

ZASADY
RUCHU WODY
W RZEKACH I KANAŁACH

ORAZ

WZORY TEORETYCZNE NA PRĘDKOŚĆ I OBJĘTOŚĆ PRZEPLYWU.

PRZEZ

Władysława Kostkiewicza,

c. k. starszego inżyniera.

Odbitka z „Przeglądu Technicznego“, r. 1906.

WARSZAWA.

Drukarnia Rubieżewskiego i Wrotnowskiego w Warszawie.

1906.

INŻ. I. STELLA-SAWICKI

S. 59

Day 1

p. 302

ZASADY
RUCHU WODY
W RZEKACH I KANAŁACH

ORAZ

WZORY TEORETYCZNE NA PRĘDKOŚĆ I OBJĘTOŚĆ PRZEPLYWU.

PRZEZ

Władysława Kostkiewicza,

c. k. starszego inżyniera.

Odbitka z „Przeglądu Technicznego“; r. 1906.

WARSZAWA.

Drukarnia Rubieszewskiego i Wrotnowskiego w Warszawie.

—
1906.

Guiz. Helka - Sawicki

S. 69

S. 96

S. 06

532.5



16057

195/58

Pogląd ogólny.

Bieg wody w rzekach i kanałach otwartych należy do rzędnych zagadnień, które dotychczas nie zostały naukowo zbadane. Wprawdzie sprawa ta jest już od dawnych czasów przedmiotem licznych badań fizyków i hydrotechników, jak tego dowodzą obszerne rozprawy naukowe, pomimo to nie zdołano jednak wykryć praw, według których odbywa się ruch wody w korytach otwartych, sztucznych lub naturalnych. Już genialny GALILEUSZ, poznawszy prawa wolnego spadku, pragnął wyjaśnić tajemniczy bieg wody, o którym wyraził się, że łatwiej mu jest śledzić bieg ciał niebieskich we wszechświecie, aniżeli badać ruch wody płynącej. Również wieloletnie badania, wykonane przez DARCY'EGO i BAZIN'A kosztem paryskiej Akademii umiejętności, jakkolwiek przyczyniły się do zebrania cennych spostrzeżeń, nie zdołały rozwiązać powyższego zagadnienia. Następnie, gdy się przekonano, że sposobem teoretycznym zbadanie tego zjawiska jest nader trudne, zwrócono się na drogę doświadczalną, w mniemaniu, że tym sposobem osiągnie się pomyślny skutek. Jednak i ta droga zawiodła, albowiem wyniki bezpośrednich pomiarów prędkości okazały się nader różnorodne, i nie dające się ująć w jednolite wzory matematyczne. Badania doprowadziły jedynie do zestawienia prawideł ogólnych, odnoszących się do rozkładu prędkości w przekroju:

- 1) Prędkości na dnie i przy ścianach koryta są najmniejsze.
- 2) Prędkości wzrastają w kierunku pionowym w miarę oddalenia od dna.

3) Prędkości na powierzchni są najmniejsze przy brzegach i wzrastają ku środkowi przekroju stosownie do głębokości, przyczem największa prędkość jest w tem miejscu, gdzie jest największa głębokość, t. j. w nurcie.

4) Bezwzględna największa prędkość w przekroju poprzecznym jest zazwyczaj na powierzchni w miejscu największej głębokości, jakkolwiek niektóre pomiary wykazały, że największa prędkość znajduje się nie na powierzchni, lecz w pewnej głębokości.

Po wykryciu powyższych zasad ogólnych starano się zestawić prawo, według którego następuje przyrost prędkości w kierunku pionowym, ale dążenia te nie doprowadziły także do jednakowego zapatrywania; jedni bowiem hydrotechnicy utrzymują, że krzywa prędkości jest parabolą o osi pionowej, inni zaś, jak HUMPHREYS i ABBOT sądzą, opierając się na pomiarach dokonanych przez siebie na Missisipi, że jest ona parabolą o osi poziomej, położonej pod powierzchnią zwierciadła wody w wysokości największej prędkości; wreszcie, według zdania inżynierów przeważnie francuskich, krzywa ta jest parabolą wyższego rzędu. Z tego też powodu nie posiadamy dotychczas wzorów teoretycznych do obliczenia objętości i średniej prędkości przepływu; wszystkie bowiem wzory, którymi się posługujemy, oparte są na wynikach pomiarowych. Wzory te jednak pod względem dokładności pozostawiają wiele do życzenia i częstokroć podają wyniki zupełnie błędne, jak to wykazują badania przeprowadzone przez PLEUKNER'A, WAGNER'A, SCHMID'A i innych hydrotechników, nadto o wartości tych wzorów pod względem dokładności najlepiej świadczy okoliczność, że ilość ich jest wcale znaczna.

Wobec więc takiego stanu rzeczy, w wypadkach, w których wymagana jest przy obliczeniach hydrologicznych większa dokładność, pozostaje do wyboru tylko droga jedna, t. j. przeprowadzenie bezpośrednich pomiarów prędkości za pomocą przyrządów, zwanych hydrometrami; sposób ten jednak jest nader mozolny i wymaga znaczniejszych kosztów, z tego też względu w praktyce nie jest często stosowany. Wprawdzie podjęte były usiłowania, aby takie mierzenie prędkości ułatwić przez wydoskonalenie hydrometrów, mimo to jednak nie zdołano doprowadzić do uproszczeń, któreby użycie hydrometrów czyniły łatwem w praktycznem zastosowaniu. Posiadamy również znaczną ilość typów hydrometrów, których wartość pod względem dokładności i użycia szczegó-

łowo wykazał profesor politechniki we Lwowie RYCHTER w dziele „Roboty wodne“. Ze wszystkich hydrometrów najczęściej jest używany młynek, który okazał się w użyciu jako najpraktyczniejszy, jakkolwiek pod względem dokładności nie jest dostatecznie czuły, aby otrzymane z pomiaru wyniki mogły stanowić podstawę do badań naukowych. Brak więc należycie udoskonalonego hydrometru jest jednym z głównych powodów, który utrudnia rozwiązanie zagadki biegu wody z jednej strony, zaś zestawienia odpowiednich wzorów do obliczeń hydrologicznych z drugiej strony. Okoliczność ta tłumaczy zarazem różność poglądów, jakie znajdujemy w tym przedmiocie w piśmiennictwie technicznym.

Według badań dotychczasowych przyjęto powszechnie, że bieg wody w rzekach i kanałach otwartych wywołany jest działaniem siły ciężkości, zaś ruch sam odbywa się według praw ruchu o wolnym spadzie. Wyprowadzone na podstawie tego twierdzenia równanie zasadnicze wykazuje, że wielkość średniej prędkości przepływu zależy od dwóch czynników: od nachylenia zwierciadła wody, czyli od spadku i od ilorazu z powierzchni przekroju i obwodu zwilżonego, którą to ilość nazwano według DUBUAT'A promieniem średnim przekroju. Z tego też powodu znajdujemy we wszystkich obecnych wzorach do oznaczenia średniej prędkości przepływu te dwie ilości. Nie trudno jednak będzie wykazać, że to zapatrywanie nie odpowiada rzeczywistości. Jeżeli bowiem weźmiemy pod uwagę dwa przekroje prostokątne o wymiarach: jeden 8 m długości, 2 m wysokości, drugi 4 m wysokości i długości, to dla obu przekrojów promień średni będzie jednakowy:

$$r = \frac{F}{p} = \frac{16}{12} = 1,33,$$

zatem przy spadku równym prędkość średnia przepływu winna być w obu przekrojach również ta sama; natomiast pomiarzy wykazują, że w przekroju głębszym jest prędkość średnia większa aniżeli w przekroju płytszym. Przykład ten więc stwierdza, że ruch wody musi się odbywać według innej zasady.

Również dalsze zapatrywanie, odnoszące się do przyczyny, dlaczego prędkości przy ścianie i na dnie koryta są najmniejsze, nie może być uznane za prawdziwe. Zjawisko to jest w ten sposób tłumaczone, że zmniejszenie prędkości wywołane jest wskutek tarcia o ściany koryta, które, działając

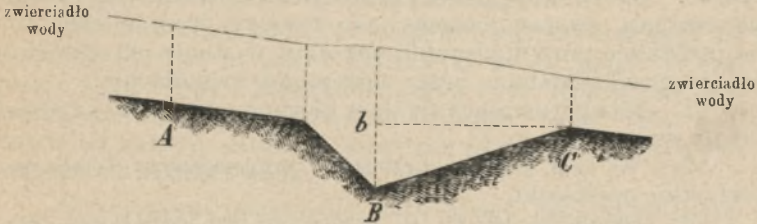
bezpośrednio na strugi płynące tuż przy ścianie, powodują największe zmniejszenie prędkości w tych strugach; następnie przenosi się tarcie wskutek lepkości do warstewek wody wyżej położonych w mniejszym już stopniu, wywołuje zatem powolniejsze zmniejszenie prędkości. Jakkolwiek tłumaczenie takie wydaje się pozornie zupełnie uzasadnionem, to jednak przy bliższem rozpatrywaniu okazuje się wątpliwem.

Przyjmijmy, że bieg wody odbywa się w korycie idealnem, w którym niema żadnego tarcia o ściany; zatem według powyższego zapatrywania prędkość przepływu byłaby w całym przekroju jednakowa, czyli, że ruch wody odbywałby się według zasad ruchu ciał stałych, t. j. cząsteczki w czasie ruchu nie zmieniałyby położenia względem siebie. Wiadomo, że ciała płynne tem się zasadniczo różnią od ciał stałych, że spójność między pojedynczemi cząstkami jest bardzo mała, wskutek czego mogą być cząsteczki z osobna w ruch wprawione, gdy tymczasem przy ciałach stałych ruch cząsteczek pojedynczych może się odbywać tylko wspólnie z wszystkiemi innemi; własność ta więc nie może być bez wpływu na ruch wody płynącej i, jak to wykazane zostanie w ustępie, traktującym o ruchu wody, jest główną przyczyną, że ruch wody odbywa się w odmienny sposób od ruchu ciał stałych, zaś zmniejszenie prędkości przy dnie i ścianie koryta jest wynikiem samego ruchu a nie tarcia.

Po zestawieniu w ogólnym zarysie przebiegu podjętych usiłowań, jako też sprzeczności obecnych poglądów, przystępuję do przedstawienia wyników własnych badań. Badania prowadzone są głównie w tym kierunku, aby na podstawie rozpatrywania zjawisk, występujących w wodach płynących, bliżej rozpoznać przyczynę ruchu, t. j. siłę poruszającą i sposób jej działania, jak również przeszkody, które cząsteczki wody muszą pokonywać podczas ruchu, poczem przy pomocy tych dwóch czynników wyjaśnić sam ruch wody. Obrona droga badań umożliwiła nie tylko spełnienie postawionego zadania, ale nadto ujęcie zasad ruchu we wzory matematyczne, które doprowadziły następnie do zestawienia wzorów do obliczeń hydrologicznych, mających znaczenie nie tylko teoretyczne, ale także praktyczne, albowiem ułatwiają znacznie te obliczenia, bez zmniejszenia stopnia dokładności.

1) Wyznaczenie siły poruszającej i oporów.

Do wysledzenia siły wywołującej ruch wody płynącej w korycie sztucznem lub naturalnem dojdziemy najłatwiej, gdy rozpatrzemy okoliczności, które są niezbędnie potrzebne aby bieg wody mógł nastąpić w jakimkolwiek ścieku; następnie zjawiska, które występują w wodach płynących. Wiadomo, że woda będzie wtedy płynęła, gdy zwierciadło jej może przyjąć położenie nachylone do poziomu, staje zaś z chwilą, gdy zwierciadło wody przechodzi w położenie poziome. Nachylenie więc zwierciadła wody względem poziomu jest koniecznym warunkiem, aby wywołać ruch wody; na podstawie zatem zjawiska tego możemy twierdzić, że siła poruszająca wywołana jest przez nachylenie zwierciadła wody.



Rys. 1.

Bliższe oznaczenie tej siły, co do wielkości i sposobu działania, podają nam również następujące dwa zjawiska, które występują w wodach płynących.

Spostrzeżenia i pomiary wykazują, że w rzekach o silniejszym spadku bieg wody jest prędszy aniżeli w rzekach nizinnych, w których spadek zwierciadła wody jest mały; zjawisko to więc dowodzi, że wielkość siły poruszającej zależy jest od stopnia nachylenia zwierciadła wody. Drugie zaś zjawisko, wykryte i powszechnie sprawdzone przez pomiary, że woda płynie zawsze w korycie rzeki pełnym przekrojem, bez względu na to, czy dno jest nachylone lub wzniesione względem poziomu, wskazuje, że siła poruszająca działa w przekroju poprzecznym na wszystkie cząsteczki. Jeżeli weźmiemy pod uwagę bieg wody w korycie, którego przekrój podłużny przedstawia rys. 1, to pomiary wykazały, że woda płynie całym przekrojem nie tylko w części koryta *AB*, w której dno jest nachylone do poziomu, ale także w części *BC*, w której dno

ma pochylenie przeciwne. Nadto zjawisko powyższe udowadnia, że siła poruszająca musi działać w kierunku biegu, albowiem ruch cząsteczek znajdujących się w części *BbC* odbywa się pod górę.

Gdy oprócz tych zjawisk uwzględnimy jeszcze ogólną własność ciał płynnych, że skoro powierzchnia przyjmie położenie nachylone do poziomu, powstaje ciśnienie hydrauliczne, które wywołuje ruch cząsteczek tej cieczy dopóty, dopóki powierzchnia nie ułoży się ponownie poziomo, to musimy przyjść do przekonania, że siłą wywołującą ruch wody w korytach otwartych jest ciśnienie hydrauliczne powstałe wskutek nachylenia zwierciadła wody. Porównując bowiem przyczyny powstawania obu tych sił, jako też okoliczności wpływające na ich wielkość, widzimy, że są one zupełnie identyczne. Skoro więc przytoczone zjawiska wskazują, że siłę poruszającą uważać możemy jako ciśnienie hydrauliczne, to na podstawie praw hydrauliki jesteśmy w stanie określić bliżej jej sposób działania przez następujące twierdzenia:

1) Siła poruszająca działa w kierunku nachylenia zwierciadła wody.

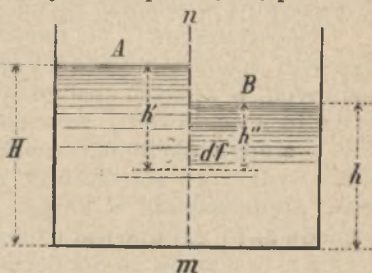
2) W tym samym przekroju poprzecznym działa na wszystkie cząsteczki.

3) Działanie jej na te cząsteczki jest jednakowe, bez względu czy te cząsteczki leżą od dna bliżej lub dalej.

Twierdzenia ad 1) 2) nie wymagają żadnego wyjaśnienia, albowiem opierają się wprost na prawach hydrauliki; natomiast twierdzenie ad 3) może wywołać pewną wątpliwość, z tego więc powodu przytaczam następujący dowód.

Niech rys. 2 przedstawia naczynie przedzielone pozorną przegrodą *mn*, przyczem woda wznosi się w części *A* do wysokości *H*, zaś w części *B* do wysokości *h*. Wskutek różnej wysokości stanu wody w przegrodzonych częściach naczynia wywołane zostaje ciśnienie hydrauliczne. Wielkość tego ciśnienia na cząstkę powierzchni *df* przegrody *mn* wynosi

$$W = df (h'' - h') \cdot \gamma = df (H - h) \gamma,$$



Rys. 2.

przyczem γ oznacza ciężar jednostki objętości wody. Wzór ten wskazuje, że ciśnienie zawisłe jest od wielkości cząstki powierzchni i różnicy wysokości zwierciadła wody w obu częściach naczynia, natomiast położenie cząstki powierzchni nie ma żadnego wpływu. Cząstki powierzchni więc jednakowo wielkie, a położone w dowolnych wysokościach przegrody, zostają pod działaniem jednakowego ciśnienia hydraulicznego i, jeżeli przegrodę usuniemy, to cząsteczki w przekroju zostaną pod wpływem tego ciśnienia wprowadzone w ruch, który trwać będzie tak długo, dopóki powierzchnia zwierciadła wody w obu częściach naczynia nie wyrówna się do jednego poziomu.

Ponieważ ciśnienie hydrauliczne w wodzie płynącej, wywołane przez nachylenie zwierciadła, podlega tym samym prawdom co w wodzie stojącej, zatem wzór powyższy udowadnia prawdziwość twierdzenia podanego ad 3).

Również dla oznaczenia wielkości siły poruszającej powołać się musimy na prawo hydrauliki, które orzeka, że cząsteczki jakiegokolwiek cieczy zostaną w ruch wprowadzone, gdy działająca siła jest większa od lepkości cieczy. Na podstawie tej zasady możemy twierdzić, że siła poruszająca jest większa od lepkości wody.

