia się nagle wstrzelonego roztworu soli. Korzysta się tu z właściwości większego przewodzenia prądu elektrycznego przez roztwór soli niż przez zwykłą wodę. Sposób ostatni, Barbagelata, ma wiele podobieństwa z oryginalną metodą chemiczną, różni się zaś od niej sposobem określenia rozcieńczenia soli w wodzie. Odbyna się to przy pomocy przyrządu elektrycznego, gdy w oryginalnej metodzie chemicznej wykonywane bywa przy pomocy miareczkowania (Titration).

Ostatnio przeprowadzone doświadczenia (w Amsteg, Walchen i Obernach) wykazały, że metoda chemiczna należy do najdokładniejszych sposobów pomiaru przepływu wody. Jednak koniecznym warunkiem dokładności jest gwarancja dobrego przemieszania się wprowadzonego roztworu soli z przepływającą wodą.

1. Metoda rozcieńczenia roztworu.¹⁰³⁾

Jeżeli przepływ naturalny wody wynosi Q m³/sek i zawiera w sobie k_0 g/m³ tej soli, która będzie użyta do pomiaru, to po wprowadzeniu do przepływającej wody silnego roztworu soli w ilości q m³/sek o koncentracji k_1 i po dobrym przemieszaniu mieszanina wody i roztworu soli osiągnie pewną koncentrację k_2 mierzona podobnie jak k_0 i k_1 w gramach na 1 m³.

Istnieć więc będzie następująca zależność: ilość soli przepływająca w jednostkę czasu w miejscu doprowadzenia roztwo-

¹⁰³⁾ Według O. Kirschmera: Das Salzverdünnungsverfahren für Wassermessungen. Wasserkraft und Wasserwirtschaft. 1931. Nr 18.

ru równa się tej ilości soli, która przepływa w jednostkę czasu w miejscu poboru prób, a więc $Q k_0 + q k_1 = (Q + q) k_2$ skąd

$$Q = q \frac{k_1 - k_2}{k_2 - k_0} \quad \text{m}^3/\text{sek} \quad (92)$$

Ponieważ k_2 w porównaniu do k_1 jest zawsze bardzo niewielkie, można je w liczniku opuścić. Stosowanie wzoru uproszczonego $Q = q \frac{k_1}{k_2}$ m³/sek jest tylko wówczas dopuszczalne jeśli również k_0 jest niewielkie w stosunku do k_2 . Przy dużych rozcieńczeniach wprowadzonego roztworu warunek ten nie bywa spełniony, uproszczenia więc stosować nie należy, gdyż powoduje ono zbyt duże błędy pomiaru.

Należy starać się, by wprowadzany roztwór soli mieszał się całkowicie i równomiernie z przepływającą wodą. Jeśli nie daje się tego osiągnąć, to k_2 należy obliczyć jako wartość średnią. W tym celu trzeba przekrój, w którym czerpie się próby, podzielić na poszczególne pola i próbki wody czerpać ze środków ciężkości tych pól.

Jeśli zaczerpnięta próba wykazuje koncentrację soli k_i , a v_i jest składową prędkości wody w kierunku prostopadłym do przekroju, wówczas przez pole o wielkość ΔA płynie na sekundę sól w ilości $k_i v_i \Delta A$.

Dla całego przekroju A otrzymamy: $\Sigma (k_i v_i \Delta A) = (Q + q) k_2$. Ponieważ $(Q + q) = \Sigma (v_i \Delta A)$ możemy napisać $\Sigma (k_i v_i \Delta A) = k_2 \Sigma (v_i \Delta A)$ skąd

$$k_2 = \frac{\Sigma (k_i v_i \Delta A)}{\Sigma (v_i \Delta A)} \quad (93)$$

Jeżeli obierzemy wszystkie pola ΔA jednakowej wielkości, to otrzymamy $k_2 = \frac{\Sigma (k_i v_i)}{\Sigma v_i}$. Przy niezupełnym przemieszaniu musi być uwzględniony rozkład prędkości. Zasadniczo nie jest prawidłowo uwzględnienie średniej koncentracji, obliczonej jak średnia arytmetyczna z koncentracją poszczególnych prób lub z koncentracji średniej próby, którą znów otrzymuje się przez zmieszanie razem poszczególnych prób. W wyniku obliczenia, jak wykazali F. Kuntschen¹⁰⁴⁾ i D. Thoma,¹⁰⁵⁾ mieścić się będzie błąd, który teoretycznie

¹⁰⁴⁾ F. Kuntschen. Essais comparatifs dans les canaux de fuite de l'usine d'Amsteg. Mitteilungen des Schweiz. Amtes für Wasserwirtschaft, Bern, 1926, Nr

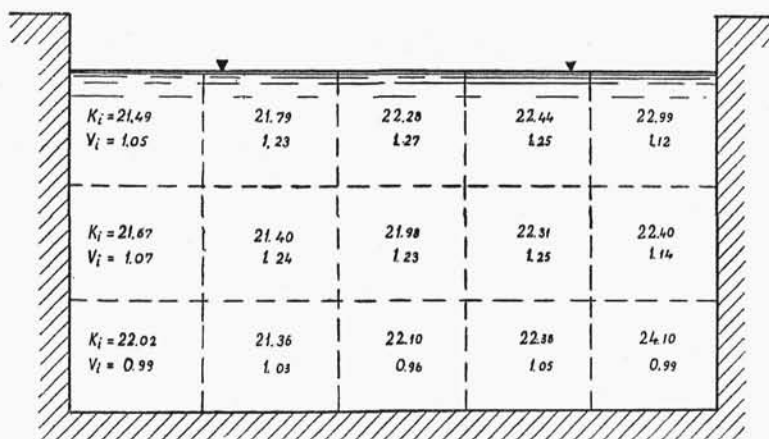
¹⁰⁵⁾ D. Thoma, Bemerkungen zum Titrationsverfahren für Wassermessungen. Wasserkraft und Wasserwirtschaft, 1928, Nr 15.

będzie tym większy, im bardziej wartość stosunku

$$\frac{\text{średnie } (k_i v_i)}{\text{średnie } k_i \times \text{średnie } v_i}$$

różnić się będzie od jedności.

Do zorientowania się o wielkości błędu posłuży najlepiej przykład pomiaru przepływu. W pewnym doświadczeniu stwierdzono w wodzie płynącej $k_0 = 1,49$. Podane cyfry dla k_0 , k_1 , k_2 nie oznaczają absolutnych koncentracji, ale są do nich proporcjonalne. Cyfry wykazują ile zużyto cm^3 roztworu azotanu srebra, by chlorek sodu NaCl zawarty w 1 litrze zmienić na AgCl . Do wody wprowadzono $q = 0,336$ l/sek roztworu NaCl o koncentracji $k_1 = 245663$. W przekroju pobierania prób (rys. 214) określono w różnych miejscach koncentrację soli oraz prędkości wody przy pomocy młynka hydrometrycznego. Na rys. 214 podano określone koncentracje i prędkości w poszczególnych polach przekroju. Największa koncentracja różni się od średniej arytmetycznej $k_2 = 22,174$ o około $+9\%$, najmniejsza o -4% .



$K_1 = 21,49$ $V_1 = 1,05$	21,79 1,23	22,28 1,27	22,44 1,25	22,99 1,12
$K_1 = 21,67$ $V_1 = 1,07$	21,40 1,24	21,98 1,23	22,31 1,25	22,40 1,14
$K_1 = 22,02$ $V_1 = 0,99$	21,36 1,03	22,10 0,96	22,38 1,05	24,10 0,99

Rys. 214.

Koncentracja soli i prędkość wody w poszczególnych polach przekroju.

Obliczenie przepływu bez zwracania uwagi na rozkład prędkości w przekroju (uwzględniając $k_2 = \frac{\sum k_i}{i} = 22,174$) dało w wyniku $Q = 0,336 \frac{245663 - 22,174}{22,174 - 1,49} = 3987$ l/sek. Obliczenie ścisłejsze przy uwzględnieniu rozkładu prędkości dało w wyniku:

$$k_2 = \frac{\sum (k_i v_i)}{\sum v_i} = 22,164 \text{ oraz } Q = 3989 \text{ l/sek.}$$

Rzeczywista zaś wartość przepływu określona z pomiaru skrzynią tarowniczą wynosiła $Q = 3979 \text{ l/sek.}$ Jak widać z powyższego przykładu błąd obliczenia przybliżonego jest niewielki ($\Delta Q = +0,2\%$) i nawet nieco mniejszy od błędu teoretycznie prawidłowo obliczonej wartości $Q = 3989 \text{ l/sek}$ (tutaj bowiem $\Delta Q = +0,25\%$). To nieoczekiwane zjawisko często stwierdzane znajduje swoje uzasadnienie w tym, że—przy niespokojnym przepływie w przekroju poboru—niedokładności pomiaru prędkości mogą być dość znaczne, wobec czego dochodzą nowe błędy, które przy ścisłym obliczeniu koncentracji nie zawsze się wyrównują. Ogólnie na zasadzie badań przeprowadzonych w Obernach można o błędach wyżej objaśnionej metody powiedzieć co następuje.

1. Z wypróbowanych metod pomiarowych, jak przy pomocy europejskich i amerykańskich młynków, przelewów, metody Allena i oryginalnej chemicznej, najdokładniejsza okazała się ostatnia. W 26 doświadczeniach otrzymano błąd przeciętny $\pm 0,029\%$ w porównaniu do wyników pomiarów bezpośrednich przy pomocy podstawionego zbiornika.

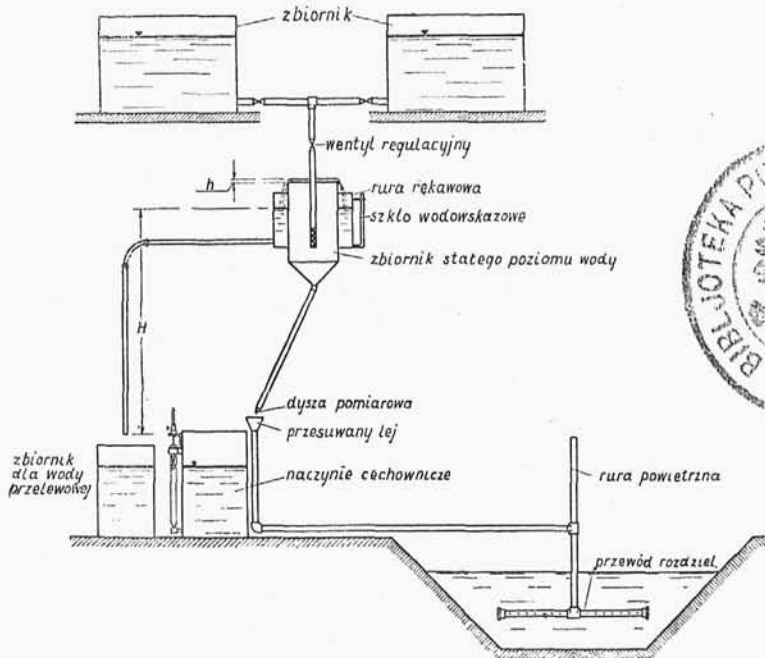
2. Błąd może być dodatni i ujemny, częściej jednak wypada dodatni, więc obliczona objętość przepływającej wody jest nieco za duża.

3. Do określenia koncentracji k_2 soli w miejscu poboru wystarcza w ogóle zwykła średnia arytmetyczna. W doświadczeniach w Amsteg w pewnym pomiarze stwierdzono na przykład różnice koncentracji dochodzące aż do $+16,5\%$ i $-20,5\%$ w stosunku do średniej wartości. Mimo tego niedokładnego przemieszania błąd w obliczeniu ilości przepływu na podstawie średniej wartości k_2 nie dochodził do 1% .

Urządzenie do wprowadzania do płynącej wody roztworu soli przedstawione jest na rys. 215. Przy wprowadzaniu roztworu soli należy zwrócić baczną uwagę, by dopływ roztworu soli w czasie jego wprowadzania do przepływającej wody nie ulegał zmianie. Schemat takiego urządzenia wyobrażony na rys. 215 nadaje się przede wszystkim do pomiarów dużych ilości wody przy próbach odbiorczych turbin.

Ze zbiornika górnego, gdzie mieści się przygotowany zapas roztworu soli, dopływa on do naczynia składającego się z dwu części, wewnętrznej i zewnętrznej. Część wewnętrzna zaopatrzona jest w przelew, przez który nadmiar roztworu odpływa do części zewnętrznej, otaczającej wokół część naczynia z przelewem, a stąd do zbiornika dolnego, z którego roztwór soli może być z powrotem

przepompowany do zbiornika górnego. Roztwór używany do pomiaru pobierany jest z dna naczynia przelewowego przy pomocy rury i wprowadzany do przepływającej wody jako strumień swobodny, albo—co jest skuteczniejsze—przez specjalny przewód rozdzielczy odpowiednio przewietrzony. Wlot do przewodu rozdzielczego musi być tak ukształtowany, aby nie dopuścić do tworzenia się piany. Osiąga się to na przykład przez umieszczenie w leju wlotowym siatki o oczkach 1 mm.



Rys. 215.

Urządzenie do wprowadzenia roztworu soli do wody.

Regulacja doprowadzanego roztworu soli odbywa się przez wymienne dysze różnej wielkości, które powinny być uprzednio wycechowane.