Po poznaniu jakości siły poruszającej, jako też jej sposobu działania, pozostają do zbadania opory, które występują podczas ruchu w wodach płynących. Przy badaniu tych oporów okazuje się, że należy odróżnić w wodzie płynącej głównie dwie części, na które działają odmienne siły, wskutek czego i cząsteczki tych części również się odmiennie zachowują. Część pierwszą (rys. 3) stanowi warstwę w k a wody, która bezpośrednio dotyka do ścian koryta (oznaczona w przekroju poprzecznym lit. A). Część drugą stanowi reszta masy wody, oznaczona lit. B. Na cząsteczki części pierwszej, t. j. warstewki lit. A działają siły następujące:



Rys. 3.

- 1) siła poruszająca;
- 2) ciężar wody unoszącej się nad tą warstewką;
- 3) lepkość (kohezja);
- 4) przyleganie (adhezja).

Z powyższych sił usiłują wprawić w ruch cząsteczki tylko siły ad 1) i 4); natomiast siła ad 2) przyciska je do ścian koryta, zatem działanie tej siły utrudnia ruch i z tego powodu występuje jako opór. Również jako opór działa przyczepność, usiłująca zespolić cząsteczki wody z cząsteczkami ścian koryta. Jeżeli uwzględnimy, że siła poruszająca wobec zazwyczaj niewielkiego nachylenia zwierciadła wody nie jest wielką, jak również lepkość, to możemy przyjąć, że opory ad 2) i 4) przewyższają co do wielkości siłę poruszającą, wskutek czego cząsteczki warstewki *A* (rys. 3) nie poruszają się, ale są w spoczynku. Ta warstewka *A*, stanowi niejako warstwę izolacyjną, oddzielającą resztę masy wody części *B* od ścian koryta. Ze powyższe przypuszczenie jest prawdopodobne, wnosić możemy z następującego zjawiska.

Jeżeli weźmiemy zwyczajny kamień z koryta i następnie po osuszeniu włożymy go do wody płynącej, to po wyjęciu będzie mokry; jeżeli następnie kamień ten powlecemy warstewką tłuszczu i powtórzymy tę samą manipulację, to zobaczymy, że kamień nie będzie mokry. W pierwszym bowiem wypadku zwilżenie kamienia nastąpiło z tego powodu, że cząsteczki wody wskutek adhezji przylgnęły do cząsteczek kamienia i że ta siła przyczepności jest większą od ciężaru własnego cząsteczek oraz lepkości wody pozostałej przy ścianie kamienia po wyjęciu go z wody, natomiast w drugim wypadku stosunek tych sił jest przeciwny i dlatego kamień po wyjęciu zostaje prawie suchy. Gdy zaś łatwo jest drogą obliczenia przekonać się, że siła poruszająca w wodach płynących jest mniejsza od ciężaru własnego wody, zatem zjawisko to jest dostatecznym dowodem, że wypowiedziane zapastrywanie jest uzasadnione.

Przypatrzmy się teraz siłom, jakie działają w drugiej części, oznaczonej literą *B* (rys. 3). W tej części występują następujące siły:

- 1) siła poruszająca,
- 2) lepkość (kohezja) wody,
- 3) działanie powietrza.

Siła przyczepności odpada, albowiem cząsteczki wody tej części nie stykają się bezpośrednio z cząsteczkami koryta, gdyż oddzielone są warstewką *A*; również oddziaływanie ciężaru cząsteczek górnych na cząsteczki dolne jest zrównoważone ciśnieniem hydraulicznym, działającym w przeciwnym kierunku.

Z wykazanych sił ostatnie dwie siły już z natury swej działają utrudniająco na ruch cząsteczek i z tego powodu występują jako opory. Ponieważ działanie powietrza odnosi się tylko do cząsteczek znajdujących się na powierzchni, a następnie tarcie to o cząsteczki powietrza wobec nie zbyt wielkiej prędkości jest nader małe, zwłaszcza w czasie ciszy atmosferycznej, jak to wykazują pomiary hydrometryczne, zatem oddziaływanie tej siły na ruch całej masy wody jest bardzo małe, z tego powodu możemy go zupełnie nieuwzględniać w dalszych badaniach.

Z przedstawienia więc tego wyniku, że jedynym oporem, który cząsteczki wody mają do pokonania podczas ruchu, jest tylko lepkość wody.

Według dotychczasowych zapatrywań, głównym oporem w wodach płynących jest tarcie cząsteczek o dno i ściany koryta i na podstawie tego oporu tłumaczone jest zjawisko, że prędkości przy dnie i ścianach koryta są najmniejsze. Wprawdzie zjawisko to, tłumaczone w powyższy sposób, stoi w sprzeczności do przedstawionego zapatrywania, sprzeczność ta jednak będzie usunięta, gdy z następującego badania ruchu okaże się, że przyczyną najmniejszych prędkości na dnie i przy ścianach koryta nie jest tarcie, lecz sam ruch.

W naturalnych korytach rzecznych występują jeszcze inne przeszkody, utrudniające bieg wody z powodu zmienności przekroju co do wielkości i kształtu, jako też kierunku, opory te jednak wywołane są miejscowymi stosunkami koryta i odnoszą się tylko do ruchu wody w tych częściach koryta; z powodu tego nie mogą być uważane jako stale występujące. Ponieważ opory te co do wielkości zawisłe są od ustroju koryta i występują w częściach koryta nieregularnych, a przedmiotem badań dalszych jest bieg wody w łożysku regularnym, zajmować się nimi nie będziemy.

2) Pogląd ogólny na ruch wody i zestawienie równania zasadniczego dla ruchu jednostajnego.

Poznawszy siłę poruszającą i opory, które ma ta siła do pokonania, możemy przystąpić do rozpatrzenia samego ruchu, celem zestawienia zasad, według których się odbywa. Za punkt wyjścia do wyjaśnienia tego ruchu posłużą nam poda-

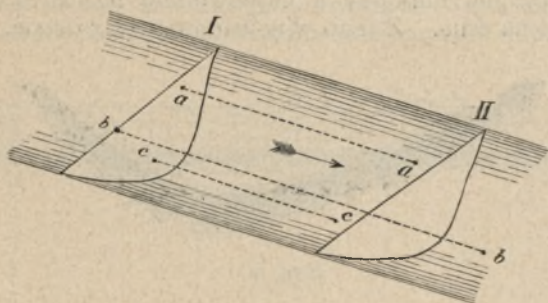
ne poprzednio własności tej siły poruszającej co do sposobu działania i wielkości.

Wiemy, że siła poruszająca działa w przekroju poprzecznym na wszystkie cząsteczki; z tej więc własności wypływa, że każda cząsteczka dla siebie zostaje pod działaniem siły poruszającej i jest przez tę siłę w ruch wprawiana. Już ta okoliczność wykazuje, że ruch wody płynącej odbywa się w odmiennych warunkach niż ruch ciał stałych. Przy ciałach stałych wystarczy do wywołania ruchu, gdy siła działać będzie tylko i jeden element ciała, przyczem wielkość jej musi być większa od oporu, natomiast ruch wody płynącej spowodowany jest działaniem siły poruszającej na każdą cząsteczkę z osobna. Następnie druga własność siły poruszającej, że jest większą od lepkości wody, umożliwi bliższe zbadanie tego ruchu. Lepkość jest, jak wiadomo, siłą wiążącą pojedyncze cząsteczki wody z sobą w jedną całość i jest zarazem jedynym oporem, który cząsteczki mają do pokonania podczas ruchu. Gdy zaś ruch odbywa się pod działaniem siły większej od wymienionej, zatem na podstawie praw mechaniki każda cząsteczka zostaje z osobna w ruch wprawiona, czyli że każda wykonywa ruch dla siebie, odrębnie od ruchu cząsteczek sąsiednich. Ruch więc wody odbywa się w sposób zupełnie odmienny od ruchu ciał stałych. Przy ciałach stałych wykonywają pojedyncze cząstki ruch wspólny, przyczem wzajemne ich położenie względem siebie nie ulega żadnej zmianie, jak również spójność między nimi pozostaje niezmienną, natomiast przy ruchu wody cząsteczki, wykonywając ruch z osobna, zmieniają swoje położenie wzajemne, przyczem spójność między nimi zostaje zniesiona. Ta odmienna zasada ruchu wody jest główną przyczyną, dlaczego liczne usiłowania, oparte na prawach ruchu ciał stałych, celem zestawienia wzorów matematycznych do obliczenia średniej prędkości przepływu, nie uwieńczone zostały pomyślnym skutkiem. Jeżeli bowiem w wodzie płynącej uzmysłowimy sobie pewien przekrój poprzeczny wraz z wszystkimi w nim znajdującymi się cząsteczkami, jeżeli następnie przekrój będzie się poruszał wraz z wodą, to po przebyciu drogi I, II (rys. 4) zobaczymy, że w przekroju tym nie będą się znajdowały te same cząsteczki, ale zupełnie inne, natomiast pierwotne cząsteczki będą zewnątrz tego przekroju, jak to przedstawia rys. 4.

Wobec więc tej okoliczności, że cząsteczki odbywają

ruch oddzielny, nasuwa się pytanie, jaki związek zachodzi między ruchami cząstek sąsiednich.

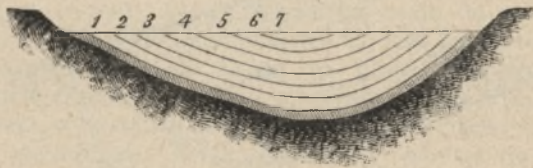
Przed przystąpieniem do rozwiązania tego pytania należy rozpatrzeć bieg wody w korytach naturalnych. Już poprzednio wspomniano, że naturalne koryta rzeczne mają zwyczajnie przekrój zmienny i tylko miejscami znajdują się długości o przekroju jednakowym; oto spostrzeżenia i pomiary wykazały, że zwierciadło wody w miejscach o przekroju zmiennym jest nachylone nie tylko w kierunku biegu, ale także w poprzecznym, przyczem linia zwierciadła wody w przecięciu poprzecznym jest często linią krzywą, wskutek czego



Rys. 4.

siła poruszająca działa na cząsteczki nie tylko w kierunku podłużnym, lecz także w poprzecznym. Ruch więc cząsteczek w tych miejscach koryta odbywa się w sposób inny niż w korycie o przekroju jednakowym, w którym zwierciadło wody jest nachylone tylko w kierunku podłużnym. Stosownie więc do tego, czy koryto ma przekrój jednakowy lub zmienny, odróżniamy dwa rodzaje ruchu wody: jednostajny i zmienny. Pod rozważę weźmiemy ruch jednostajny i będziemy się starali wynaleźć dla niego związek, jaki zachodzi między ruchami cząsteczek. W tym celu podzielmy przekrój poprzeczny na warstewki w sposób uwidoczniiony na rys. 5, przyczem przyjmijmy, że w każdej warstewce ułożone są cząsteczki tylko w jednym rzędzie. Według wykazanej zasady cząsteczki warstewki 1 będą się poruszały dla siebie po warstewce izolacyjnej; cząsteczki warstewki 2, pod wpływem działającej nań siły poruszającej, muszą wykonać ruch dla

siebie bez względu na to, że cząsteczki warstewki dolnej są w ruchu; podobnie cząsteczki warstewki 3 będą się posuwały oddzielnie od ruchu warstewki 2 i t. d. Z przedstawienia tego wynika, że cząsteczki warstewki górnej będą się poruszały najprędzej, cząsteczki warstewki poniżej leżącej już odbywać będą ruch powolniejszy względem warstewki górnej, zaś prędszy względem cząsteczek warstewki dolnej i t. d.; najpowolniej poruszać się będą cząsteczki warstewki, znajdujące się przy ścianach i dna koryta. Jeżeli pod uwagę weźmiemy cząsteczki leżące w tej samej linii pionowej, to zobaczymy, że ruch cząsteczek znajdujących się na powierzchni będzie najprędszy, następne cząsteczki, leżące niżej, będą miały ruch już mniejszy a najpowolniej poruszać się będą cząsteczki na dnie. Z tego więc badania okazuje się, że zja-



Rys. 5.

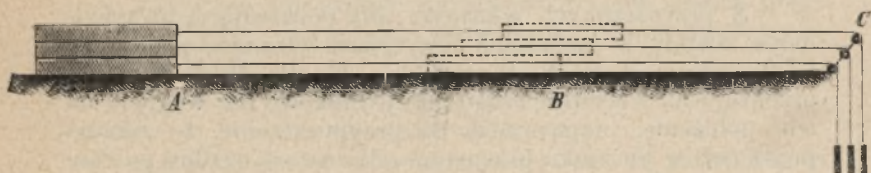
wisko prędkości zmiennej w kierunku pionowym jest wynikiem samego ruchu a nie jest wywołane tarcie cząsteczek o dno koryta, jak to powszechnie twierdzono.

Co się tyczy ruchu cząsteczek położonych w tej samej warstewce, przedstawia się on tak, że cząsteczki, o których mowa, będą się poruszały z tą samą prędkością, czyli, że ruch ich odbywa się według zasad ruchu dla ciał stałych, albowiem ich położenie wzajemne względem siebie podczas ruchu nie zmienia się. Że powyższe zapatrywanie zgodne jest z rzeczywistym stanem, udowadniają wyniki pomiarów hydrometrycznych, wykonanych w przekrojach, w których bieg wody był jednostajny. Krzywe równych prędkości w takich przekrojach mają kształt odpowiadający przekrojowi i biegną równoległe do linii obwodowej tegoż.

Celem jasnego przedstawienia zasady ruchu wody oraz zjawiska prędkości zmiennej w kierunku pionowym, przytoczam przykład następujący. Weźmy na gładkiej płaszczyźnie poziomej kilka lekkich płytek również zupełnie gładkich, je-

dną na drugiej; następnie niech na każdą płytkę działa siła ciągną, przyczem siła ta niech będzie większą od tarcia, aby pod działaniem jej płytki wprowadzone zostały w ruch. Siły takie możemy wywołać przez zawieszenie ciężarków na nitce w sposób uwidoczniiony na rys. 6, przyczem dla zmniejszenia tarcia nitki przechodzą przez krążki *C*.

Jeżeli płytki zostaną wprowadzone w ruch wskutek działania tych ciężarków, to zobaczymy, że nie będą się poruszały z jednakową prędkością, ale płytka górna będzie się poruszała najprędzej, druga pod nią się znajdujaca poruszać się będzie powolniej, zaś dolna najpowolniej. Po przebyciu drogi *AB* położenie tych płytek względem siebie zmieni się w sposób wskazany na rys. 6 liniami punktowanymi. Jeżeli płytki będą się poruszały dalej, to płytka górna wyprzedzi dolne i zsunie



Rys. 6.

się, następnie stanie się to samo z płytką drugą. Wyobraźmy sobie, że te płytki przedstawiają cząsteczki wody, leżące w warstewkach po sobie następujących, zaś ciężarki siłę poruszającą, to ruch tych płytek będzie uzmysławiał ruch cząsteczek wody w kierunku pionowym.

Już na podstawie przytoczonego powyżej badania możemy co do rozkładu prędkości w przekroju poprzecznym postawić następujące wnioski:

1) Prędkości na dnie i przy ścianie koryta są najmniejsze.

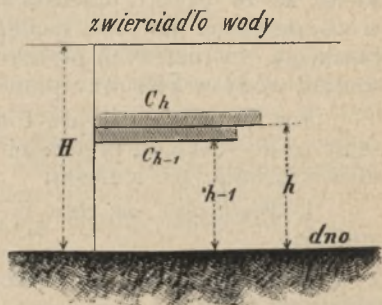
2) Prędkość w kierunku pionowym wzrasta w miarę oddalenia od dna.

3) Prędkość w tym samym kierunku pionowym jest największa na powierzchni.

4) Bezwzględnie największa prędkość w przekroju jest na powierzchni w miejscu, gdzie jest największa głębokość, t. j. w nurcie.

Powższe wnioski są zupełnie zgodne z zapytowaniami, które sprawdzone zostały przez pomiary bezpośrednie. Okoliczność ta więc dalszym jest dowodem, że wykazane zasady ruchu wody możemy uważać jako odpowiadające rzeczywistości. Wprawdzie co do wniosków ad 3 i 4 nie wszystkie pomiary hydrometryczne wykazały zgodność, albowiem w niektórych wypadkach największa prędkość znajdowała się nie na powierzchni, ale poniżej, również i bezwzględnie największa prędkość nie była w miejscu największej głębokości, lecz takie wyniki pomiarów nie koniecznie osłabiają prawdziwość mych wniosków, jeżeli uwzględnimy, że pomiarów nie możemy uważać za zupełnie dokładne, gdyż obecne przyrządy hydrometryczne nie są należycie czułe i pewne, następnie nie wszystkie pomiary wykonywane były w przekrojach, w których bieg wody był jednostajny.

Z przytoczonych własności siły poruszającej uwzględnione zostały w badaniach dotychczas własności podane ad 1 i 2; natomiast własność ad 3, t. j. że siła działa w całym przekroju na wszystkie cząsteczki jednakowo bez względu na ich położenie, naprowadza na przypuszczenie, że zmiana prędkości w kierunku pionowym odbywa się według pewnego prawa. Zadaniem więc będzie wysledzenie tego prawa i ujęcie go we wzór matematyczny. Do celu tego dojdziemy, jeżeli potrafimy wyszukać związek, jaki zachodzi między prędkościami dwóch sąsiednich w warstewek. Niech rys. 7 przedstawia przekrój podłużny koryta oraz dwie warstewki wody płynącej, przyczem grubość tych warstewek niech wynosi jednostkę. Oznaczmy prędkość w warstewki górnej przez C_h , zaś dolnej przez C_{h-1} i odległości tych warstewek od dna przez h , $(h-1)$. Następnie niech A oznacza drogę, jakąby cząsteczka wykonała w ciągu



Rys. 7.

jednej sekundy pod działaniem siły poruszającej, gdyby ruch sama dla siebie odbywała; wielkość zaś oporu wskutek lepkości na jednostkę długości niech oznacza w .

Jeżeli przyjmiemy, że cząsteczki warstewki dolnej poruszają się z prędkością C_{h-1} , to prędkość cząsteczek warstewki górnej wynosiłaby, bez uwzględnienia oporu z powodu lepkości, na długości drogi C_{h-1}

$$C_h = C_{h-1} + A.$$

Ponieważ cząsteczki warstewki górnej muszą pokonywać podczas ruchu na długości drogi $= C_{h-1}$ opór lepkości wynoszący $C_{h-1} \cdot w$, zatem o tę wartość zmniejszy się prędkość, czyli w rzeczywistości

$$\begin{aligned} C_h &= C_{h-1} + A - C_{h-1} \cdot w \\ &= A + C_{h-1} (1 - w). \end{aligned}$$

Niech

$$(1 - w) = \varphi,$$

zatem

$$C_h = A + C_{h-1} \cdot \varphi.$$

Wzór ten wprawdzie wyraża już związek między prędkościami dwóch sąsiednich warstewek, jednak nieznanne są wartości A i φ .

Celem wyznaczenia ilości A podstawmy $h = 0$,

zatem

$$C_0 = A + C_{0-1} \cdot \varphi,$$

co oznacza prędkość w odległości od dna $= 0$, zatem jest to prędkość na dnie, zaś C_{0-1} oznacza prędkość poniżej dna w odległości $= 1$. Gdy zaś woda płynie tylko powyżej dna, zatem $C_{0-1} = 0$, stąd

$$C_0 = A.$$

Podstawiając tę wartość otrzymujemy:

$$C_h = C_0 + C_{h-1} \cdot \varphi \dots \dots \dots (1).$$

Równanie powyższe wyraża prawo, według którego wzrasta prędkość w kierunku pionowym. Według więc tego wzoru możemy już oznaczyć prędkość w dowolnym punkcie, skoro znamy prędkość na dnie i prędkość sąsiedniej warstewki dolnej, nadto wartość φ .

Ilość φ jest stałą, albowiem zależy tylko od lepkości wody. Wprawdzie lepkość wody ulega zmianie przy różnej ciepłocie, ale zmiany te są nieznaczne i z tego powodu możemy uważać wartość dla tej ilości φ jako stałą, tem bardziej, że ciepłota wód płynących nie jest bardzo różna. Wyznaczenie ilości φ przeprowadzone zostanie w ustępie 6.

Wzór (1) oznaczam mianem wzoru zasadniczego, albowiem na podstawie jego dadzą się zestawić inne wzory, potrzebne do obliczeń hydrologicznych.

3) Wyznaczenie wzoru do obliczenia prędkości w kierunku pionowym oraz krzywej prędkości.

Celem wyprowadzenia wzoru prędkości w kierunku pionowym dla dowolnego punktu, podstawmy w równaniu (1) za h różne wielkości.

$$C_h = C_0 + C_{h-1} \cdot \varphi$$

niech $h = 0$ $C_0 = C_0$

$$h = 1 \quad C_1 = C_0 + C_0 \cdot \varphi = C_0 (1 + \varphi)$$

$$h = 2 \quad C_2 = C_0 + C_1 \cdot \varphi = C_0 (1 + \varphi + \varphi^2)$$

$$h = 3 \quad C_3 = C_0 + C_2 \cdot \varphi = C_0 (1 + \varphi + \varphi^2 + \varphi^3)$$

$$h = h \quad C_h = C_0 + C_{h-1} \varphi = C_0 (1 + \varphi + \varphi^2 + \varphi^3 + \dots + \varphi^h).$$

Wyraz w nawiasie jest szeregiem geometrycznym, więc suma jego ze względu, że $\varphi < 1$, oznacza się wyrazem

$$\frac{1 - \varphi^{h+1}}{1 - \varphi}$$

Po podstawieniu tej wartości

$$C_h = C_0 \left(\frac{1 - \varphi^{h+1}}{1 - \varphi} \right) \dots \dots \dots (2).$$

Według tego wzoru możemy już obliczyć dowolną prędkość, skoro znamy prędkość na dnie C_0 . Ponieważ jednak wyznaczenie prędkości na dnie jest połączone z trudnościami, przeto do celów praktycznych wzór ten nie jest przydatny. Możemy natomiast powyższe równanie przedstawić w innej postaci.

Jeżeli oznaczymy głębokość przekroju w badanej linii pionowej przez H (rys. 8), odpowiednią prędkość na powierzchni przez C_H , zaś na dnie przez C_0 , to według równania (2)

$$C_H = C_0 \left(\frac{1 - \varphi^{H+1}}{1 - \varphi} \right) \dots \dots \dots (2a);$$

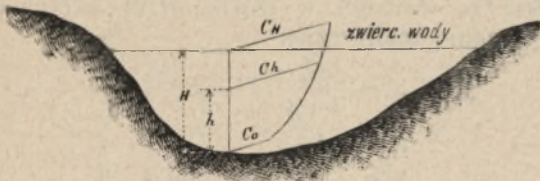
wyznamy z tego równania C_0 i wstawmy w równanie (2), to otrzymujemy

$$C_h = C_H \left(\frac{1 - \varphi^{h+1}}{1 - \varphi^{H+1}} \right) \dots \dots \dots (3).$$

Wzór ten jest już odpowiedni do zastosowania praktycznego, albowiem wyznaczenie prędkości na powierzchni możemy łatwo skutecznie z należytą dokładnością za pomo-



cą pomiaru pływakiem. Przy użyciu wzoru (3) możemy obliczyć wszystkie prędkości w przekroju, leżące w tym samym kierunku pionowym a w różnych głębokościach. zmierzwszy tylko głębokość przekroju w tej linii pionowej i oznaczwszy prędkość na powierzchni.



Rys. 8.

Dotychczas wyznaczenie tych prędkości uskutecznić mogliśmy tylko na podstawie bezpośredniego pomiaru hydro-metrem każdej prędkości oddzielnie. Z równania (2) możemy wyprowadzić wzór, który umożliwi obliczenie prędkości powyższych ze znanej prędkości nie na powierzchni ale w głębokości dowolnej w tym samym kierunku pionowym:

dla głębokości h :

$$C_h = C_0 \frac{1 - \varphi^{h+1}}{1 - \varphi}$$

" " "

h'

$$C_{h'} = C_0 \left(\frac{1 - \varphi^{h'+1}}{1 - \varphi} \right);$$

po wyznaczeniu z górnego równania prędkości C_0 i wstawieniu jej w dolne równanie, otrzymamy:

$$C_{h'} = C_h \left(\frac{1 - \varphi^{h'+1}}{1 - \varphi^{h+1}} \right) \dots \dots \dots (4).$$

Stosownie więc do okoliczności możemy wykonać pomiar jednej prędkości pływakiem na powierzchni lub też młynkiem w dowolnej głębokości, a resztę prędkości potrafimy wyznaczyć rachunkiem na podstawie wykazanych wzorów.

Po wyszukaniu prawa, według którego zmienia się prędkość w kierunku pionowym, możemy przystąpić do zbadania kształtu krzywej prędkości, która od wielu lat jest przedmiotem licznych badań hydrotechników. Zadanie to najłatwiej rozwiążemy sposobem analitycznym. Jeżeli bowiem odetniemy na osi X długości odpowiadające wartościom prędkości pojedynczych, zaś na osi Y rzędne odpowiadające

odpowiednim oddaleniom od dna, następnie wyznaczone w ten sposób punkty połączymy krzywą, to linia ta będzie stanowiła ową krzywą prędkości. Współrzędne krzywej będą:

$$x = C_h$$

$$y = h.$$

Wstawiwszy te wartości w równanie (2), otrzymamy dla krzywej równanie analityczne:

$$x = \frac{C_0}{1 - \varphi} (1 - \varphi^{y+1})$$

miech

$$\frac{C_0}{1 - \varphi} = a,$$

$$x = a - a\varphi^{y+1} \dots \dots \dots (5).$$

Równanie to jest równaniem analitycznym linii logarytmicznej; zatem krzywa prędkości w kierunku pionowym jest linią logarytmiczną. Błędny był na zasadzie tego równania pogląd dotychczasowy, że krzywa prędkości jest parabolą lub też krzywą, złożoną z dwóch odcinków paraboli¹⁾.

Jakkolwiek z wyników pomiarów bezpośrednich nie zdołano odkryć właściwego kształtu krzywej prędkości, to jednak sprawdzono niektóre jej własności, a mianowicie:

1) Krzywa ta dla wód powoli płynących jest płaską, zaś dla prędko płynących jest więcej wypukłą.

2) Krzywizna tej linii w dolnej części, począwszy od dna, zmienia się silnie, a w miarę oddalania się od dna zmniejsza się.

Celem sprawdzenia, czy krzywa przedstawiona równaniem (5) odpowiada tym warunkom, przeprowadźmy badanie analityczne.

Z równania (5) okazuje się, że wartość odciętej x zależy od ilości a i y .

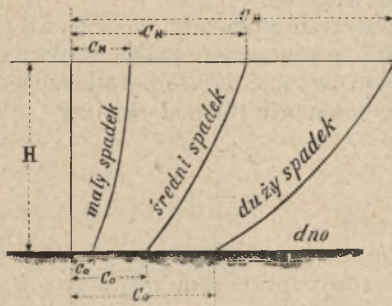
Ponieważ ilość a dla tej samej krzywej jest niezmienną, przeto na wielkość odcinka x wpływa tylko wartość rzędnej y , przyczem zwiększając wartość rzędnej y otrzymujemy również większą wartość dla odcinka x . Jeżeli następnie weźmiemy pod uwagę różne krzywe, dla których ilość a ma wartości zmienne,

¹⁾ Z licznych hydrotechników tylko radca tajny Funk, zmarły w r. 1832, przyszedł na podstawie własnych badań również do przekonania, że zmniejszanie prędkości w kierunku pionowym następuje według linii logarytmicznej.

to odcinki x będą większe dla tej krzywej, której równanie zawiera większe a . Z tego rozpatrywania okazuje się:

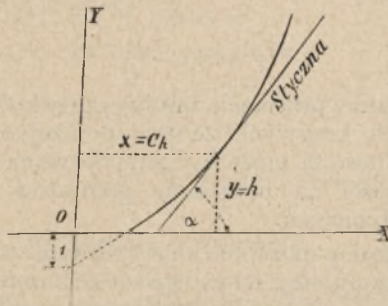
1) Krzywa, w miarę oddalania się od osi X , oddala się również od osi Y .

2) Kształt krzywej zależy od prędkości C_0 , gdy zaś ta prędkość zawisła jest od spadku zwierciadła wody, zatem



Rys. 9.

i kształt krzywej zależy od spadku; przytem dla małych spadków krzywa jest płaską, zaś przy większych spadkach jest więcej wypukłą, jak to przedstawia rys 9.



Rys. 10.

Chcąc poznać, jak się zmienia krzywizna tej linii, wyszukajmy kąt nachylenia stycznej z osią X (rys. 10). Wiemy, że $\operatorname{tg} \alpha = \frac{dy}{dx}$. Jeżeli zróżniczkujemy równanie (5), to:

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{1}{a \varphi^{y+1} \lg \varphi};$$

ponieważ $\lg \varphi$ jest ujemny, zatem $\operatorname{tg} \alpha$ jest zawsze ilością dodatnią, czyli, że kąt α jest ostry. Z równania okazuje się, że kąt α dla tej samej krzywej jest tem mniejszy, im punkt styczności leży bliżej osi X , następnie zmiana tego kąta jest w dolnej części krzywej większa, aniżeli dla części górnej, zaś przy rozmaitych krzywych kąt ten jest tem ostrzejszy, im wartość a jest większa.

Badania powyższe wykazały, że krzywa z równania (5) posiada własności przytoczone; nadto z równania analitycznego możemy wyprowadzić dalsze jej własności.

3) Jeżeli w równaniu (5) podstawimy

$$y = \infty$$

$$x = a = \frac{C_0}{1 - \varphi};$$

to otrzymamy

z tego okazuje się, że przyrost prędkości w kierunku pionowym jest ograniczony, przyczem graniczną wartość oznacza wyraz $\frac{C_0}{1 - \varphi}$. Wartość ta, do której prędkość może wzrastać, zależy od stopnia nachylenia zwierciadła wody, przyczem dla wód o silniejszym spadku jest większą, zaś dla małych spadków jest mniejszą.

4) Podstawiając następnie w powyższe równanie

$$x = 0,$$

$$y = -1;$$

otrzymamy

to znaczy, że punkt przecięcia krzywej prędkości z osią Y leży przy wszystkich krzywych zawsze poniżej osi X w oddaleniu $= 1$. Własność ta może być użytą przy kreśleniu krzywej prędkości na podstawie pomiarów bezpośrednich prędkości pojedynczych.

Po wykazaniu sposobem analitycznym, że krzywa prędkości, jaką otrzymujemy na podstawie obliczeń według przedstawionego wzoru, odpowiada warunkom sprawdzonym przez pomiary, wskazaniem jest sprawdzenie, czy obliczone według podanych wzorów prędkości zgodne są z wartościami rzeczywistymi. Z uwagi jednak, że w następnych ustępach przedstawione będą dalsze wzory dla biegu wody, których zestawienie opiera się na wzorach poprzednich, przeto dla zachowania ciągłości rozumowań, badanie prawdziwości tych wzorów przedstawione jest w ustępie 7.

5) Wyznaczenie wzoru dla średniej prędkości (C_s) w kierunku pionowym.

Jeżeli oznaczymy powierzchnię prędkości w kierunku pionowym przez P , zaś głębokość przekroju w tym kierunku przez H , to wartość dla prędkości średniej

$$C_s = \frac{P}{H}.$$

Zadaniem więc będzie wyznaczenie wzorem matematycznym tej powierzchni P . W tym celu weźmy pod uwagę wązki jej pasek (rys. 11) o szerokości dh w odległości h od dna; powierzchnię tego paska dP oznaczyć możemy wzorem

$$dP = C_h \cdot dh,$$

gdzie C_h jest prędkością w pasku.

Z tego równania otrzymamy wzór dla całej powierzchni, gdy zsumujemy paski (całkując):

$$P = \int_0^H C_h dh,$$

gdzie C_h jest prędkością w pasku.

Wiemy, że według wzoru (3)

$$C_h = C_H \left(\frac{1 - \varphi^{h+1}}{1 - \varphi^{H+1}} \right);$$

po wstawieniu tej wartości otrzymamy

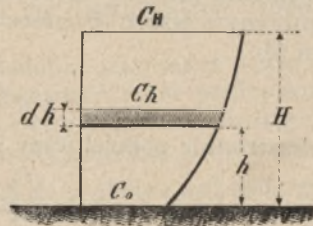
$$\begin{aligned} P &= \int_0^H C_H \left(\frac{1 - \varphi^{h+1}}{1 - \varphi^{H+1}} \right) dh \\ &= \frac{C_H}{1 - \varphi^{H+1}} \int_0^H (1 - \varphi^{h+1}) dh. \end{aligned}$$

Skoro tę całkę rozwiążemy, otrzymamy

$$P = \frac{C_H}{1 - \varphi^{H+1}} \left[H + \frac{1}{\lg \varphi} (\varphi - \varphi^{H+1}) \right].$$

Ponieważ wyraz $\left(\frac{1}{\lg \varphi} \right)$ jest ilością stałą i ujemną z powodu, że $\varphi < 1$, oznaczmy

$$k = - \frac{1}{\lg \varphi}.$$



Rys. 11.

Po wstawieniu otrzymujemy wzór następujący:

$$P = \frac{C_H}{1 - \varphi^{H+1}} [H - k(\varphi - \varphi^{H+1})] \quad \dots \quad (6).$$

Według tego wzoru możemy obliczyć powierzchnię prędkości, skoro znamy wartość C_H , t. j. prędkość na powierzchni i głębokość przekroju w pionowej H . Wartości te z łatwością oznaczyć możemy przez pomiar. Jeżeli pomiaru prędkości na powierzchni z jakichkolwiek powodów nie możemy uskutecznić a natomiast wyznaczyć możemy hydrometrem inną prędkość w dowolnej głębokości ale w tej samej pionowej, to również mamy możliwość na podstawie tej prędkości obliczyć powierzchnię prędkości. W tym jednak wypadku musimy zastosować wzór następujący, który otrzymujemy z wzoru (6) przez odpowiednie przerobienie. Z wzoru (3):

$$C_h = C_H \left(\frac{1 - \varphi^{h+1}}{1 - \varphi^{H+1}} \right),$$

obustronnie podzieliwszy przez $(1 - \varphi^{h+1})$ otrzymamy

$$\frac{C_h}{1 - \varphi^{h+1}} = \frac{C_H}{1 - \varphi^{H+1}}.$$

Wstawiwszy w równanie (6) wartość lewą w miejsce wartości prawej, otrzymujemy wzór, który należy zastosować, gdy znamy prędkość w dowolnej głębokości:

$$P = \frac{C_h}{1 - \varphi^{h+1}} [H - k(\varphi - \varphi^{H+1})] \quad \dots \quad (7).$$

Mając już wzór matematyczny do wyznaczenia powierzchni prędkości, możemy z łatwością zestawić wzór do obliczenia średniej prędkości w kierunku pionowym C_s , gdyż należy tylko wzór ten podzielić przez ilość H .