Stałość wypływu zależy do tego, jak dokładnie może być utrzymana wysokość przelewu h . Przez przelew płynie na sekundę objętość q_1 , która jest proporcjonalna do $h^{3/2}$, a więc $q_1 = ah^{3/2}$. Ta sama ilość płynie przez rurę odpływową do zbiornika dolnego. Jeśli H jest różnicą poziomu wody w naczyniu zewnętrznym i końcem

rury odpływowej, to $q_1 = b H^{1/2}$. Po zróżniczkowaniu obu stron równania otrzymujemy:

$$dq_1 = \frac{3}{2} a h^{1/2} dh = \frac{1}{2} b H^{-1/2} dH$$

$$\frac{dH}{dh} = \frac{3 a h^{1/2} H^{1/2}}{b}$$

zaś po wyeliminowaniu współczynników a i b :

$$dH = \frac{3 H}{h} dh.$$

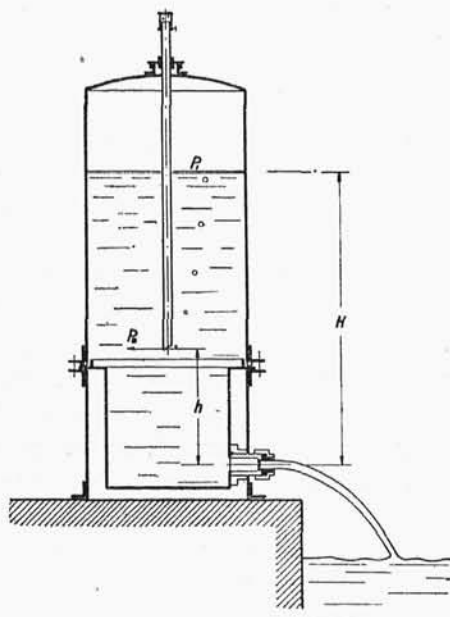
Jeżeli więc zmieni się wysokość przelewu h o niewielką wartość dh , to zmiana ta odbije się w rurce piezometrycznej zbiornika zewnętrznego w skali zwiększonej. Powiększenie jest tym silniejsze im większe obrano H . Np. jeśli $H = 1$ m a h ustaliło się na 5 mm, to wypadnie $dH = 600 dh$. Przy pomocy kurka umieszczonego na rurze, doprowadzającej roztwór do naczynia przelewowego, można utrzymać wahania poziomu w naczyniu zewnętrznym w granicach $dH = \pm 20$ mm. Tej wartości odpowiada zmiana wysokości przelewu $dh =$ około $1/30$ mm.

Wielkość poszczególnych zbiorników, zwłaszcza górnych zaopatrujących, zależeć będzie od wielkości przepływu. Sposób obliczenia objaśni najlepiej przykład.

Należy pomierzyć przepływ $Q = 35$ m³/sek. Użyjemy roztworu soli o koncentracji 250 g/litr roztworu (zwykle używa się roztworu 25 30%). Jeżeli przyjmiemy dopuszczalne rozcieńczenie 1 : 20000 to ilość doprowadzonego roztworu na sekundę wyniesie co najmniej $q = \frac{35000}{20000} = 1,75$ litr/sek. Jeśli pomiar trwać będzie 10 minut, potrzeba będzie 1,05 m³ roztworu oraz 262,5 kg soli. Zbiornik należało by wybrać tak duży, by jego pojemność wystarczyła na dwa lub trzy pomiary. Zwykle daje się jeszcze zbiornik zapasowy tej samej wielkości. Pomiary nie ulegają wówczas przerwie. Zawsze mamy do rozporządzenia jeden zbiornik na przygotowanie roztworu soli, podczas gdy z drugiego czerpie się roztwór do pomiaru. Jeśli są urządzenia, pozwalające na przyspieszenie procesu rozpuszczania soli, to czas przygotowania roztworu soli może być utrzymany w granicach 20 30 minut.

Przy pomiarach w potokach górskich, gdzie dojście jest często trudne, urządzenie wyżej opisane jest niedogodne. Używać można

wówczas przyrządu Otta (rys. 216), zbudowanego na zasadzie flaszki Mariotte'a. W naczyniu normalnej wielkości mieści się 120 litrów roztworu. Do każdego naczynia należą wymienne dysze o średnicy od 4 do 15 mm, które pozwalają w odpowiednich granicach regulować sekundowy wypływ roztworu z naczynia.



Rys. 216

Przyrząd Otta do chemicznego pomiaru przepływu wody.

Odpowiednio do oznaczeń na rys. 216 otrzymujemy:

$$\frac{p_1}{\gamma} + H = \frac{p_0}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}; \quad \frac{p_0 - p_1}{\gamma} = H - h$$

Otrzymujemy z tych równań $v = \sqrt{2gh}$, co oznacza, że prędkość wypływu pozostaje niezmienną, dopóki poziom cieczy w naczyniu nie osiągnie spodu rury powietrznej. Wypływ $q = \mu A \sqrt{2gh}$ m³/sek przy czym wartość μ dla używanych dysz wypływowych należy określić przez pomiar bezpośredni.

Czas pomiaru powinien trwać najmniej 5 minut. Zasadniczo lepiej dopuścić większe rozcieńczenie, niż zmniejszyć czas wypuszczania roztworu. Ze względu na wymiary naczynia i na pewien zapas bezpieczeństwa największy wypływ nie powinien przekraczać 0,35 litr/sek. Jeżeli dopuści się rozcieńczenie 1 : 30000, to można

zmierzyć przepływ $Q = 10 \text{ m}^3/\text{sek}$. Przy tych stosunkach dokładność osiągnięta wyniesie około 3%.

Co się tyczy wyboru soli, to w praktyce używa się soli kuchennej (NaCl) ze względu na niższą cenę i mniejszą zależność rozpuszczalności od temperatury.

Koncentrację roztworu przyjęto w pobliżu granicy nasycenia: 250 g/litr roztworu. Całkowitego nasycenia roztworu należy unikać ze względu na długi czas rozpuszczania i obawę pozostania części soli w roztworze—w stanie nierozpuszczonym, a rozpuszczających się dopiero po wprowadzeniu roztworu do przepływającej wody.

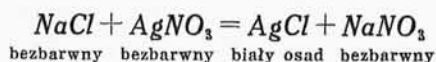
Wybór odpowiedniego miejsca dla poboru prób nie przedstawia zwykle trudności, określa się ono samo z miejscowych warunków. Jeżeli nie ma pewności, czy w obranym miejscu już nastąpi dokładne przemieszanie, można zrobić próbę przy pomocy zafarbowania wody, co również może dać wskazówkę, kiedy trzeba rozpocząć branie prób. W potokach górskich przemieszanie następuje na stosunkowo krótkiej przestrzeni, odstęp czasu do chwili wzięcia próby musi być dostatecznie długi, by roztwór mógł wypełnić także miejsca martwe. Przy zakładach wodnych wybór miejsca poboru prób jest związany z miejscowymi warunkami. Gdy istnieje obawa, że przejście roztworu soli przez turbinę nie wystarcza do przemieszania, to trzeba się starać, by roztwór soli już przy wprowadzaniu był możliwie jednostajnie rozłożony w przekroju.

Pobór prób powinien odbywać się zasadniczo w różnych miejscach przekroju przy pomocy butelek szklanych lub tłoczonych flaszek z blachy aluminiowej. Należy unikać naczyń lutowanych. Butelki muszą być przedtem dokładnie wypłukane roztworem, który został użyty do badań (tylko o mniejszej koncentracji).

Objętość pobieranej próby winna wynosić w każdym miejscu najmniej $\frac{1}{2}$ litra (względ na pewność badania wyników rozcieńczenia).

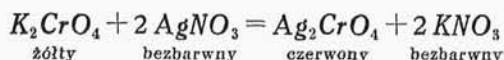
Dla określenia koncentracji roztworu soli rozporządzamy w analizie chemicznej bardzo ścisłymi metodami. Szczególnie korzystne jest to, że przy chemicznej metodzie pomiaru przepływu nie chodzi o absolutne koncentracje tylko o wartości porównawcze.

Najprostszym sposobem, godnym polecenia, jest metoda miareczkowania Mohra, którą po krótkim przygotowaniu i ćwiczeniu może przeprowadzać każdy inżynier obeznany z pomiarami wody. W metodzie Mohra określa się zawartość NaCl w naturalnym roztworze wodnym przez strącenie chloru Cl przy użyciu azotanu srebra:



Koniec reakcji rozpoznaje się przez dodanie indykatora (roztworu dwuchromianu potasu K_2CrO_4): jeśli wszystek Cl jest strącony w postaci $AgCl$, to każda dalsza kropla $AgNO_3$ reaguje z indykatorem. Początek reakcji indykatorowej rozpoznaje się od razu, gdyż pierwotne żółte zabarwienie roztworu przyjmuje wyraźną barwę czerwoną.

Prócz soli kuchennej używać można roztworu dwuchromianu potasu*), którego ilość w badanych próbkach wykrywa się miareczkowaniem też przy pomocy azotanu srebra:



Wskazane jest trzymać się następującego wypróbowanego sposobu: z roztworu, w którym określamy zawartość soli (wprowadzany roztwór, pobrany roztwór, woda płynąca), bierze się próbę objętości 5 cm^3 . Rozpuszcza się azotan srebra w proporcji 2 gr na 1 litr destylowanej wody. Dodaje się 5 6 kropel roztworu indykatora, który nasycony został na zimno. Jeśli pożądana jest przy określeniu dokładność 1^0_{00} , to wychodzi się z następującego założenia: przy dodawaniu roztworu azotanu srebra z próbki można przy pewnej wprawie określić zmianę koloru już przy różnicy jednej kropki. Ponieważ objętość kropki wynosi okragło $0,02\text{ cm}^3$, dodawana ilość azotanu srebra musi wynosić co najmniej 20 cm^3 . Objętość taka jest konieczna, gdyż — przy wskazanej wyżej mocy roztworu azotanu srebra — w próbce jest $13,77\text{ mg NaCl}$. Jednak próbka 5 cm^3 wprowadzonego roztworu zawiera znacznie więcej $NaCl$, natomiast tej samej pojemności próbka wody płynącej znacznie mniej. Trzeba więc zużyć przy miareczkowaniu wprowadzanego roztworu soli stosunkowo dużą ilość roztworu azotanu srebra, gdy przy strąceniu chloru z próbki wody płynącej już jedna kropla bywa zbyt dużą ilością do jego strącenia. Jeżeli chcemy w obydwu wypadkach używać tej samej ilości roztworu azotanu srebra, to należy roztwór soli rozcieńczyć destylowaną wodą, a z próbek płynącej wody i mieszaniny wody z roztworem taką ilość wody odparować, by próbki 5 cm^3 zawierały co najmniej $13,77\text{ mg NaCl}$. Przez to sprowadzenie ilości soli do mniej więcej jednakowych porcyj w próbkach odpada błąd metody Mohra, która przy wybitnie różnych koncentracjach daje wartości niedokładne.

Przykład.

Przy pomiarze użyto $q = 0,337\text{ l/sek}$ roztworu soli. Z tego roztworu średnią próbę 5 cm^3 rozcieńczono w 245 cm^3 destylowanej wody. Z kolei z tak rozcieńczone-

*) Poza tym bywa stosowany roztwór $(NH_4)_2SO_4$ oraz $MnSO_4$.

go roztworu na próbę 5 cm³ zużyto 32,1 cm³ roztworu azotanu srebra do całkowitego strącenia chloru. Otrzymuje się wobec tego koncentrację:

$$k_1 = 32,1 \cdot \frac{1000}{5} \cdot \frac{245+5}{5} = 321000 \text{ cm}^3 \text{ roztworu } AgNO_3$$

redukcja
na 1 litr

w 1 litrze badanego roztworu.

W miejscu poboru w 10 punktach pobrano próby 1/2-litrowej objętości, po czym wszystkie je zmieszano. Z tej mieszaniny wzięto 500 cm³ i odparowano w elektrycznym piecu do ilości 5 cm³. Do strącenia chloru zużyto 31,6 cm³ roztworu azotanu srebra. Otrzymuje się więc (średnio z 5 prób):

$$k_2 = 31,6 \cdot \frac{1000}{500} = 63,2 \text{ cm}^3 \text{ roztworu } AgNO_3$$

w 1 litrze badanego roztworu.

Z wody przepływającej (mierzonej) zaczerpnięto 1 litr i odparowano też do 5 cm³, a potem do strącenia chloru zużyto 1,8 cm³ roztworu azotanu srebra, wobec tego:

$$k_0 = 1,8 \text{ cm}^3 \text{ roztworu } AgNO_3 \text{ w 1 litrze badanego roztworu.}$$

Aby osiągnąć dokładność pomiaru 1^o/₁₀₀ trzeba by odparować większą ilość wody. W praktyce jednak wystarczy objętość jednego litra. Jeżeli zawartość soli w przepływającej wodzie jest mała (jak w przytoczonym przykładzie), to błąd w określeniu k_0 jest bez znaczenia, jeśli zaś zawartość soli jest duża, to do dokładnego określenia k_0 ilość jednego litra będzie dostateczna.

Poszukiwana objętość przepływu wody wyniesie:

$$Q = q \cdot \frac{k_1 - k_2}{k_2 - k_0} = 0,337 \cdot \frac{321000 - 63,2}{63,2 - 1,8} = 1761,5 \text{ l/sek.}$$

Zamiast metody Mohra częstokroć używa się bardziej kłopotliwej lecz prawidłowszej metody Volharda, która ma tę zaletę w porównaniu z metodą Mohra, że można wrócić do punktu początkowego, jeśli przeoczyło się chwilę końcową dodawania strącającego roztworu.

Przy miareczkowaniu w obydwóch metodach trzeba obserwować moment zmiany zabarwienia żółtego na czerwony, co oczywiście uzależnione jest od obserwatora. Ponieważ jednak zmiana koloru przy obranym indykatorze występuje wyraźnie, więc chwila zmiany koloru obserwowana jest zwykle jednocześnie przez różnych obserwatorów. Jeśli woda przepływająca zawiera dużo części zawieszonych, co ma miejsce w potokach górskich w czasie topnienia śniegu i po silnych deszczach, to trzeba przedtem próbki odpowiednio przefiltrować, w przeciwnym razie trudno będzie zaobserwować zmianę koloru.