Z wzoru (6)

$$C_s = \frac{C_H}{1 - \varphi^{H+1}} \left[1 - \frac{k}{H} (\varphi - \varphi^{H+1}) \right] \quad \dots \quad (8).$$

Z wzoru (7)

$$C_s = \frac{C_h}{1 - \varphi^{h+1}} \left[1 - \frac{k}{H} (\varphi - \varphi^{H+1}) \right] \quad \dots \quad (9).$$

Wzór (8) służy dla tego przypadku, gdy znamy wartość prędkości na powierzchni t. j. C_H , zaś wzór (9) ma zastosowanie, gdy wyznaczoną mamy dowolną prędkość C_h . Chcąc więc

obliczyć średnią prędkość dla pewnego kierunku pionowego, musimy pomierzyć te same ilości jak dla obliczenia powierzchni prędkości.

Dotychczas oznaczenie tych wartości mogliśmy przeprowadzić tylko sposobem wykresnym, który jest nader mozolny i wymaga wiele czasu; nadto z łatwością popełniony mógł być błąd, zwłaszcza przy wyznaczaniu powierzchni prędkości planimetrem. Starano się wprowadzić ułatwić wyznaczenie średniej prędkości przez wyszukanie stosunku między tą prędkością a prędkością na powierzchni, mniemano bowiem, że stosunek ten jest stały; gdy zaś z pomiarów okazało się, że tak nie jest a zestawione wzory empiryczne nie dały dokładnych wyników, próbowano zestawić wzór do oznaczenia położenia tej średniej prędkości, aby w ten sposób uprościć pomiar; jednak i w tym kierunku nie doprowadziły badania do pomyślnego wyniku.

Z uwagi więc na powyższe badania, jako też ze względu, że znajomość tego stosunku ma znaczenie także praktyczne, albowiem przy jego pomocy mogą być obliczenia hydrologiczne ułatwione, pożądane jest bliższe wyjaśnienie.

A) *Stosunek prędkości średniej do prędkości na powierzchni* $\left(\frac{C_s}{C_H}\right)$ *w tym samym kierunku pionowym.*

Wzór na oznaczenie tego stosunku otrzymujemy wprost z równania (8), jeżeli obustronnie podzielimy przez ilość C_H .

$$\frac{C_s}{C_H} = \frac{1}{1 - \varphi^{H+1}} \left[1 - \frac{k}{H} (\varphi - \varphi^{H+1}) \right]. \quad (10).$$

Ponieważ do wzoru tego wcale nie wchodzi wartość prędkości ale tylko ilość H , t. j. głębokość przekroju w odnośnej pionowej, zatem na podstawie wzoru (10) możemy wypowiedzieć prawa następujące:

a) Stosunek prędkości średniej do prędkości na powierzchni w kierunku pionowym nie jest stały ale zmienny i zależy tylko od głębokości przekroju w tym kierunku.

b) Stosunek ten dla jednej i tej samej głębokości jest stały, bez względu na wielkość prędkości.

Z tego więc widzimy, że spadek zwierciadła wody nie ma żadnego wpływu na wielkość stosunku $\left(\frac{C_s}{C_H}\right)$. Wykazane

własności mogą być wyzyskane także do celów praktycznych, albowiem na podstawie stosunku w mowie będącego możemy bezpośrednio z prędkości na powierzchni oznaczyć średnią prędkość według wzoru

$$C_s = C_H \cdot s,$$

gdzie s oznacza stosunek tych prędkości.

Ponieważ wzór do wyznaczenia stosunku s jest więcej zawily i obliczenie sposobem rachunkowym jest uciążliwe, przeto na rys. 12 przedstawiona jest krzywa (rys. 12—krzywa dla stosunku $\frac{C_s}{C_H}$), przy której użyciu wyznaczenie stosunku

dla dowolnej głębokości jest nader łatwe, albowiem mamy tylko do odczytania długość rzędnej w oddaleniu odpowiadającym dotyczącej głębokości. Wykreślenie wspomnianej krzywej uskutecznono w sposób powszechnie używany, t. j. obliczono rachunkowo według powyżej podanego wzoru wartości s dla różnych głębokości, następnie na rzędnych wystawionych w odstępach odpowiadających tym głębokościom odcięte zostały obliczone wartości s jako długości, a otrzymane w ten sposób punkty połączone linią krzywą.

Z kształtu krzywej okazuje się, że stosunek $\frac{C_s}{C_H}$ jest nader zmienny: dla głębokości małych 0—2,20 m maleje od 1,0 do 0,824, następnie dla głębokości większych ponownie wzrasta, przyczem przyrost postępuje coraz powolniej. Ta niejednakowa zmienność tłumaczy nam, dlaczego nie zdołano zestawić wzoru sposobem doświadczalnym (empirycznym) na podstawie wyników bezpośrednich pomiarów prędkości.

Prof. HARLACHER na podstawie obszernych pomiarów, wykonanych przez siebie na Elbie, oznaczył wielkość $s=0,85$, zaś według obliczeń WAGNER'A wynosi $s=0,836$.

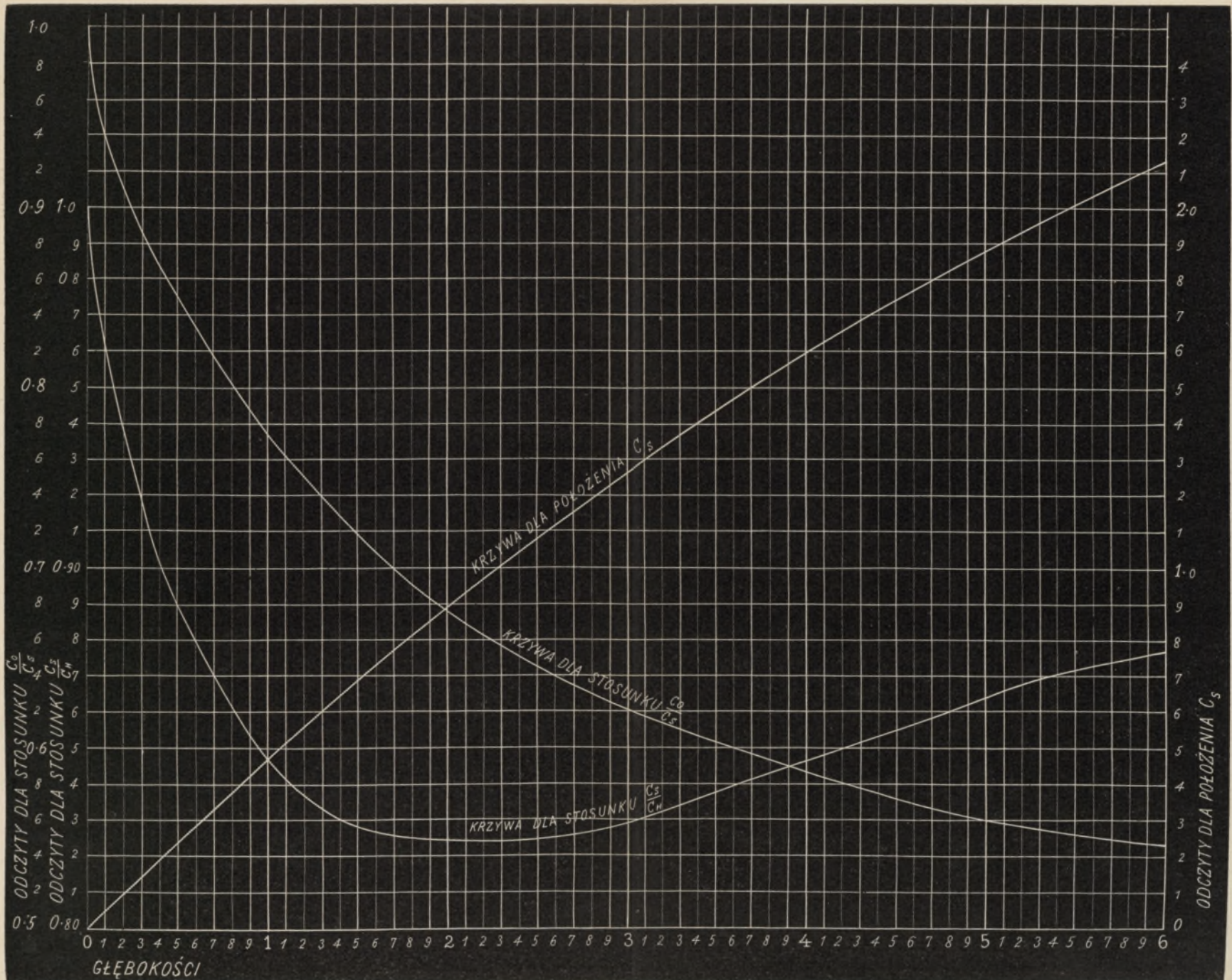
Gdy zaś liczne inne pomiary wykazały, że wartości te nie są dokładne, przyjęto, że stosunek s jest zawisły od charakteru rzeki i z tego powodu należy dla każdej rzeki z osobna wyznaczyć go drogą pomiarową. Zapatrywanie to na podstawie przytoczonego badania należy uważać jako niewłaściwe.

B) *Stosunek prędkości na dnie do prędkości średniej $\frac{C_0}{C_s}$ w tym samym kierunku pionowym.*

Celem zestawienia wzoru dla tego stosunku, musimy wzór (8) przerobić w ten sposób, aby prędkość C_H wy-

Wyznaczenie wykresalne

stosunków $\frac{C_s}{C_H}$ i $\frac{C_o}{C_s}$ oraz położenia C_s .



Rys. 12.

razić przez wartość C_0 , poczem z otrzymanego równania dostaniemy wprost wzór do wyrażeniażądanego stosunku.

Z wzoru (3) otrzymujemy:

$$\frac{C_0}{1-\varphi} = \frac{C_H}{1-\varphi^{H+1}};$$

jeżeli tę wartość wstawimy w równanie (8), to otrzymamy

$$C_s = \frac{C_0}{1-\varphi} \left[1 - \frac{k}{H} (\varphi - \varphi^{H+1}) \right],$$

stąd

$$z = \frac{C_0}{C_s} = \frac{(1-\varphi)}{\left[1 - \frac{k}{H} (\varphi - \varphi^{H+1}) \right]} \dots (11).$$

Z wzoru tego okazuje się, że stosunek $\frac{C_0}{C_s}$ również za-

leży tylko od głębokości, natomiast prędkość jest bez wpływu. Z uwagi, że znajomość tego stosunku przy sporządzaniu projektów technicznych jest ważna, a po drugie obliczanie jego według wzoru jest znużające, przedstawiona jest na tym samym rys. 12 krzywa, przy której pomocy wyznaczenie stosunku $\frac{C_0}{C_s}$ dla dowolnej głębokości jest ułatwione, albowiem mamy tylko odczytać długość odpowiedniej rzędnej. Wykreślenie tej krzywej przeprowadzono w taki sam sposób, jak dla stosunku s . Z kształtu krzywej okazuje się, że zmienność stosunku z postępuje w odmienny sposób niż stosunku s ; stosunek ten maleje w miarę większej głębokości, przy czem zmniejszenie dla małych głębokości jest prędsze aniżeli dla większych.

C) Położenie średniej prędkości w kierunku pionowym.

Z wzoru (3) możemy wyznaczyć położenie dowolnej prędkości w kierunku pionowym:

$$C_h = C_H \left(\frac{1 - \varphi^{h+1}}{1 - \varphi^{H+1}} \right)$$

$$h = \frac{\lg \left[1 - \frac{C_h}{C_H} (1 - \varphi^{H+1}) \right]}{\lg \varphi} - 1.$$

Jeżeli w tem równaniu zamiast dowolnej prędkości C_h wstawimy wartość C_s , to odpowiednia odległość h będzie wartością oznaczającą położenie prędkości średniej względem dna. Oznaczmy ją przez h_s , wtedy

$$h_s = \frac{\lg \left[1 - \frac{C_s}{C_H} (1 - \varphi^{n+1}) \right]}{\lg \varphi} - 1 \dots (12).$$

Według tego wzoru możemy oznaczyć położenie średniej prędkości, przyczem musimy znać jej wartość oraz prędkość na powierzchni C_H . Jeżeli jednak w tem równaniu wstawimy wartość C_s według wzoru (8), to otrzymamy wzór, który pozwala oznaczyć położenie prędkości średniej niezależnie od jej wartości:

$$h_s = \frac{\lg \left[\frac{k}{H} (\varphi - \varphi^{n+1}) \right]}{\lg \varphi} - 1 \dots (13).$$

Wzór ten wskazuje, że położenie średniej prędkości zależy także tylko od głębokości, podobnie jak wyżej podane stosunki tej prędkości. Prawo więc wykazane dla stosunków s i z odnosi się także do położenia średniej prędkości, t. j. że oddalenie tej prędkości od dna w pionowej o tej samej głębokości jest zawsze jednakowe, bez względu czy bieg wody jest pędzący lub powolniejszy.

Możnaby również na podstawie tego wzoru wykreślić odpowiednią krzywą, celem wyznaczenia wartości h_s sposobem graficznym, ponieważ jednak do celów praktycznych znajomość jej nie jest potrzebna, przeto wykreślenie jej nie zostało przeprowadzone.

5) Wyznaczenie wzoru dla objętości i średniej prędkości przepływu.

Oznaczmy objętość wody, przepływającej przez dowolny przekrój w ciągu jednej sekundy przez Q , powierzchnię przekroju przez F , długość jego w wysokości zwierciadła wody przez L , to objętość wody przepływającej przez wązki pasek tego przekroju (rys. 13) o szerokości dl wyraża się

$$dQ = P \cdot dl,$$

gdzie P oznacza powierzchnię prędkości w pionowym kierunku

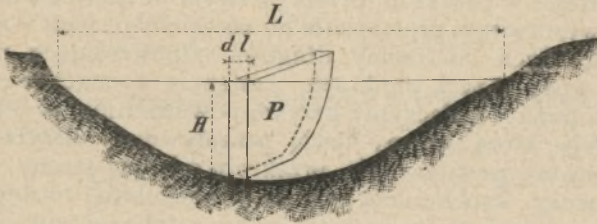
ku dla tego paska. Objętość zaś całej ilości przepływającej przez ten przekrój wody wyznacza całka

$$Q = \int_0^L P dl.$$

Po wstawieniu za P wartości według wzoru (6) otrzymujemy

$$Q = \int_0^L \frac{C_H}{1 - \varphi^{H+1}} [H - k(\varphi - \varphi^{H+1})] dl.$$

W tej całce znajduje się ilość H , która oznacza głębokość przekroju w dowolnych punktach i jest zmienna, nadto jest jeszcze zmienna prędkość C_H ; jednak, ponieważ iloraz $\left(\frac{C_H}{1 - \varphi^{H+1}}\right)$ jest stały dla tego samego przekroju, przeto



Rys. 13.

rozwiązanie tej całki możemy przeprowadzić, ale tylko w takich wypadkach, gdy ilość tę możemy wyrazić przez l , t. j. gdy kształt przekroju przedstawić możemy równaniem analitycznym. Ponieważ przekroje w korytach naturalnych mają kształty nieforemne, dla których zestawienie równania analitycznego jest niemożliwe, przeto wyprowadzenia ogólnego wzoru rachunkiem całkowym nie możemy uskutecznić. Tylko dla przekrojów o kształtach geometrycznych, jak to się zdarza przy kanałach sztucznych, zestawienie wzoru przez rozwiązanie tej całki jest możliwe. Jeżeli weźmiemy pod uwagę przekrój prostokątny, jaki najczęściej posiadają sztuczne kanały fabryczne, przy których H ma wartość jednakową dla całego przekroju i zarazem jest średnią głębokością przekroju—oznaczymy ją przez T —to dla tego przekroju

$$Q = \int_0^L \frac{C_T}{1 - \varphi^{T+1}} [T - k(\varphi - \varphi^{T+1})] dl$$

$$= \frac{C_T}{1 - \varphi^{T+1}} \int_0^L [T - k(\varphi - \varphi^{T+1})] dl.$$

Po rozwiązaniu tej całki otrzymujemy

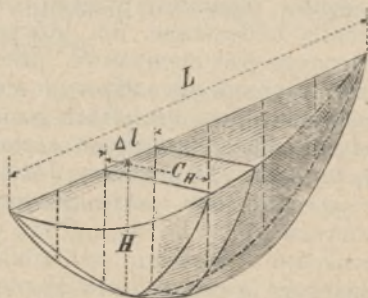
$$Q = \frac{C_T}{1 - \varphi^{T+1}} [R - kL(\varphi - \varphi^{T+1})] \quad . \quad . \quad (14).$$

Według tego wzoru możemy obliczyć objętość przepływu; musimy jedynie zmierzyć powierzchnię przekroju oraz jego szerokość i głębokość, nadto prędkość na powierzchni. Wzór ten jednak zestawiony jest dla przekroju prostokątnego; dla przekroju o kształcie dowolnym musimy wyszukać inną drogę do wyprowadzenia wzoru na objętość przepływu.