Wadą opisanej metody chemicznej jest to, że część prób musi być odparowana. Strata czasu nie odgrywa tu roli, gdyż przez użycie elektrycznego pieca lub odpowiednich kąpeli temperaturę da się utrzymać w bardzo ścisłych granicach i w krótkim czasie mogą być

odparowane duże ilości wody. Jest jednak ważne, by przy odparowaniu były zachowane wszelkie ostrożności, żeby uniknąć strącenia wykryszalizowanych soli. Nowe doświadczenia w laboratorium w Dreźnie i Ruhrverbandu wykazały, że można miareczkować dość dokładnie również bez odparowywania, gdy się z jednej strony weźmie większe próby (około 250 cm³) przepływającej (badanej) i zasolonej wody, a z drugiej strony osłabi roztwór azotanu srebra.

Dużą zaletą tej metody pomiaru przepływu wody jest to, że odpada pomiar przekroju, odpada więc poważne źródło błędów. Koszt urządzenia nie jest większy w porównaniu z urządzeniami przy pomiarze młynkiem. Czas pomiaru jest znacznie krótszy (15 20 minut). Określenie przepływu możliwe w ciągu 2 godzin, nie wliczając w to czasu odparowywania.

O wyborze odpowiedniego miejsca pomiaru powinny zdecydować uprzednio przeprowadzone badania z zabarwianiem przepływu. Wskażą one nie tylko, czy następuje dobre wymieszanie, a więc gdzie powinny być obrane przekroje doprowadzenia roztworu oraz pobierania prób, ale dadzą również orientację o czasie trwania doprowadzania roztworu oraz o jego ilości.

Gwarancję dobrego wymieszania możemy mieć wówczas, jeśli w potokach górskich obierzemy dostatecznie długi odcinek pomiarowy bez przestrzeni martwych oraz gdy przepuścimy roztwór przez zakład z turbinami Peltona. W zakładach wodnych z turbinami Francisza i propelerowymi wymieszanie dobrego mieć nie będziemy i trzeba stosować dodatkowe urządzenia.

Ostatnio przeprowadzone doświadczenia przez O. Kirschmera¹⁰⁶⁾ doprowadziły go do wniosku, iż metoda wyżej opisana może dawać wówczas dobre rezultaty, a nawet przewyższać inne metody pomiaru przepływu wody, jeśli:

1. woda przepływająca nie posiada większych zanieczyszczeń chemicznych,
2. ograniczamy się do pomiarów nie większych niż 5 m³/sek,
3. rozcieńczenie nie przekracza wartości 1 : 20000,
4. wymieszanie jest doskonałe.

2. Metoda chemiczno-elektryczna.

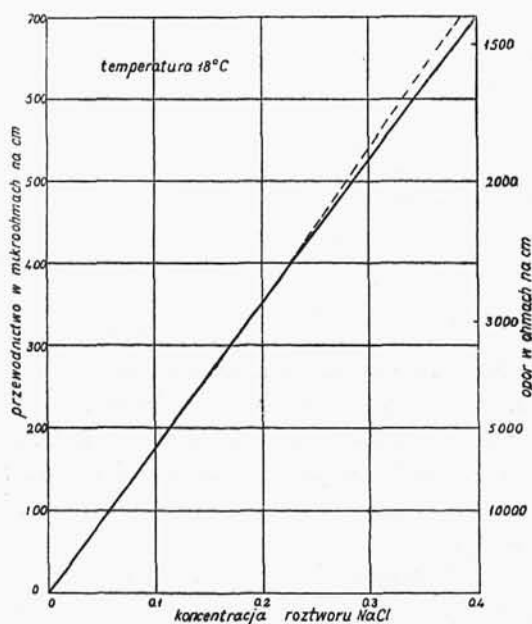
W ostatnich czasach rozpowszechnia się metoda elektrometryczna lub potencjometryczna, przy użyciu której obserwuje się nie zmianę koloru lecz zmianę potencjału elektrycznego. Koniec strąca-

¹⁰⁶⁾ O. Kirschmer. Erfahrungen mit dem Salzverdünnungs-Verfahren. Wasserkraft und Wasserwirtschaft, 1937, Nr 10/11.

nia osadu rozpoznaje się przez skok potencjału, który jest tym wyraźniejszy, im silniejszy jest roztwór.

Zamiast określania rozrzedzenia roztworu soli na drodze chemicznej (przez strącenie chloru), można tego dokonać przez zmierzenie zmiany przewodnictwa prądu elektrycznego tzw. metodą chemiczno-elektryczną Barbagelaty¹⁰⁷⁾. Zmiana w przewodnictwie przepływającej wody naturalnej i zasolonej określana bywa przy pomocy mostka Wheatstone'a, przedtem odpowiednio wyskalowanego.

Metoda ta wymaga znajomości całkowitej objętości wprowadzonego roztworu soli i jego koncentracji oraz czasu potrzebnego na wymieszanie. Konieczna jest również znajomość zmiany przewodnictwa roztworu w zależności od temperatury.



Rys. 217.

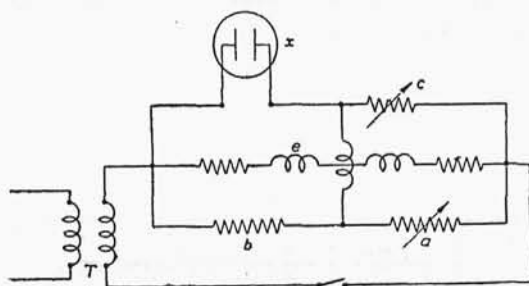
Zależność pomiędzy koncentracją roztworu soli i jego przewodnictwem elektrycznym.

Przewodnictwo prądu elektrycznego roztworu soli jest proporcjonalne do koncentracji soli (rys. 217). Można więc określić koncentrację soli w roztworze przez pomiar oporu elektrycznego, przy czym musi być uwzględniona temperatura roztworu, gdyż ma ona duży wpływ na zmianę przewodnictwa.

¹⁰⁷⁾ A. Barbagelata. Chemical-electric measurement of water. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1928, Nr 3.

Przez użycie prądu elektrycznego zwykłej częstotliwości i dość niskiej gęstości prądu na elektrodach unika się wszelkich trudności wywołanych polaryzacją. Dostateczną czułość daje potencjał kilku-dziesięciu woltów.

Schemat mostku Wheatstone'a przedstawiony jest na rys. 218. Mostek jest początkowo zrównoważony dla naturalnego przewodnictwa wody przez danie gałęzi „a” o stałym oporze 1000 Ω , gałęzi „b” dowolnej wartości od 1000 do 5000 Ω zależnie od rodzaju elektrod i naturalnego przewodnictwa wody, oraz przez przystosowanie gałęzi „c”, tak by elektrodynamometr „e” wykazywał zero. Gdy rozrzedzony roztwór soli zaczyna dopływać do zanurzonych elektrod



Rys. 218.
Mostek Wheatstone'a.

„x” i zostaje zakłócona równowaga ustalona na mostku, wówczas opór jaki trzeba dać w ramieniu „a” musi być większy, by otrzymać odczyty zerowe na elektrodynametrze. Różnica oporów nowego R i dawnego 1000 Ω w ramieniu „a”, tj. $R - 1000 = \Delta R$, jest wprost proporcjonalna do wzrostu przewodnictwa spowodowanego obecnością roztworu soli, lub wprost proporcjonalna do zawartości soli w jednostce objętości wody.