Jeżeli w przekroju przepływowym w dowolnych punktach wystawimy prostopadłe do powierzchni jego i na tych prostopadłych odetniemy długości odpowiadające prędkościom wody w tych punktach, następnie wyznaczone w taki sposób punkty połączymy krzywą powierzchnią, to otrzymamy bryłę, którą zwiemy bryłą przeplywową. Bryła ta jest ograniczona powierzchnią przekroju z jednej strony, z drugiej strony wspomnianą krzywą powierzchnią, następnie od góry powierzchnią zwierciadła wody, z dołu zaś powierzchnią koryta. Bryłę taką przedstawia rys. 14. Objętość takiej bryły równa jest objętości wody przepływającej przez dany przekrój w jednej sekundzie; jeżeli więc potrafimy oznaczyć objętość tej bryły wzorem matematycznym, to wzór taki będzie zarazem żądanym wzorem do obliczenia objętości wody przepływającej.

Celem oznaczenia objętości bryły podzielmy ją na paski pionowe płaszczyznami prostopadłymi do powierzchni przekroju, o równej grubości, którą oznaczymy przez Δl ; objętość takiego paska będzie ΔQ ; wtedy

$$\Delta Q = P \cdot \Delta l,$$



Rys. 14

przyczem P przedstawia powierzchnię prędkości w kierunku pionowym w tym pasku (rys. 13).

Powierzchnię P możemy wyznaczyć według wzoru (6):

$$P = \frac{C_H}{1 - \varphi^{H+1}} [H - k(\varphi - \varphi^{H+1})].$$

Po wstawieniu tej wartości w poprzednie równanie otrzymujemy

$$\Delta Q = \frac{C_H}{1 - \varphi^{H+1}} [H - k(\varphi - \varphi^{H+1})] \cdot \Delta l.$$

Równanie to możemy przedstawić w innej postaci. Z wzoru (2 a) otrzymujemy wprost

$$\frac{C_H}{1 - \varphi^{H+1}} = \frac{C_0}{1 - \varphi} \dots \dots \dots (\alpha),$$

następnie po odpowiedniej manipulacji rachunkowej

$$(C_H - C_0) = \frac{C_0}{1 - \varphi} (\varphi - \varphi^{H+1}) \dots \dots \dots (\beta);$$

jeżeli te nowe wartości wstawimy w równanie poprzednie, to otrzymamy:

$$\Delta Q = \left[\frac{C_0}{1 - \varphi} H - k(C_H - C_0) \right] \cdot \Delta l.$$

Według tego wzoru możemy oznaczyć objętości pojedynczych pasków ΔQ_1 , ΔQ_2 i t. d.; jeżeli następnie zsumujemy te cząstkowe objętości, to otrzymamy całą objętość bryły:

$$\Delta Q_1 = \left[\frac{C_0}{1 - \varphi} H_1 - k(C_{H_1} - C_0) \right] \Delta l$$

$$\Delta Q_2 = \left[\frac{C_0}{1 - \varphi} H_2 - k(C_{H_2} - C_0) \right] \cdot \Delta l$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\Sigma \Delta Q = \frac{C_0}{1 - \varphi} \Sigma H \Delta l - k(\Sigma \Delta l \cdot C_H - \Sigma \Delta l C_0).$$

Z rys. 14 widzimy, że

$$\Sigma \Delta Q = Q$$

$$\Sigma H \Delta l = F,$$

następnie $\Sigma C_H \Delta l$ wyraża powierzchnię prędkości na powierzchni zwierciadła wody, którą oznaczmy przez f_H , zaś wyraz $\Sigma C_0 \Delta l$ powierzchnię prędkości na dnie f_0 ; zatem

$$Q = \frac{C_0}{1-\varphi} F - k(f_H - f_0).$$

Wprawdzie już według tego wzoru możnaby oznaczyć objętość Q , jednak wartości f_H i f_0 potrzeba byłoby obliczać sposobem wykreślnym, co jest niewygodne.

Pomnóżmy przeto i podzielmy wyraz $k(f_H - f_0)$ przez ilość L ; wtedy

$$k(f_H - f_0) = kL \left(\frac{f_H}{L} - \frac{f_0}{L} \right).$$

Wyraz $\left(\frac{f_H}{L} \right)$ przedstawia wartość średniej prędkości na powierzchni, którą oznaczmy przez C_T ; zaś $\left(\frac{f_0}{L} \right)$ wyraża prędkość na dnie C_0 ; jeżeli następnie wyszukamy położenie tej pionowej, w której prędkość na powierzchni równa będzie prędkości C_T , to zobaczymy, że głębokość w tej pionowej odpowiada średniej głębokości przekroju.

Wstawiwszy wartości te w równanie:

$$k(f_H - f_0) = kL(C_T - C_0),$$

otrzymamy:

$$Q = \frac{C_0}{1-\varphi} F - kL(C_T - C_0);$$

jeżeli następnie wstawimy na podstawie równań (β) , (α)

$$(C_T - C_0) = \frac{C_0}{1-\varphi} (\varphi - \varphi^{T+1})$$

$$\frac{C_0}{1-\varphi} = \frac{C_H}{1-\varphi^{H+1}},$$

to otrzymamy:

$$Q = \frac{C_H}{1-\varphi^{H+1}} [F - kL(\varphi - \varphi^{T+1})] \dots (15).$$

Wzór ten jest już odpowiedni do zastosowania praktycznego, albowiem zawarte w nim ilości możemy z łatwością pomierzyć, przyczem obliczenie objętości uskutecznia się

tylko rachunkiem, bez potrzeby używania sposobu wykreślnego. Do oznaczenia objętości według tego wzoru musimy wykonać co następuje:

a) zmierzyć powierzchnię przekroju, oraz jego długość w wysokości zwierciadła wody;

b) wyznaczyć na podstawie tego pomiaru średnią głębokość przekroju według równania $T = \frac{F}{L}$;

c) zmierzyć prędkość na powierzchni w dowolnym punkcie, oraz

d) zmierzyć głębokość przekroju w tem miejscu, w którym zmierzona jest prędkość.

Z przedstawienia tego okazuje się, że wzór (15) usuwa trudności, które nastęrczał dotychczasowy sposób wykreślny; odpada bowiem potrzeba mierzenia prędkości w całym przekroju, jak również wyznaczanie średniej prędkości w poszczególnych pionowych. Wzór ten jednak odnosi się do ruchu wody ściśle jednostajnego, kiedy tymczasem w naturalnych korytach z powodu zmienności przekroju zazwyczaj bieg wody jest więcej lub mniej zmienny — a więc i zastosować go można jedynie w takich wypadkach, gdy z ustroju koryta wnosić możemy, że bieg wody jest jednostajny. Ponieważ bardzo rzadko znajdujemy takie korzystne miejsca do pomiaru, aby koryto rzeki było jednostajne o przekroju jednakowym i regularnym, zatem dla celów praktycznych wzór (15) uleść musi pewnemu ograniczeniu: mianowicie pomiar prędkości winien być przeprowadzony w pobliżu tej pionowej, w której głębokość równa jest średniej głębokości przekroju lub też w samej tej pionowej. Jeżeli więc pomiar prędkości wykonany został w miejscu, gdzie głębokość równa jest średniej głębokości przekroju, t. j. gdy $h = T$, wtedy wzór przedstawia się w postaci:

$$Q = \frac{C_T}{1 - \varphi^{T+1}} [F - k L (\varphi - \varphi^{T+1})]. \quad \dots \quad (15 a).$$

W wypadkach takich, gdy nie możemy wyszukać odpowiedniego miejsca dla pomiaru i zmuszeni jesteśmy wykonać pomiar w przekroju o kształcie nieregularnym, należy przeprowadzić pomiar prędkości na powierzchni w całym przekroju, albowiem bieg wody w przekroju takim nie jest jednostajny; następnie na podstawie tych prędkości należy wyznaczyć sposobem wykreślnym średnią prędkość i tę wartość przyjąć do wzoru (15 a), jako prędkość C_T .

Możemy również z wzoru (15) utworzyć inny wzór, według którego mamy możliwość obliczenia objętości, skoro znamy prędkość nie na powierzchni ale w dowolnej głębokości w jakiegokolwiek pionowej.

Z wzoru (3) otrzymujemy:

$$\frac{C_h}{1 - \varphi^{h+1}} = \frac{C_H}{1 - \varphi^{H+1}};$$

jeżeli więc tę wartość wstawimy we wzór (15), to otrzymamy:

$$Q = \frac{C_h}{1 - \varphi^{h+1}} [F - kL(\varphi - \varphi^{T+1})] \dots (15b).$$

Wzór ten ma jednak znaczenie więcej teoretyczne aniżeli praktyczne, ponieważ pomiar prędkości pod powierzchnią wody jest utrudniony a następnie wymagany jest bieg wody zupełnie jednostajny, który rzadko można znaleźć w naturalnych korytach rzecznych.

Bliższe szczegóły odnoszące się do użycia tych wzorów w praktyce i sposobu obliczenia podane są w ustępie 8.

Z wyprowadzonych wzorów możemy wysnuć następujące własności, dotyczące przepływu:

1) Ponieważ wyraz $kL(\varphi - \varphi^{T+1})$ ma znak ujemny, zatem długość przekroju wpływa niekorzystnie na ilość przepływu. Jeżeli pod uwagę weźmiemy dwa przekroje o równej powierzchni a różnych kształtach, to w tych samych warunkach przepłynie większa ilość wody przez ten przekrój, który jest węższy, czyli posiada większą głębokość średnią.

2) Z porównania wzoru (15 a) z wzorem (14) wynika, że przez przekrój o dowolnym kształcie przepływa taka sama ilość wody, jak przez przekrój prostokątny o tej samej długości i o głębokości równej średniej głębokości tego przekroju.

Mając wzór na oznaczenie objętości przepływu, możemy bardzo łatwo otrzymać z niego wzór do obliczenia średniej prędkości przepływu, którą oznaczmy przez C_0 , gdyż musimy jedynie wyraz na objętość podzielić przez powierzchnię przekroju; otrzymujemy wtedy:

$$C_0 = \frac{C_H}{1 - \varphi^{H+1}} \left[1 - \frac{k}{T} (\varphi - \varphi^{T+1}) \right] \dots (16).$$

Z wzoru tego okazuje się, że średnia prędkość przepływu zależy od ilości T , t. j. od średniej głębokości przekroju. W tym przekroju, którego średnia głębokość jest większa, będzie również większa średnia prędkość przepływu.

Wzór (16) wykazuje zarazem, że wzory dotychczasowe do wyznaczenia średniej prędkości, wyprowadzone na podstawie praw ruchu ciał stałych według równania $C = k\sqrt{\alpha \cdot r}$ są błędne, albowiem nie średni promień przekroju r , ale średnia głębokość przekroju T ma wpływ na wielkość średniej prędkości przepływu, jak to wykazane zostało na przykładzie powyżej.

6. Wyznaczenie wartości stałej ilości φ .

Powyżej przedstawione wzory zawierają stałą ilość, której znajomość jest konieczną, aby wzory te mogły być zastosowane do obliczeń w praktyce. Wyznaczenie owej ilości najłatwiej możnaby uskutecznić przez porównanie wzorów z wynikami pomiarów bezpośrednich, a następnie, przez wstawianie odpowiednich wartości w miejsce ilości φ , wyszukać jej rzeczywistą wartość. Ponieważ we wzorach ilość ta wchodzi w różnych potęgach, sposób powyższy byłby nader zmuśny, zatem celem ułatwienia tego zadania zestawiony został osobny wzór następujący:

Według wzoru (1)

$$C_h = C_0 + C_{h-1} \cdot \varphi;$$

stąd

$$C_{h-1} = \frac{C_h - C_0}{\varphi};$$

jeżeli zamiast h wstawimy H , to otrzymamy

$$C_{H-1} = \frac{C_H - C_0}{\varphi};$$

podobnie

$$C_{H-2} = \frac{C_{H-1} - C_0}{\varphi}.$$

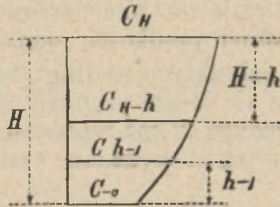
Wstawivszy za C_{H-1} wartość z górnego równania (rys. 15), otrzymujemy

$$C_{H-2} = \frac{C_H - C_0(1 + \varphi)}{\varphi^2};$$

ponieważ
zatem

$$C_0(1 + \varphi) = C_1,$$

$$C_{H-2} = \frac{C_H - C_1}{\varphi^2}.$$



Rys. 15.

W podobny sposób postępując, otrzymamy wzór

$$C_{H-h} = \frac{C_H - C_{h-1}}{\varphi^h},$$

stąd

$$\varphi = \sqrt[h]{\frac{C_H - C_{h-1}}{C_{H-h}}} \dots \dots \dots (17).$$

Wzór ten jest dogodny do wyznaczenia wartości φ ; musimy jedynie znać w tej samej pionowej trzy prędkości (rys. 15), a mianowicie:

- a) prędkość na powierzchni C_H .
- b) prędkość w dowolnej głębokości poniżej zwierciadła wody $C_{(H-h)}$.
- c) prędkość powyżej dna w oddaleniu $(h-1)$, t. j. C_{h-1} .

Na podstawie tego wzoru przeprowadzono liczne obliczenia, które wykazały dla φ zmienne wartości; przyczyną tej niezgodności jest okoliczność, że pomiary hydrometryczne wykonane zostały w przekrojach, w których bieg wody nie był ściśle jednostajny; przytem przyrządy hydrometryczne nie posiadają tej dokładności aby otrzymane wyniki uważać można za prawdziwe. Liczne obliczenia wykazały dla φ różne wartości, leżące w granicach 0,460—0,610; większość pomiarów dała dla φ wartości 0,500—0,550; przyjąłem przeto jako prawdopodobną wartość dla φ wartość pośrednią

$$\varphi = 0,525,$$

$$\text{zaś } k = -\frac{1}{\lg \varphi} = 1,552.$$

Jeżeli powyższe wartości wstawimy we wzory w miejsce ilości φ i k , to otrzymamy wzory, według których możemy przeprowadzić obliczenia.

Z uwagi, że ilość φ zawarta jest w tych wzorach w różnych potęgach i obliczenia z tego powodu sposobem rachunkowym są zmuodne, przedstawiona jest na rys. 16 krzywa, przy której użyciu wyznaczenie ilości (φ^{h+1}) jest nader ułatwione, albowiem musimy tylko odczytać długość rzędnej w oddaleniu ($h + 1$).

Wykreślenie tej krzywej uskuteczniiono w taki sam sposób, jak krzywej do oznaczenia stosunków prędkości średniej do prędkości na powierzchni lub na dnie (rys. 12).

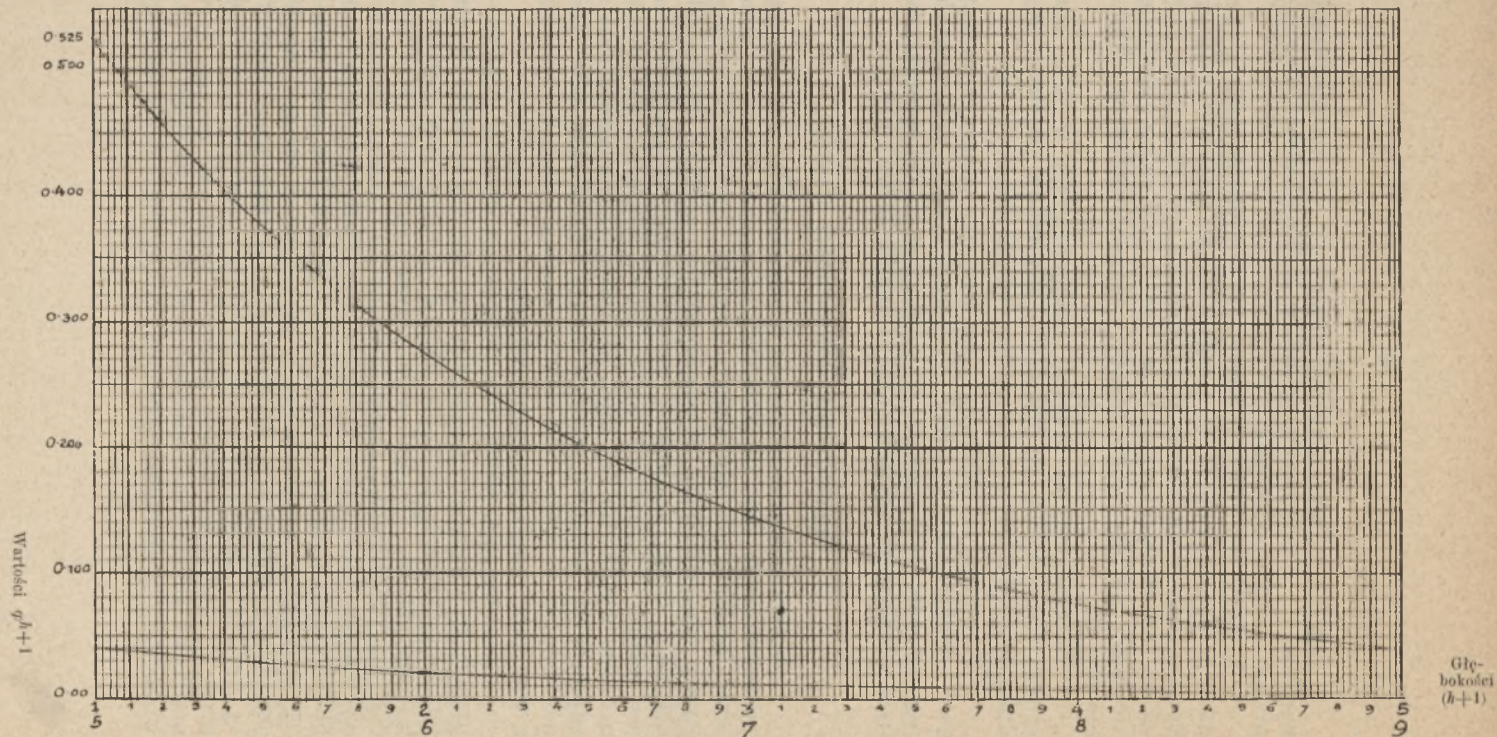
Ponieważ na podstawie tej krzywej oznaczyć można φ^{h+1} z dokładnością do trzech dziesiętnych, zatem zastosowanie tego sposobu jest zupełnie wystarczające do celów praktycznych a obliczenie przez to staje się nader łatwe i prędkie.

7) Sprawdzenie dokładności wzorów.

Jakkolwiek przedstawione w poprzednich ustępach prawa ruchu wody oraz na podstawie tych praw wyprowadzone wzory oparte są na zasadach mechaniki i hydrauliki z jednej strony i na zjawiskach występujących w wodach płynących z drugiej strony, to jednak prawdziwość tych poglądów nie jest jeszcze dostatecznie udowodniona, albowiem nie została usunięta wątpliwość czy ujęte we wzory matematyczne prawa odpowiadają stanowi rzeczywistości. Konieczne więc jest porównanie wartości, obliczonych według podanych wzorów z wynikami pomiarów bezpośrednich

Z uwagi, że wzory dla objętości i średniej prędkości przepływu opierają się na prawie, wyrażonem wzorem (3), zatem najpierwszem zadaniem będzie zbadanie czy prawo to jest prawdziwe. W tym celu zestawionych jest w tablicy dziesięć przykładów, przedstawiających pomiar prędkości w kierunku pionowym. Powyższe przykłady wyjęte są z publikowanych pomiarów hydrometrycznych i w ten sposób ugrupowane, że odnoszą się do rzek różnych tak pod względem spadku jako też co do wielkości. W rubryce 1 podane są prędkości wyznaczone na podstawie pomiaru, zaś obok wartości obliczone według wzoru. Ponieważ pomiar tych prędkości przeprowadzony był młynkiem i prędkość na powierzchni C_H nie była zmierzona, zatem obliczenie prędkości

Krzywa do wyznaczania wartości φ^{h+1} .



Rys. 16.

uskuteczono według wzoru (4), przyczem za podstawę do obliczenia pojedynczych prędkości przyjęto tę prędkość pomiarową, którą uznano za prawdziwą. Prędkości te są wyróżnione drukiem grubszym.

Oprócz prędkości w różnych głębokościach, zestawione są w rubryce 2-ej powierzchni prędkości, zaś w rubryce 3-ej prędkości średnie dla tych kierunków pionowych według pomiaru jako też według obliczenia na podstawie wzorów (7) i (9), albowiem do wyznaczenia tych wartości przyjęto za podstawę te same prędkości, które wzięto do obliczenia prędkości w poszczególnych głębokościach.

Jeżeli porównamy wartości otrzymane z pomiaru z wartościami obliczonymi według wzoru, to pozycje przedstawiające prędkości w różnych głębokościach nie są tak zgodne, aby dokładność wzoru mogła być stwierdzona bez żadnego zastrzeżenia. Wprawdzie w przeważnej części tych wartości różnice są nieznaczne, bo wynoszące tylko kilka milimetrów, natomiast w pozycjach, odnoszących się szczególnie do prędkości warstewek dolnych, położonych przy dnie, występują już znacznie większe różnice, które wymagają wyjaśnienia bliższego, jeżeli dokładność wzoru nie ma być podana w wątpliwość. Ponieważ z zestawienia liczbowego nie można ocenić, które wartości odpowiadają rzeczywistym, czy otrzymane z pomiaru czy też obliczone według wzoru, zatem przedstawione są te pomiary wykreślnie na rys. 6. Wartości otrzymane z pomiaru uwidocznione są na rysunku kółeczkami, zaś na podstawie wartości, obliczonych według wzoru, narysowana jest krzywa prędkości. Z wykreślnego tego przedstawienia okazuje się jasno, że prędkości, przy których występują znacznie większe różnice, są według pomiaru błędne, natomiast wyznaczone na podstawie wzoru odpowiadają dokładniej wartościom rzeczywistym. Gdy więc wyłączymy te błędne wartości, zaś różnice mniejsze w innych wartościach przypiszemy niedokładności młynka hydrometrycznego, który nie jest przyrządem doskonałym, to z przytoczonych przykładów możemy wnosić, że wykazane wzory podają wartości zupełnie dokładne.

Że powyższe przypuszczenie jest uzasadnione, wykazują to wartości zestawione w rubryce 2-ej i 3-ej tablicy 1-ej, w których znajdujemy już znacznie większe różnice. Wyjawszy pomiar na rzece Oker, który z powodu zbyt małej prędkości nie jest pewny, inne pomiary wykazują dostateczną

zgodność, albowiem uważać możemy, że występujące różnice powstały po części wskutek niedoskonałości pomiaru samego, a po części spowodowane są przez błędy, które nie są wykluczone przy wyznaczaniu tych wartości na podstawie wyników pomiarowych. Jeżeli nadto uwzględnimy, że przytoczone pomiary wykonywane były w naturalnych korytach, w których bieg wody nie był zupełnie jednostajny, gdyż pomiar niwelacyjny wykazał, iż zwierciadło wody było w przekroju przy jednym brzegu wyżej wzniesione, to wymienione powyżej obliczenia możemy uważać jako wystarczający dowód, że wyprowadzone prawa dla jednostajnego ruchu wody, a ujęte w matematyczne wzory, są prawdziwe. Samo przez się rozumie się, że wzory te mogą być zastosowane w praktyce tylko w takich wypadkach, gdy bieg wody jest jednostajny, natomiast, nie mogą być zastosowane do ruchu zmiennego, który odbywa się w inny sposób. Tej też okoliczności należy przypisać, że otrzymane z pomiaru hydrometrycznego krzywe prędkości w kierunku pionowym mają rozmaite kształty.

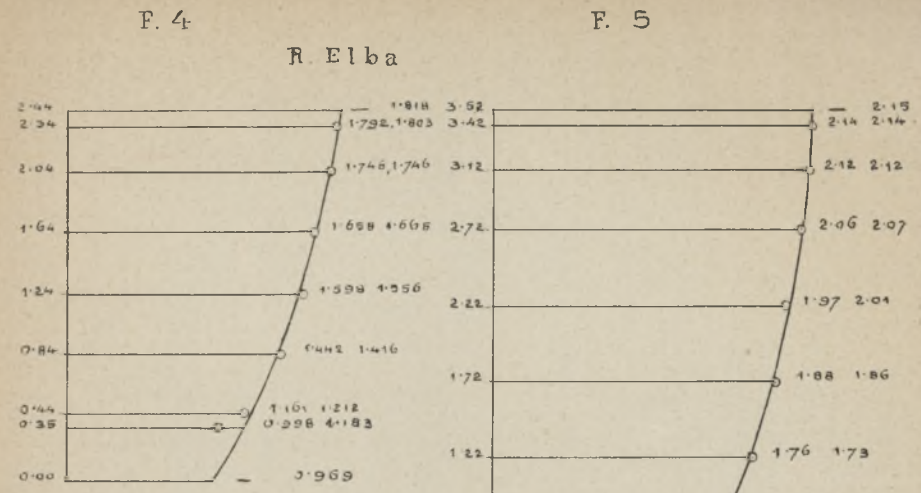
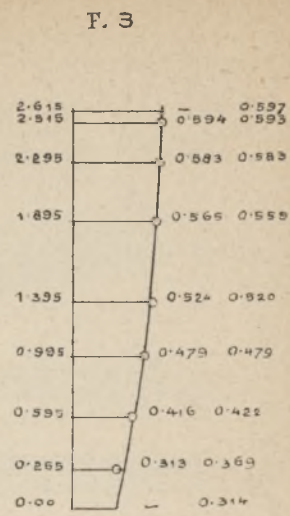
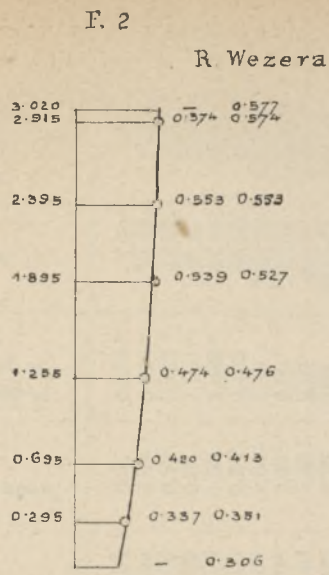
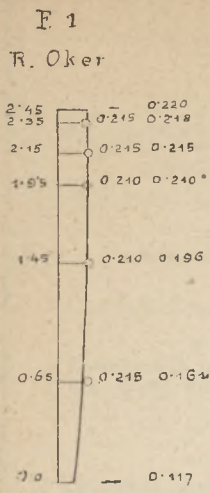
W tablicach 2 i 3 zestawione są przykłady, odnoszące się do wyznaczenia objętości wody przepływającej. Ponieważ wzory do obliczenia tej wartości mają ważne znaczenie do celów praktycznych, przeto zadaniem przytoczonych przykładów jest nie tylko sprawdzenie prawdziwości wzorów, ale zarazem wykazanie o ile obliczone na podstawie tych wzorów wartości są dokładne w porównaniu z wynikami pomiarów bezpośrednich.

Z tego względu zestawiona jest większa ilość przykładów, które odnoszą się do rzek różniących się tak co do spadku jak i wielkości; nadto obejmują te przykłady nie tylko niskie stany wody, ale także wysokie jak przy rzece Inie i Elbie. Objętości, przedstawione w tablicy 2, obliczone są na podstawie prędkości na powierzchni w pionowej, której głębokość równa jest średniej głębokości przekroju, lub też na podstawie średniej prędkości ze wszystkich prędkości na powierzchni, które w tablicy oznaczone są gwiazdką, przyczem do obliczenia użyto wzoru (15 a); zaś w tablicy 3 wykazane są obliczenia objętości rzek przeważnie bawarskich, przeprowadzone według wzoru (15b), albowiem dla braku prędkości na powierzchni użyto do obliczenia prędkości pomierzonych młynkiem w dowolnej pionowej, leżącej jednak w pobliżu średniej głębokości. Prędkości te odnoszą się do głębokości 10 *cm* poniżej zwierciadła wody. Różnice między wartościami obli-

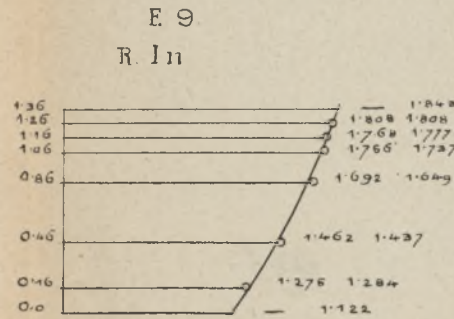
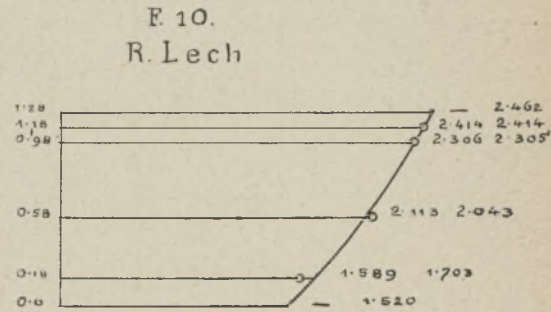
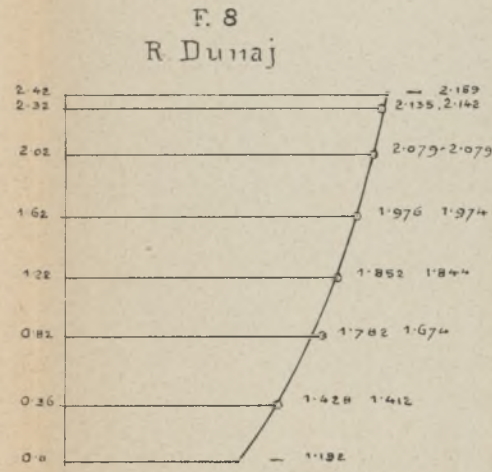
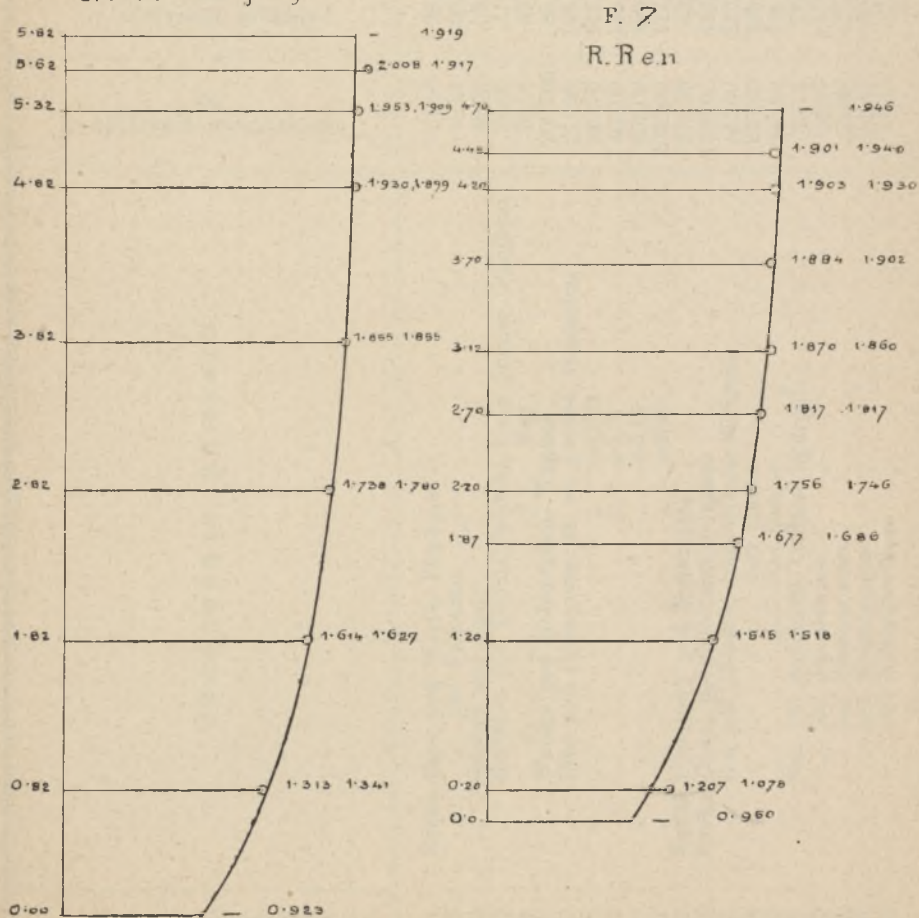
Tablica 1.