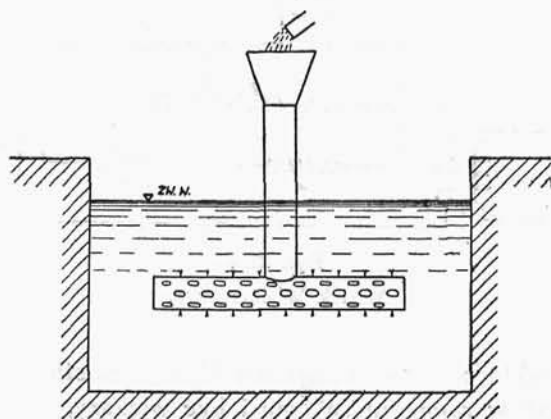
Przyrząd przed użyciem do pomiarów należy skalibrować dla ustalenia jego stałych. W tym celu umieszczamy parę elektrod w zbiorniku, zawierającym V litrów naturalnej wody wziętej z potoku, w którym mierzymy przepływ, i zrównoważywszy mostek przez opór 1000 Ω w ramieniu „a” oraz przez dobór wartości oporów w ramieniach „b” i „c” odpowiednio do temperatury i przewodnictwa wody, dolewamy stopniowo niewielkie znane objętości roztworu soli do zbiornika starannie mieszając. Po każdym dodaniu roztworu odczytujemy wartości ΔR odpowiadające zerowym wskazaniom dynamometru. Obliczamy każdorazowo wartość $K = \Delta R \frac{V}{v}$, gdzie v

jest całkowitą objętością dodanego roztworu soli. Przy stałej temperaturze K ma wartość zmieniającą się w bardzo wąskich granicach.

Przepływ badany określa się z równości $Q = q_s \frac{K}{\Delta R}$, gdzie q_s jest objętością roztworu soli, wprowadzonego do potoku w jednostce czasu, a ΔR odczytami na mostku Wheatstone'a.

Przyczyny powodujące błędy są następujące: 1) obecność bąbków powietrza w wodzie potoku, 2) niejednostajne rozdzielanie się roztworu w przepływającej wodzie, 3) niejednostajne rozdzielanie się roztworu w czasie.

Dzięki odpowiedniemu urządzeniu daje się uniknąć błędów wymienionych pod 1) i 2). Błąd 3) może być wyeliminowany również przez odpowiednią obserwację.



Rys. 219.

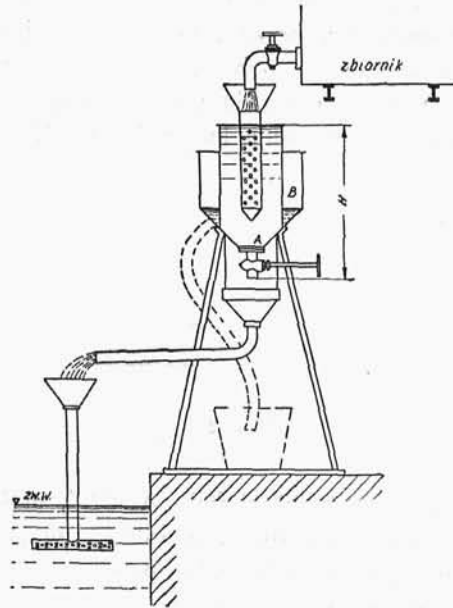
Rura perforowana do wprowadzania roztworu soli.

Doprowadzenie roztworu do potoku nie powinno odbywać się w postaci pojedynczej strugi. Jak wykazały badania Barbagelaty, w wypadku takim nawet przeprowadzenie wody z roztworem soli przez turbinę nie gwarantuje równomiernego przemieszania. Najlepiej wprowadzić roztwór możliwie jednostajnie w całym przekroju, używając rury perforowanej (rys. 219).

Urządzenie pokazane na rys. 220 gwarantuje jednostajny dopływ roztworu do płynącej wody w pewnym okresie czasu.

Przyjmując momentalne i doskonałe wymieszanie roztworu z płynącą wodą, byłoby możliwe otrzymanie słonej fali o czole pionowym, tak że w miejscu doprowadzenia przewodnictwo wzrosłoby nagle od początkowego stanu do najwyższej wartości, odpowiadającej obecności soli. Wartość ta utrzymywałaby się przez przeciąg

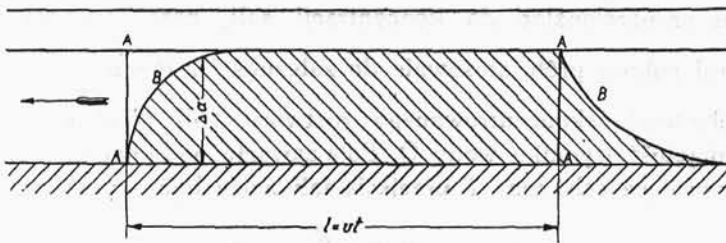
czasu t , po czym nastąpiłby gwałtowny jej spadek do pierwotnej wartości. Odczyty ΔR na mostku wykreślone w zależności od czasu dałyby w takim wypadku prostokąt jako realny obraz fali.



Rys. 220.

Urządzenie Barbegat'y do wprowadzania roztworu soli do wody.

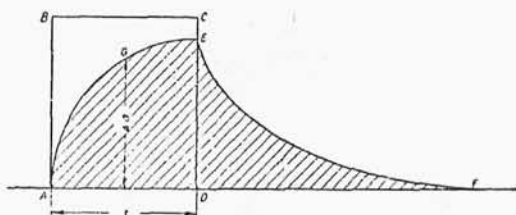
Ze względu na małą prędkość dyfuzyjną roztworu soli i niejednostajną prędkość wody w przekroju nawet w powyższym idealnym wypadku czoło fali nie będzie płaszczyzną pionową lecz mniej lub więcej krzywą. Gdy przekrój przewodu pomiędzy punktem wprowa-



Rys. 221.

dzenia roztworu soli i punktem brania prób wykazuje znaczną zmianę, fala soli, lub jej równoważna krzywa $\Delta R = f(t)$, będzie wykrzywiona. W doświadczeniach stwierdzono, że kształt fali zbliżony jest do krzywej potęgowej (rys. 221).

Wartości ΔR muszą być odczytane wówczas, gdy ustalą się warunki przejściowe, by nie otrzymać zbyt małej koncentracji, co dałoby w wyniku większy przepływ niż rzeczywisty. Tam gdzie nieregularności przekrojów przewodu są bardzo znaczne, lub gdy roztwór soli był wprowadzany przez czas zbyt krótki, może się zdarzyć, że przewodnictwo w miejscu poboru prób zaczyna spadać zanim osiągnięta została wartość odpowiadająca warunkom ustalonym (rys. 222). Jest jasne, że powierzchnia krzywej „AGEF” musi być równa



Rys. 222.

powierzchni idealnej prostokątnej fali „ABCD”, mającej za podstawę czas t wprowadzania roztworu. Prawidłową wartość koncentracji otrzyma się przez podzielenie pola powierzchni „AGEF” przez czas t . Innymi słowy wartość

$$\Delta R = \frac{1}{t} \int \Delta R dt$$

jest tą, która byłaby obserwowana przy dostatecznie długim czasie t .