Oznaczenie pomiaru	Oddalenie od dna w m	Prędkości			Powierzchnie prędkości			Średnia prędkość		
		według pomiaru	według wzoru	różnice w mm	według pomiaru	według wzoru	różnica	według pomiaru	według wzoru	różnice w mm
1 Rz. Oker pod Leiferde 1-sza pionowa przez Wagner'a	2,45	—	0,220	—	—	—	—	—	—	—
	2,35	0,215	0,218	+	3	—	—	—	—	—
	2,15	0,215	0,215	—	—	5,145	4,537	-0,608	0,210	0,185
	1,45	0,210	0,196	-	14	—	—	—	—	—
	0,65	0,215	0,161	-	54	—	—	—	—	—
0,00	—	0,117	—	—	—	—	—	—	—	—
2 Rz. Wezera poniżej Schöne 2-ga pionowa przez Wagner'a	3,020	—	0,577	—	—	—	—	—	—	—
	2,915	0,574	0,574	—	—	—	—	—	—	—
	2,395	0,553	0,553	—	—	—	—	—	—	—
	1,895	0,539	0,527	-	12	1,428	1,447	+0,019	0,473	0,478
	0,000	—	0,306	—	—	—	—	—	—	—
3 Rz. Wezera poniżej Schöne 4-ta pionowa przez Wagner'a	2,615	—	0,597	—	—	—	—	—	—	—
	2,515	0,594	0,593	-	1	—	—	—	—	—
	2,295	0,583	0,583	—	—	—	—	—	—	—
	1,895	0,565	0,559	-	6	—	—	—	—	—
	0,000	—	0,314	—	—	—	—	—	—	—
4 Rz. Elba pod Djeczynem 4-ta pionowa; stan wody +0,354 przez Harlacher'a	2,44	—	1,818	-	—	—	—	—	—	—
	2,34	1,792	1,803	+	11	—	—	—	—	—
	2,04	1,746	1,746	—	—	—	—	—	—	—
	1,64	1,658	1,665	+	7	—	—	—	—	—
	0,84	1,598	1,556	-	42	3,609	3,643	+0,034	1,476	1,498
0,44	1,442	1,416	-	26	—	—	—	—	—	
0,35	1,161	1,212	+	51	—	—	—	—	—	
0,00	0,998	1,183	+	185	—	—	—	—	—	
5 Rz. Elba pod Djeczynem 3-cia pionowa; stan wody +1,321 przez Harlacher'a	3,52	—	2,15	—	—	—	—	—	—	—
	3,42	2,14	2,14	—	—	—	—	—	—	—
	3,12	2,12	2,12	—	—	—	—	—	—	—
	2,72	2,06	2,07	+	10	—	—	—	—	—
	2,22	1,97	2,01	+	40	—	6,346	—	—	—
1,72	1,88	1,86	-	20	—	—	—	—	—	
1,52	1,76	1,73	-	30	—	—	—	—	—	
0,72	1,60	1,52	-	80	—	—	—	—	—	
0,27	1,39	1,27	-	120	—	—	—	—	—	
0,00	—	1,08	—	—	—	—	—	—	—	—

№ fig. w rys. 17



F. 6
Kanał dunański



Uwaga: Prędkości lewe odnoszą się do pomiaru.
Prędkości prawe obliczone są według wzoru.

Skala dla głębokości i prędkości 1:50.

Rys. 17.

Tablica 3. Zestawienie obliczeń objętości przepływu według wzoru (15b).

№ porządkowy	Oznaczenie pomiaru	Powierzchnia przekroju F m^2	Długość przekroju L m	Średnia głębokość T m	Prędkość pomierzona młyn- kiem w dowolnej głębokości i pionowej	Głębokości odpowiadające prędkości: h	Objętość przepływu Q m^3		Różnica w %
							według pomiaru	według wzoru $Q = \frac{c^h}{1 - \rho^{h+1}} [F - kL(\rho - \rho^{h+1})]$	
22	Rzeka Dunaj pod Donauwörth; stan wody +0,93. Schmid .	93,14	74,20	1,25	1,669	1,21	123,70	131,60	+6
23	" " " " +0,98 " .	96,27	74,55	1,29	1,529	1,26	125,10	121,02	-3,2
24	" " pod Neuburgiem " .	169,40	89,00	1,90	1,927	1,85	278,40	270,42	-3
25	" " pod Ingolstadtem " .	208,04	115,50	1,80	1,912	1,77	329,30	306,30	-7
26	" Isara pod Monachium " .	32,58	36,80	0,88	1,351	0,80	38,60	38,20	-1
27	" Lech pod Kaufering " " -0,69 " .	38,20	55,80	0,69	1,719	0,83	40,00	42,31	+7
28	" " " " -0,52 " .	47,00	57,30	0,82	1,562	0,93	59,00	61,16	+3,6
29	" " " " +0,07 " .	85,90	60,00	1,432	2,545	1,43	170,00	182,00	+7
30	" " pod Schwabstadel " .	40,65	37,00	1,10	1,839	1,09	71,50	66,47	-7
31	" Ren pod Barglea. Grebenau " .	426,12	201,27	2,11	2,484	2,40	828,83	851,22	+2,5
32	" " pod Lautenburgiem. Wagner " .	577,60	215,00	2,68	1,712	3,20	786,00	794,37	+1

czonemi według wzoru a wyznaczonemi z pomiaru, podane są w procentach, zatem oznaczają zarazem stopień dokładności. Z przytoczonych przykładów tylko przy obliczeniach objętości przepływu dla rzek Eger i Sazawy wypadają różnice powyżej 10%, natomiast inne obliczenia różnią się znacznie mniej od wartości pomiarowych, albowiem przeważnie różnice wynoszą 2—3%, przyczem są one częścią dodatnie, częścią ujemne. Powodem, dlaczego obliczone objętości dla rzek Eger i Sazawy są za małe jest ta okoliczność, że podane wartości dla prędkości średnich na powierzchni 0,534, 0,257 są za niskie w porównaniu do średniej prędkości przepływu, która dla rzeki Eger wypada 0,535, zaś dla Sazawy 0,252 *m*; dla pierwszej więc rzeki prędkość średnia przepływu jest większą od prędkości średniej na powierzchni, dla drugiej zaś rzeki różnica między temi wartościami wynosi tylko 5 *mm*; z czego wnosić należy, że albo przy wyznaczaniu tych wartości wkradł się błąd, lub też bieg wody w przekroju pomiarowym był zupełnie zmienny. Również przy innych obliczeniach powstały różnice głównie z tego powodu, że przyjęte do obliczenia prędkości nie są zupełnie dokładne, albowiem stosownie do tego czy one są za wielkie lub za małe, wypadają różnice dodatnie lub ujemne. Przykłady te więc wykazują, że szczególnie przy wyznaczaniu prędkości na powierzchni, na podstawie której to prędkości obliczyć chcemy objętość przepływu, należy postępować z należytą przezornością, albowiem od tej wartości głównie zależy dokładność obliczenia. Wprawdzie wybór odpowiedniego miejsca do pomiaru oddziaływa także na stopień dokładności, jednak wpływ ten jest znacznie mniejszy, gdyż przytoczone przykłady jak i wiele innych obliczeń przeprowadzonych dla przekrojów nieregularnych dawały dobre wyniki gdy prędkość na powierzchni była dokładnie wyznaczoną.

Z przedstawionych przykładów okazuje się, że wzory podają wyniki z jednakową dokładnością dla rzek wolno i szybko płynących, albowiem w tych przykładach przychodzą prędkości na powierzchni od 0,257 *m* począwszy do 2,84 *m*; również dla przekrojów płytkich i głębokich, gdyż średnie głębokości wynoszą 0,51 *m* do 5,63 *m*, a powierzchnie ich mierzą od 14,50 do 13,95 *m*². Także stany wody nie wpływają na zmniejszenie stopnia dokładności wzorów, gdyż przykłady dla rzeki Elby i Inn wykazują dla wysokich wód, jak również dla niskich wyniki jednakowo dokładne.

Z powyższego przedstawienia widzimy więc, że wzory w mowie będące mogą być zastosowane dla wszystkich rzek i dla rozmaitych stanów wód w przeciwieństwie do wzorów dotychczasowych, które tylko w szczególnych przypadkach dają dobre wyniki, natomiast w innych warunkach otrzymujemy z nich wyniki zupełnie błędne.

Co się tyczy wzorów do obliczenia średniej prędkości przepływu, to nie przytaczam osobnych przykładów dla wykazania ich dokładności z tego powodu, że wzory te wyprowadzone są wprost z wzorów dla objętości przepływu, zatem dokładność ich jest równorzędną z tymi ostatnimi.

8) Zastosowanie wzorów w praktyce do obliczeń.

Cheąc przeprowadzić jakiegokolwiek obliczenie hydrologiczne na podstawie podanych wyżej wzorów, musimy najpierw wykonać pomiar celem wyznaczenia zawartych we wzorach wartości. Ponieważ dokładność obliczeń zależy głównie od dokładności pomiarów, przeto wskazanem jest przytoczenie tych wszystkich czynników, które wpływają na pomiar, a temsamem powiększają lub zmniejszają stopień dokładności obliczonych wyników. Już w ustępie poprzednim było wykazane na przykładach, że dokładność wzorów zawisa jest przede wszystkim od dwóch czynników: od miejsca, w którym pomiar jest wykonany i od sposobu przeprowadzenia samego pomiaru; z tego więc względu przystąpię najpierw do rozpatrzenia tych dwóch czynników.

A) *Wyznaczenie miejsca dla pomiaru.*

Wiadomo, że podane wzory oparte są na prawach ruchu jednostajnego; wobec tego przy wyznaczaniu miejsca pomiaru należy przede wszystkim zwrócić uwagę, aby bieg wody odpowiadał temu warunkowi. Wprawdzie w korytach naturalnych rzadko natrafić możemy na miejsca, w którychby bieg wody był zupełnie jednostajny, natomiast przy każdej rzece, nawet płynącej korytem całkiem zdziczałym, znajdują się miejsca takie, że wyniki pomiarów w nich przeprowadzonych możemy przyjąć za podstawę do wyznaczenia objętości lub średniej prędkości przepływu z dokładnością wystarczającą zupełnie do celów praktycznych. Ponieważ zmienny ruch wody spowodowany jest przez zmianę przekroju poprzecznego, jesteśmy w stanie już na podstawie ustroju koryta jako też z zewnętrznych zjawisk ocenić, czy

bieg wody w uważanem miejscu jest więcej lub mniej zmiennej. Przedewszystkiem nie należy obierać miejsca do pomiaru w takich częściach rzeki, w których koryto zmienia swoją szerokość, t. j. przekroje poprzeczne przyjmują bądź to większą, bądź mniejszą szerokość; następnie w takich miejscach, w których koryto jest nader rozszerzone, przyczem głębokości są małe, lub też koryto mocno zwężone a prędkość wody jest znaczna.

Najodpowiedniejszymi miejscami są te, które odpowiadają następującym warunkom:

a) koryto rzeki powinno być zwarte o jednakowej szerokości i dostatecznie głębokie;

b) prędkość wody na powierzchni nie powinna być wielka, bieg zaś wody winien być łagodny;

c) zwierciadło wody tworzyć powinno podczas spokojnego powietrza gładką powierzchnię, nie okazującą żadnych śladów wirowych lub falowań;

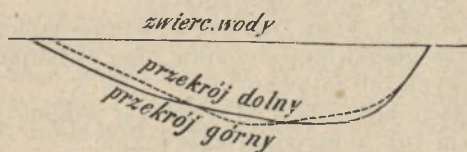
d) wreszcie bieg wody odbywać się winien w kierunku prostoliniowym lub w łagodnej krzywiznie.

Z zestawionych tych warunków okazuje się, że najodpowiednijszem miejscem do pomiaru prędkości na powierzchni są te przestrzenie rzek, w których koryto jest głębokie a woda płynie z małą prędkością. Miejsce, w których przekrój koryta jest nadmiernie głęboki i szeroki, wskutek czego bieg wody jest znikomo mały, zwłaszcza przy niskim stanie wody, nie należy wybierać, ponieważ przekroje są zazwyczaj nader zmienne i wykazują gwałtowne zagłębienia. Wyszukanie miejsca do pomiaru według podanych wskazówek nie jest zbyt trudne nawet w rzekach górskich, albowiem w każdej rzece, na pewnych jej częściach, koryto jest głębsze a bieg wody powolniejszy w stosunku do biegu ogólnego.

Do dotychczasowych pomiarów, wykonywanych przy użyciu przyrządów hydrometrycznych, wybierano przeważnie takie przekroje, w których prędkość wody była większą, albowiem jest to koniecznym warunkiem, jeżeli funkcyonowanie hydrometru ma być pewne; natomiast do pomiaru prędkości pływakiem pożądane są przekroje, w których bieg wody jest powolny; z tego okazuje się, że przekroje, które uważane były za nieodpowiednie do pomiaru młynkiem hydrometrycznym, z powodu małej prędkości, są właśnie najlepsze do pomiaru pływakowego, celem wyznaczenia tych

wartości, które są potrzebne do obliczenia według podanych wzorów.

Skoro wyszukane zostało miejsce do pomiaru, należy następnie przekonać się, czy koryto posiada jednakowy przekrój na wymaganej długości. W tym celu wytyczyć należy oprócz przekroju pomiarowego jeszcze dwa inne przekroje, jeden powyżej, drugi poniżej, w odstępach odpowiednich do prędkości, według wzoru poniżej przedstawionego, i następnie przeprowadzić ich pomiar. Zdjęcie tych przekrojów nie potrzebuje być tak dokładne jak przekroju pomiarowego, wystarczy pomierzyć głębokości w odstępach 5—10 m,—pozem na podstawie pomiaru narysować należy te przekroje od ręki na papierze kratkowanym, przyjmując dla obu



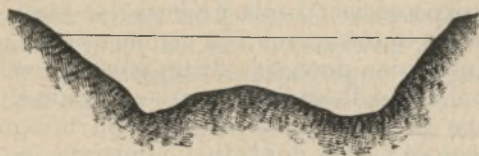
Rys. 18.

wspólną podstawę w sposób, jak wskazuje rys. 18. Z porównania zdjętych przekrojów można ocenić, czy wybrane miejsce jest odpowiednie do pomiaru. Jeżeli z rysunkowego przedstawienia okaże się większa różnica w kształtach przekrojów, należy zaniechać pomiaru prędkości w tem miejscu i wyszukać inne; gdy różnice są małe, można przystąpić do właściwego pomiaru w sposób następujący:

B) Pomiar przekroju i prędkości.

Wyznaczenie powierzchni przekroju uskutecznia się przez dokładne pomierzenie głębokości w odstępach jedno- lub dwumetrowych. W tym celu przeciąga się przez koryto rzeki linkę drucianą, podzieloną na długości jednowymiarowe kulkami metalowymi stale umocowanymi; linką tą wyznacza się równocześnie długość przekroju w wysokości zwierciadła wody, przyczem za długość przekroju uważać należy tę część przekroju, w której woda płynie, a nie całą część zajętą przez wodę. W przypadkach, gdy brzegi przekroju są zupełnie płaskie, częstokroć woda rozlewa się znacznie szerzej, przyczem przy brzegu wcale nie płynie lub też porusza się nadzwyczajnie słabo; tej więc części nie należy wliczać do po-

wierzchni przekroju przepływowego. Po uskutecznieniu tej czynności należy również narysować przekrój na kratkowanym papierze od ręki i porównać z przekrojami poprzednio pomierzonymi. Gdyby z porównania okazały się większe różnice w głębokościach lub co do powierzchni, wskazaniem jest odstąpienie od dalszego pomiaru w tym przekroju, zwłaszcza jeżeli wymagana jest większa dokładność obliczeń. Również na podstawie tego odrębnego rysunku możemy ocenić, czy pomiar prędkości mamy wykonać tylko w miejscu głębokości średniej, czy też w całym przekroju. Jeżeli kształt przekroju jest regularny i nie wykazuje gwałtownych zmian w głębokościach, wystarczy pomiar prędkości wykonać tylko w jednej pionowej, a mianowicie w tej, w której głębokość równa jest głębokości średniej przekroju, gdy zaś przekrój jest nieregularny i głębokości są rozdzielone, jak to wskazuje rys. 19, należy uskutecznić pomiar w całym przekroju.



Rys. 19.

W pierwszym przypadku, t. j. gdy kształt przekroju pozwala na pomiar tylko w jednym miejscu, musimy najpierw wyznaczyć wartość głębokości średniej T . W tym celu obliczamy na podstawie odrębnego rysunku powierzchnię przekroju

a następnie wartość $T = \frac{F}{L}$. Wprawdzie w ten sposób

wyznaczona głębokość średnia przekroju nie będzie dokładna jednak jest zupełnie wystarczająca, aby oznaczyć w przekroju miejsce, w którym głębokość odpowiada tej wyznaczonej głębokości średniej. Ponieważ w każdym przekroju znajdują się dwie takie głębokości po obu brzegach, zatem do pomiaru wybierac należy głębokość średnią, która leży po stronie brzegu płaskiego, albowiem bieg wody przy tym brzegu jest więcej jednostajny, natomiast przy brzegu stromym, wskutek nieregularnej zazwyczaj ściany, bieg wody jest mniej

łagodny, a następnie miejsce pomiaru byłoby zanadto przybliżone do brzegu.

Po wyznaczeniu w przekroju miejsca głębokości średniej, możemy przystąpić do pomiaru prędkości. Do pomiaru prędkości na powierzchni najlepiej używać pływaków, jakie otrzymuje się przez porznięcie drzewa okrągłego o średnicy 10 cm na krążki 2—4 cm grube, których górną powierzchnię powlec należy białą farbą, aby można je było lepiej w czasie pomiaru obserwować. Zaopatrywania pływaków w chorągiewki nie uważam za właściwe, zwłaszcza gdy prędkość wody jest większa. W przypadkach gdy powietrze nie jest zupełnie spokojne a pomiaru nie możemy odroczyć (jak to bywa w czasie wezbrania rzeki) i zwierciadło wody lekko faluje, należy używać pływaków z drzewa dębowego o większej grubości 10—20 cm, aby przez większe zanurzenie mniej były wystawione na wpływ wiatru i falowania. Również przy pomiarach na większych rzekach pływaki winny być większe, aby były należycie widziane z brzegów.