Do obliczenia przepływu wody konieczna jest znajomość całego profilu fali soli i całkowita objętość wprowadzonego roztworu soli Q_s .

Wartości ΔR otrzymuje się ze wskazań mostku Wheatstone'a. Są one proporcjonalne do koncentracji soli, przechodzącej przez przekrój poboru prób, stosownie do zależności $\Delta R = K \frac{q_s}{Q}$, gdzie q_s jest objętością skoncentrowanego roztworu soli niesionego przez stałą objętość wydatku wody Q . Pole zawarte pod krzywą $\Delta R = f(t)$ i pokrywające cały czas T przejścia fali może być wyrażone przez

$$A = \int_0^T \Delta R dt = \frac{K}{Q} \int_0^T q_s dt$$

Całka $\int_0^T q_s dt$ jest całkowitą objętością Q_s skoncentrowanego roztwo-

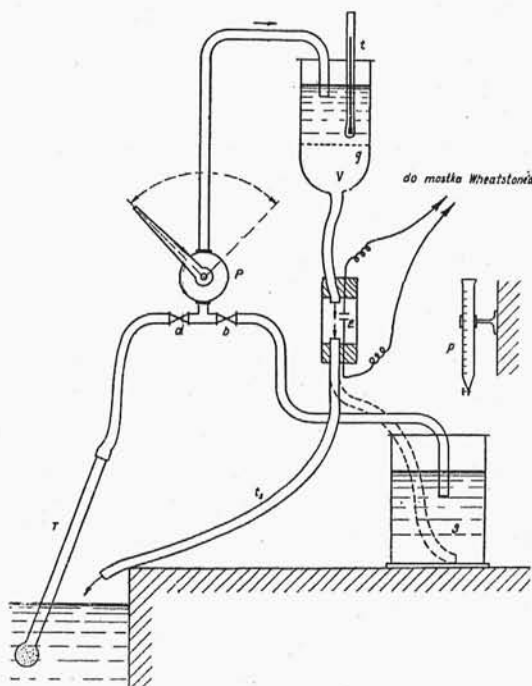
ru soli wprowadzonego do potoku, wobec czego $A = \frac{K}{Q} Q_s$, a stąd

przepływ wody

$$Q = K \frac{Q_s}{A} \text{ m}^3/\text{sek.}$$

gdzie K jest wartością stałą określoną przez wyżej opisane kalibrowanie.

Wprowadzenie roztworu do przepływającej wody odbywa się podobnie jak w oryginalnej metodzie chemicznej (rys. 220). Roztwór soli umieszczony w zbiorniku górnym doprowadza się do „A”, skąd pod stałym ciśnieniem H dochodzi do przewodu z końcówką perforowaną umieszczoną w płynącej (badanej) wodzie. Nadmiar przelewa się do naczynia zewnętrznego „B” skąd jest odprowadzany do zbiornika zapasowego.



Rys. 223.

Urządzenie do pomiaru przewodnictwa elektrycznego wody.

Urządzenie do pomiaru przewodnictwa wody pokazane jest szkicowo na rys. 223. Elektrod pływających się nie używa. Przewodnictwo jest mierzone w pewnym obwodzie zamkniętym, w którym płynie woda pobrana z potoku. Wodę czerpie się przy pomocy pompy „P” przez smok i przewód „T” przy otwartym

kranie „a” a zamkniętym „b”. Giętka rura „T” poruszana jest stale, tak by woda była pobierana z różnych miejsc przekroju (dla zapewnienia otrzymania średniej koncentracji w wypadku niedokładnego przemieszania). Woda jest doprowadzana do górnego otwartego zbiornika „V”, w którym bańki powietrza mogą łatwo wznieść się i wyjść z wody, a przedmioty stałe zatrzymywane są przez sito „g”. Następnie woda dopływa do cylindrycznego naczynia, w którym umieszczone są dwie elektrody „E”, a stąd do kanału przy pomocy rurki „t_s”. Ze względu na konieczność otrzymania dokładnego kształtu fali pompa musi być poruszana regularnie, aby w zbiorniku „V” utrzymywał się stały poziom wody.

Po wykreśleniu fali soli rurkę „t_s” wprowadza się do zbiornika „S” i gromadzi się tam potrzebną do kalibrowania ilość wody naturalnej (trzeba uwzględnić objętość wody mieszczącą się w pompie i rurach). Po zamknięciu kurka „a” i otworzeniu kurka „b” tą samą pompą ręczną wprawiamy w ruch cyrkulacyjny wodę pomiędzy elektrodami. Przy pomocy pipetki „p” wprowadza się stopniowo skoncentrowany roztwór soli. Wszystkie te czynności przeprowadza się szybko i bez trudności.

Przy pomocy termometru „t” umieszczonego w zbiorniku „V” obserwujemy temperaturę wody. W czasie wykreślenia fali soli woda bywa stale odnawiana, temperatura pozostaje niezmienna, lecz w czasie kalibrowania, gdy ta sama ilość wody cyrkuluje w czasie 5....6 minut, mogą zajść znaczniejsze zmiany temperatury wody.

Zwykłe urządzenie aparatu na prąd zmienny pokazane jest na rys. 218. Zawiera ono mały transformator „T”, który ma podwójny cel: uniknięcia bezpośredniego lub pośredniego uziemienia linii, z której pobiera się prąd, jak również uniknięcia prądów błądzących wpływających ujemnie na wartość pomiaru.

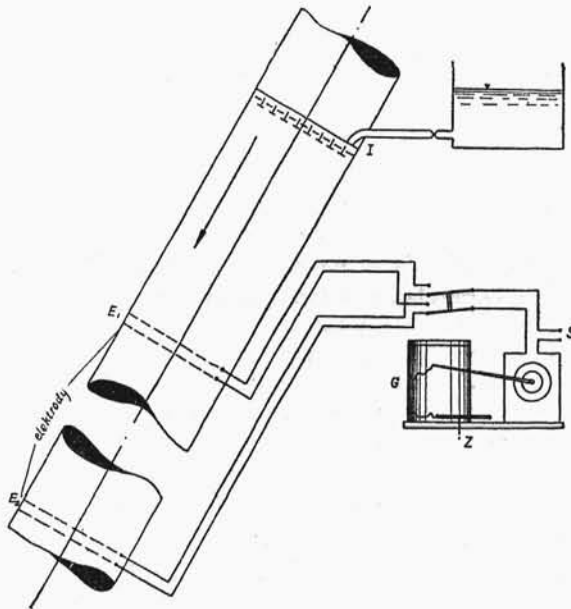
Rezultaty doświadczeń wykazują dużą dokładność tego rodzaju pomiarów. Pomiar może być wykonany w ciągu krótkiego czasu, tak że wystarczy, by przepływ był stały tylko w ciągu paru minut. Całkowity czas potrzebny do pomiaru łącznie z kalibrowaniem nie trwa dłużej niż 30 minut. Pomiary mogą być wykonane przy uruchomionych turbinach bez jakichkolwiek przerw w ruchu zakładu.