Przed rozpoczęciem pomiaru należy, jak już wyżej zaznaczono, wytyczyć oprócz przekroju pomiarowego, jeszcze dwa inne przekroje: jeden powyżej, drugi poniżej, w odległości, na której pomiar prędkości mamy przeprowadzić. Przekroje te wytycza się przez wystawienie na obu brzegach tyczek, których odległość należy dokładnie odmierzyć po obu brzegach. W przekroju pomiarowym na przeciągniętej linie oznacza się miejsce, w którym ma być mierzona prędkość, przez zawieszenie odpowiedniego znaku, nadto dobrze jest uwidocznić odstępy 5-cio i 10-cio metrowe znakami odpowiednimi, celem łatwego oznaczenia miejsca, przez które pływak przechodzi.

Co do odstepu, w jakim przekrój górny i dolny winien być oddalony od przekroju pomiarowego, są różne zapartywania; powszechnie przyjęto, że odległość ta zależy od szerokości rzeki, a mianowicie odpowiadać powinna długości przekroju, jaki zaś odstęp przekrojów tych jest najracjonalniejszy, wykazuje następujące obliczenie.

Oznaczmy odległość przekroju górnego od dolnego przez l , zaś czas przepływu pływaka od górnego do dolnego przekroju niech wynosi n sekund, to prędkość $C = \frac{l}{n}$.

Ponieważ przy spostrzeganiu popełniamy błąd, zatem oznaczony czas dla przepływu nie odpowiada rzeczywistej

drodze = l , ale innej, którą oznaczymy przez l' ; więc

$$l = l' + \delta;$$

również z obliczenia wypadnie prędkość C' :

$$C' = \frac{l'}{n};$$

stąd

$$\frac{l}{n} = \frac{l'}{n} + \frac{\delta}{n},$$

czyli

$$C = C' + \frac{\delta}{n}.$$

Błąd przy obliczeniu prędkości wynosi więc

$$C - C' = + \frac{\delta}{n}.$$

Błąd δ powstaje z tego powodu, że w czasie spostrzegania pływak nie znajdował się dokładnie w płaszczyźnie przekroju górnego lub dolnego, ale w pewnej odległości. Wielkość tego błędu zależy od bystrości obserwatora, zatem jest zmienny; przyjmijmy, że błąd ten wynosi przy jednym spostrzeżeniu 20 *cm*, następnie, że popełniany jest przy obu przekrojach w tym samym kierunku, wobec czego

$$\delta = + 40 \text{ cm},$$

$$C - C' = + \frac{40}{n} \text{ cm}.$$

Jeżeli granicę błędu dopuszczalnego dla prędkości oznaczymy 1 *cm*, czyli przyjmijmy, że prędkość obliczona C' może się różnić od prędkości rzeczywistej C najwięcej o 1 *cm*, to

$$C - C' \leq 1 \text{ cm},$$

$$\frac{40}{n} \leq 1 \text{ cm},$$

stąd

$$n \geq 40.$$

Równanie to więc wykazuje, że jeżeli przyjmijmy błąd przy spostrzeganiu 40 *cm*, to odległość między górnym a dolnym przekrojem ma być taka, aby czas przepływu między tymi przekrojami wynosił najmniej 40 sekund. Z tego okazuje się, że nie szerokość rzeki ale prędkość wody wpływa na wielkość odstepu, przyczem dla rzek prędko płynących jest ten odstep większy aniżeli dla wolno płynących. Jeżeli więc mamy wykonać pomiar na rzece, w której prędkość na powierzchni

w płaszczyźnie średniej głębokości wynosi 1 m, to wystarczy przyjąć odległość między górnym i dolnym przekrojem 40 m, czyli odległość ich od przekroju pomiarowego winna wynosić 20 m. Przyjmowanie większej odległości, jakkolwiek korzystne byłoby ze względu na zmniejszenie błędu, nie jest wskazane z tego powodu, że przekroje w korycie rzeki na większej długości ulegają zmianom, zatem prędkość wyznaczana z pomiaru, przeprowadzonego na większej długości, oznaczałaby średnią prędkość przepływu z tej długości a nie prędkość w przekroju pomiarowym. Wypuszczanie pływaków odbywać się winno z łodzi w odpowiedniej odległości powyżej górnego przekroju, aby przez wiosłowanie nie wywoływać zmian biegu wody na powierzchni, zaś spostrzeganie pływaków wystarczy przeprowadzać tylko w przekroju górnym i dolnym, natomiast w przekroju pomiarowym wyznaczać należy miejsca ich przepływu. Do oznaczenia czasu przepływu używać należy zegarka ze wskazówką sekundową (chronometru), którą według potrzeby można puścić w ruch lub też wstrzymać. W celu kontroli należy wykonać dla każdego miejsca przepływu przynajmniej dwa zgodne pomiary.

Jeżeli pomiary wykonywamy tylko w płaszczyźnie średniej głębokości, to nie jest konieczną potrzebą aby pławak przepływał ściśle przez ten punkt przekroju, w którym głębokość odpowiada średniej głębokości; wystarcza zupełnie, gdy zmierzmy prędkość w pobliżu tej głębokości; należy jednak dokładnie wyznaczyć miejsce gdzie pławak przepłynął i następnie zmierzyć głębokość w tem miejscu. W tym wypadku oblicza się objętość przepływu według wzoru 15. Dobrze jest wykonać pomiar prędkości nie tylko w jednej płaszczyźnie pionowej, ale także jeszcze w drugiej, położonej również w pobliżu średniej głębokości z drugiej strony, oraz zmierzyć odpowiednią głębokość i na podstawie tej prędkości przeprowadzić obliczenie drugie. Wyznaczanie czasu przepływu z osobna między przekrojem górnym i pomiarowym, następnie między tym a dolnym, jako też punktów przepływu w przekrojach: górnym i dolnym, uważam za zbyt cenne, albowiem przez to nie powiększa się stopień dokładności pomiaru a natomiast utrudnia się samą czynność pomiarową.

Wprawdzie użycie linki do pomiaru ułatwia znacznie czynność, jednak zastosowanie jej do pomiarów na rzekach większych, zwłaszcza podczas wyższego stanu wody, jest połączone z wielkimi trudnościami a częstokroć jest niemożliwe;

w takich wypadkach należy używać do oznaczania miejsc przepływu pływaków w przekroju pomiarowym instrumentu mierniczego, lub też tylko samych tyczek. Ponieważ czynność ta opiera się na zasadach miernictwa i zastosowanie odpowiedniego sposobu zależy od warunków miejscowych, przeto, nie podając szczegółów, nadmieniam tylko, że przy pomiarze należy szczególniejszą zwrócić uwagę na dokładne wyznaczenie prędkości, natomiast przy oznaczeniu miejsc przepływu pływaków dopuszczalna jest mniejsza ścisłość z tego powodu, że głębokości przekroju nie zmieniają się gwałtownie, a po drugiej głębokość nie wpływa na dokładność obliczenia w takim stopniu jak wartość prędkości.

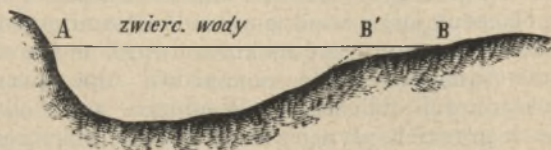
Ponieważ pomiar wielkich wód, zwłaszcza w rzekach górskich, połączony jest z wielkimi trudnościami, przeto uważam za stosowne przytoczyć niektóre uwagi, mogące znacznie ułatwić samą czynność pomiarową oraz przyczynić się do dokładności obliczenia. Wiadomo, że wielkie wody w rzekach górskich, płynąc z wielką prędkością, częstokroć przyjmują inny kierunek od wód niskich; z tego też powodu przekrój wybrany dla pomiaru małej wody nie zawsze jest odpowiedni dla wielkiej wody. Przy wyznaczaniu przekroju należy zwracać baczną uwagę nie tylko na ustrój właściwego koryta, lecz głównie na cały przekrój zalewowy. Najodpowiedniejszym miejscem do pomiaru jest to, gdzie właściwe koryto biegnie równolegle z brzegami terenu zalewowego, przyczem kierunek ten powinien być ile możności prostoliniowy. Wyszukanie więc i zmierzenie przekroju należy przeprowadzić już w czasie niskiego stanu wody; również na podstawie tego pomiaru należy wyznaczyć dla przypuszczalnego stanu wody średnie głębokości osobno dla przekroju właściwego i zalewowego, jako też miejsca ich położenia odpowiednio zaznaczyć, aby w czasie samego pomiaru mogły być puszczone pływaki w właściwe miejsca. Również czas pomiaru prędkości powinien być wyznaczany w takim czasie, kiedy stan wody nie ulega większej zmianie, gdyż podczas przybywania biegu wody jest nader zmienny i zmierzzone prędkości wypadają zazwyczaj za wielkie; najwłaściwszą chwilą do pomiaru jest ta, gdy stan wody osiągnie najwyższej wartości.

C) Obliczenie objętości wody przepływającej.

Celem obliczenia objętości wody przepływającej według podanego wzoru, musimy wyznaczyć najpierw następujące wartości:

a) Powierzchnię przekroju pomiarowego F , którą otrzymujemy najodpowiedniej przez planimetrowanie narysowanego przekroju.

b) Długość przekroju w wysokości zwierciadła wody L . Wartość tę otrzymujemy wprawdzie bezpośrednio z pomiaru przekroju linką, jednak, jak to już poprzednio zaznaczono, zwrócić należy uwagę na to, aby jako długość wzięto tylko tę część przekroju, w której woda rzeczywiście płynie. W wypadkach wątpliwych, zwłaszcza gdy brzeg jest płaski, długość przekroju oznaczyć można z rysunku w ten sposób, że przedłużamy wątpliwy brzeg w linii prostej aż do przecięcia się ze zwierciadłem wody, jak to wskazano na rys. 20. W przed-



Rys. 20.

stawionym przekroju sięga zwierciadło wody na długość AB ; części jednak BB' , która odcięta zostaje przez przedłużenie brzegu prawego, nie należy wliczać do długości przekroju, zatem tylko długość AB' przyjąć należy jako wartość L .

c) Średnią głębokość przekroju T , którą otrzymujemy z wzoru $T = \frac{F}{L}$.

d) Prędkość na powierzchni C_H i głębokość przekroju w odpowiedniej pionowej. Ilości te wyznaczamy z pomiaru bezpośrednio.

Wprawdzie wskazanem jest, aby prędkość mierzona była w miejscu średniej głębokości, jednak nie zawsze uda się pływak tak puścić, aby dokładnie przepływał w płaszczynie średniej głębokości; wobec tego dokładność wyniku nie zostanie zmniejszona, jeżeli weźmiemy do obliczenia tę prędkość, którą zmierzymy; winna ona jednak leżeć w pobliżu średniej głębokości.

Jeżeli pomiar prędkości przeprowadzony został w całym przekroju, to należy wyznaczyć na podstawie tych prędkości wartość średniej prędkości na powierzchni, co uskutecznia się sposobem wykreślonym przez narysowanie najpierw powierzch-

ni wszystkich prędkości na powierzchni i następnie podzielenie teje przez długość przekroju. Otrzymaną w ten sposób wartość uważać należy za prędkość w miejscu średniej głębokości przekroju C_T .

Znając powyższe wartości, możemy przystąpić do obliczenia objętości lub średniej prędkości przepływu na podstawie wzoru odpowiedniego.

Sposób obliczenia wykazują następujące przykłady:

Przykład 1. *Pomiar Elby pod Djeczynem przez Harlacher'a.*

Prędkość na powierzchni zmierzona jest w miejscu średniej głębokości przekroju:

$$F = 211,90 \text{ m}^2; L = 128,36 \text{ m}; C_T = 1,39 \text{ m},$$

$$T = \frac{F}{L} = \frac{211,90}{128,36} = 1,64 \text{ m},$$

$$\varphi^{2,64} = 0,183 \text{ według odczytu z tablicy,}$$

$$1 - \varphi^{2,64} = 0,817,$$

$$\varphi - \varphi^{2,64} = 0,525 - 0,183 = 0,342.$$

Objętość oblicza się z wzoru (15 a):

$$Q = \frac{C_T}{1 - \varphi^{T+1}} \{F - kL(\varphi - \varphi^{T+1})\}.$$

$$Q = \frac{1,39}{0,817} \{211,90 - 1,552 \cdot 128,36 \cdot 0,342\} = 244,29 \text{ m}^3.$$

Przykład 2. *Pomiar na Dunaju pod Klosternenburgiem przez Harlacher'a.*

Pomiar prędkości na powierzchni wykonany został w całym przekroju, więc do obliczenia wziętą jest średnia prędkość:

$$F = 1795,0 \text{ m}^2; L = 426,0 \text{ m}; T = \frac{1795}{426} = 4,21 \text{ m}; C_T = 2,306 \text{ m}.$$

$$\varphi^{5,21} = 0,035 \text{ z odczytu z tablicy,}$$

$$1 - \varphi^{5,21} = 0,965,$$

$$\varphi - \varphi^{5,21} = 0,525 - 0,035 = 0,490,$$

$$Q = \frac{2,306}{0,965} \{1795,0 - 1,552 \cdot 426,0 \cdot 0,490\} = 3515,23 \text{ m}^3.$$

Przykład 3. *Pomiar Dunaju poniżej Neuburga przez Schmid'a.*

Prędkość zmierzona jest w pionowej dowolnej w pobliżu średniej głębokości, nadto odnosi się do głębokości 10 cm poniżej zwierciadła wody z przyrządy pomiaru młynkiem; z tego powodu do obliczenia wzięto głębokość odpowiadającą tej prędkości, t. j.

$$H = 1,95 - 0,10 = 1,85.$$

$$F = 169,40 \text{ m}^2; L = 89,00 \text{ m}; T = \frac{169,40}{89} = 1,90 \text{ m}; C_H = 1,927 \text{ m}$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi^{2,90} &= 0,154 \\ \varphi^{2,85} &= 0,159 \end{aligned} \right\} \text{ według odczytu z tablicy,}$$

$$1 - \varphi^{2,85} = 0,841,$$

$$\varphi - \varphi^{2,90} = 0,371.$$

Objętość wody oblicza się z wzoru (15 b):

$$Q = \frac{C_H}{1 - \varphi^{H+1}} \{ F - k \cdot L \cdot (\varphi - \varphi^{T+1}) \}.$$

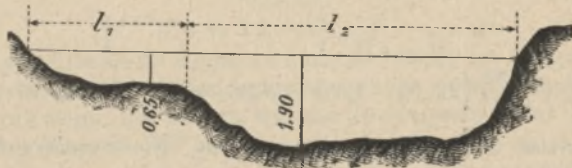
$$Q = \frac{1,927}{0,841} \{ 169,40 - 1,552 \cdot 89,00 \cdot 0,371 \} = 270,42 \text{ m}^3.$$

Przykład 4. *Pomiar Elby poniżej Schöna przez Wagner'a.*

Ponieważ przekrój użyty do pomiarów nie jest regularny, lecz składa się z części płytszej od strony brzegu lewego i z części głębszej przy prawym brzegu, przeto obliczenie przeprowadzone jest z osobna dla tych części. Kształt przekroju wykazuje rys. 21.

a) Część płytsza:

$$f_1 = 18,50 \text{ m}^2; t_1 = 32,50 \text{ m}; t_1 = \frac{18,50}{32,50} = 0,57 \text{ m}.$$



Rys. 21.

Prędkość odnosi się do pionowej o głębokości = 0,65, zatem

$$H = 0,65; C_H = 0,560 \text{ m},$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi^{1,57} &= 0,365 \\ \varphi^{1,65} &= 0,347 \end{aligned} \right\} \text{ z odczytu, jak wyżej,}$$

$$1 - \varphi^{1,65} = 0,653,$$

$$\varphi - \varphi^{1,57} = 0,525 - 0,365 = 0,160,$$

$$Q_1 = \frac{0,560}{0,653} \{ 18,50 - 1,552 \cdot 32,50 \cdot 0,160 \} = 8,94 \text{ m}^3.$$

b) Część głębsza:

$$f_2 = 144,80 \text{ m}^2; l_2 = 77,50 \text{ m}; t_2 = \frac{144,80}{77,50} = 1,63.$$

Prędkość odnosi się do pionowej o głębokości 1,90 m, zatem

$$H = 1,90; C_H = 0,758 \text{ m},$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi^{2,63} &= 0,185 \\ \varphi^{2,90} &= 0,154 \end{aligned} \right\} \text{z odczytu, jak wyżej.}$$

$$1 - \varphi^{2,90} = 0,846,$$

$$\varphi - \varphi^{2,63} = 0,525 - 0,185 = 0,340.$$

$$Q_2 = \frac{0,758}{0,846} \{144,80 - 1,552 \cdot 77,50 \cdot 0,340\} = 76,28 \text{ m}^3.$$

Całkowita zatem objętość $Q = 8,94 + 76,28 = 85,22 \text{ m}^3$.

Według przykładu 4 oblicza się objętość wielkich wód gdy rzeka płynie nie tylko właściwym korytem, ale także przekrojem zalewowym.



BG Politechniki Śląskiej

nr inw.: 11 - 13094



Dyr.1 16057