Przy tej metodzie ilość soli potrzebna do każdego pomiaru zależy bardzo od naturalnego przewodnictwa wody. W najbardziej niekorzystnych okolicznościach, tzn. w razie bardzo dużego przewodnictwa naturalnego przepływu dostateczną ilością jest 400 kg soli na 10 m³/sek.

3. Metoda chemiczno-elektryczna Allena.

(Salt velocity method, Salzgeschwindigkeitsmethode)¹⁰⁸⁾

Zasada tego pomiaru również jak i metody Barbagelaty polega na własności większego przewodnictwa elektrycznego wody zasolonej niż wody czystej. Jeśli w przewód z płynącą wodą w miejscu „I” (rys. 224) wstrzeli się roztwór soli i założy na przewodzie w kilku miejscach na pewnej długości po parze elektrod „E₁” i „E₂” włączonych w obwód ze źródłem prądu „S”, to przejście fali roztworu soli



Rys. 224.

Elektrody w przewodzie do pomiaru przewodnictwa elektrycznego przepływającej wody.

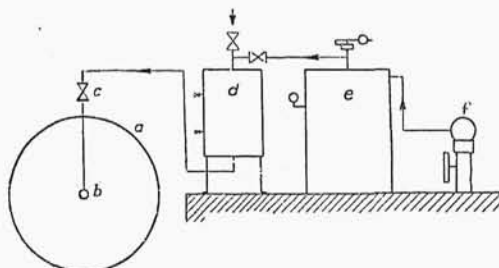
przez miejsca umieszczenia elektrod da się zauważyć wskutek zwiększenia przepływu prądu w obwodzie. W obwód włączamy elektromierz samopiszzący „G”, który notuje zmiany w przepływie prądu. Na tym samym wykresie zegar „Z” zaznacza czas. Metoda ta ma pewne podobieństwo do sposobu Andersona pomiaru prędkości przy pomocy przepony. Za przeponę uważać można wędrujący roztwór soli.

¹⁰⁸⁾ C. M. Allen & E. A. Taylor. The salt velocity method of water measurement. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 1923.

Jeśli objętość rury na odcinku pomiędzy sąsiednimi parami elektrod wynosi $V \text{ m}^3$, a czas przejścia fali soli między nimi — t sekund, to przepływ wody otrzymamy dzieląc objętość V przez czas t :

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

Urządzenie do wstrzelania soli przedstawiono schematycznie na rys. 225.



Rys. 225.

Urządzenie do wstrzelania roztworu soli.

- a — rurociąg, w którym mierzymy przepływ
- b — dysza wytryskowa
- c — wentyl zamykający
- d — zbiornik roztworu soli
- e — zbiornik sprężonego powietrza
- f — sprężarka.

Do pomiarów używa się nasyconego roztworu soli kuchennej, który przygotowuje się poprzednio w odpowiednim naczyniu i doprowadza pompą do zbiornika „d”. Do wstrzelania roztworu wystarcza kilkumetrowa nadwyżka ciśnienia w przewodzie doprowadzającym. W urządzeniu przedstawionym na omawianym rysunku w zbiorniku „d” utrzymywano ciśnienie stałe 7,8 at, ale straty w przewodach i wentylach były tak duże, że czynne nadciśnienie u wylotu wentyla wstrzeliwującego wynosiło tylko kilka metrów.

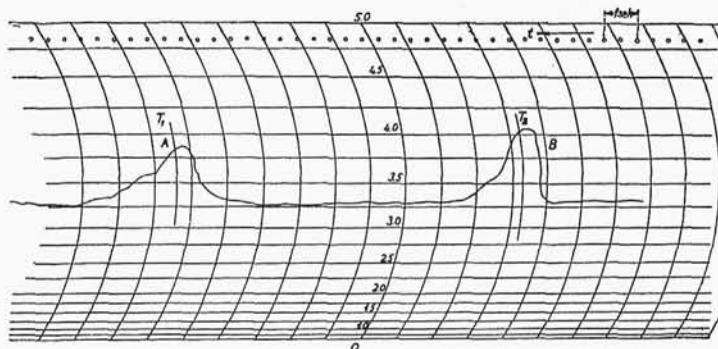
Wyniki pomiarów zależą bardzo od formy elektrod i liczby wstrzeliwujących dysz¹⁰⁹⁾. W Ameryce używa się dużej ilości dysz i elektrod obejmujących cały przekrój. Elektrody włącza się do obwodu prądu zmiennego o napięciu 110 Volt.

Ponieważ prędkość wody w przekroju nie jest jednostajna, a zmniejsza się od środka ku ścianom, fala soli w swoim przebiegu będzie się z biegiem czasu coraz bardziej rozciągać. Przejścia przez

¹⁰⁹⁾ P. de Haller. Theoretische Betrachtungen über Wassermengen-Messungen nach der Allenschen Methode. Escher Wyss Mitteilungen, 1930. Nr 1.

punkty obserwacyjne zaznaczają się na wykresach elektromierzy nie w formie dwóch ostrych wierzchołków lecz wybrzuszeń „A” i „B” (rys. 226). Do ścisłego określenia czasu przebiegu fali soli należy brać środki ciężkości T_1 i T_2 otrzymanych wychyleń.

Wszystkie metody chemiczne mogą być też stosowane do pomiarów przepływu w przewodach zamkniętych.



Rys. 226.

Wykres fali roztworu soli.

6. Metoda chronofotograficzna

Metoda chronofotograficzna używana jest jedynie do określania prędkości przy badaniach w laboratoriach. Polega ona na zmieszaniu z przepływającą wodą lekkich drobnych błyszczących cząstek materiału unoszonego w zawieszeniu przez wodę, a następnie na fotografowaniu przepływającej wody przy przerywanym oświetlaniu. Aparat fotograficzny rejestruje na kliszy przerywane linie przepływu wody. Znając czas trwania naświetlenia i mając jednocześnie na kliszy sfotografowaną podziałkę, możemy określić z dowolną dokładnością szybkość poszczególnych strug wody.

Lampa oświetlająca posiada do naświetlania automatyczne urządzenie w postaci klosza cylindrycznego, obejmującego lampę i obracającego się z odpowiednio nastawioną prędkością. Przy przejściu szpary podłużnej wyciętej w płaszczu cylindra następuje oświetlenie odpowiedniej przestrzeni wodnej.

7. Metoda kolorometryczna¹¹⁰⁾

Zasada pomiaru jest ta sama co w sposobie chemicznym: stwierdzenie wielkości rozcieńczenia roztworu — różnica polega na

¹¹⁰⁾ B. Esterer, Das Farbverdünnungsverfahren für Wassermessungen. Wasserkraft und Wasserwirtschaft, 1937, Nry 10/11 i 12.