

35682

2 autora

INŻ. DR. ALEKSANDER PAREŃSKI

Kryteria dla wyznaczenia prędkości wód płynących w łóżyskach przyrodzonych

LWÓW

PIERWSZA ZWIĄZKOWA DRUKARNIA

1 9 3 1

INŻ. DR. ALEKSANDER PAREŃSKI

Kryteria dla wyznaczenia prędkości wód
płynących w łożyskach przyrodzonych

LWÓW
PIERWSZA ZWIĄZKOWA DRUKARNIA
1 9 3 1

ODBITKA Z KSIĘGI PAMIĄTKOWEJ KU CZCI Prof. Dr. h. c. M. THULLIEGO



~~32X56~~

II. 35683



N2B 9309

BIBLIOTEKA GŁÓWNA AGH



1000328125

Akc. Nr. 454 32

INŻ. DR. ALEKSANDER PAREŃSKI

Kryteria dla wyznaczenia prędkości wód płynących w łóżyskach przyrodzonych.

Praktyka inżynierska, w miarę jej postępu i rozrostu, domaga się od nauki rozwiązania wielu technicznie ważnych zagadnień. Po-między innymi rozrost budowli i urządzeń wodnych w ostatnim okresie, domagał się od nauki ścisłej opisanie praw ruchu cieczy rzeczy-wistych — a wskutek niemożności dania takiego opisu — spowo-dował rozwój nowej gałęzi nauki, czysto empirycznej, mianowicie hydrauliki.

Dotychczas bowiem, zjawiska ruchu cieczy rzeczywistych, nie udało się ująć analizą matematyczną, z wyjątkiem najprostszych przypadków tego ruchu, wobec czego zastąpiono je ruchem cieczy doskonałej t. j. zupełnie fikcyjnej, której zjawiska występują w wa-runkach idealnych odbiegających od rzeczywistości. Zjawiskami takimi zajmuje się hydromechanika cieczy doskonałej, która przy-jmując nieściśliwość oraz zupełny brak lepkości cieczy — co jest równo-znacznem z doskonałą ruchliwością — umożliwia wyciąganie wniosków określających własności wszelkich istniejących (nawet doświadczalnie nie zbadanych) zjawisk wchodzących w jej zakres.

O wiele trudniejsze zadanie ma hydromechanika cieczy rzeczywistych, która bada wiernie zjawiska ruchu cieczy rzeczy-wistych. Obszar jej przedmiotu aczkolwiek znaczny, pozostał do-tychczas w szczupłych ramach, ponieważ udało się jedynie najprostsze przypadki ruchu zapomocą jej metod rozwiązać.

Nowożytny konstruktor urządzeń i budowli wodnych wymaga jednak od nauki szybkiego dostarczenia przynajmniej takich kryteriów ruchu cieczy, któreby mogły tworzyć podstawę do oznaczenia wy-miarów jego konstrukcji bez naruszenia ciągłości rozwoju tak teore-tycznych podstaw, jakoteż samego budownictwa wodnego, względnie jego urządzeń.

Ta konieczna potrzeba stała się główną przyczyną rozwoju hydrauliki, nauki, która jest zbiorem formuł empirycznych i wysnutych, na ich podstawie, teorii hydraulicznych.

Formuły empiryczne umożliwiają opisywanie tylko takich zjawisk dynamicznych cieczy rzeczywistych, które ustalono szeregiem doświadczeń; są one zatem formułami interpolacyjnymi, których ekstrapolacja nie da się przeprowadzić drogą matematyczną a jakakolwiek inna droga ekstrapolacji np. doświadczalna w zmniejszonej lub zwiększonej skali, wymaga ogromnej ostrożności.

O te formuły empiryczne opierają się teorie hydrauliczne, których sprawność zależną jest od wartości czy to podstawowej czy też wtrąconej w toku rozważań formuły empirycznej.

Nauka to stosunkowo młoda a jej rozkwit idzie niemal równoległe z rozwojem budownictwa wodnego i jego urządzeń. W tej dziedzinie techniki teoria nie wyprzedziła praktyki natomiast praktyka zmusza — w pewnych granicach — teorię do dotrzymywania jej kroku.

W zakres hydrauliki wchodzi opisywanie: 1) ruchu w przewodach zamkniętych, 2) ruchu równomiernego w korytach otwartych, 3) ruchu nierównomiernego w korytach otwartych, 4) ruchu spowodowanego budowlami piętrzącymi, 5) uderzenia wodnego i oddziaływania hydrodynamicznego, 6) oporu ośrodka, wreszcie 7) ruchu wód wgłębnych.

Z powyższych zagadnień ważnymi dla budowy mostów są: ruch wody równomierny w korytach otwartych przyrodzonych i sztucznych, na podstawie którego oznaczamy sekundową objętość przepływu i ruch nierównomierny w korytach otwartych, w którym powierzchnia swobodna ulega spiętrzeniu wskutek zwężenia swobodnego przepływu przez filary i przyczółki mostowe (budowle zmniejszające swobodny przekrój przepływu). W tym przypadku rozkład prędkości jaki panuje przy ruchu równomiernym zostaje rozburzony wstrzymaniem płynącej masy wody (zmniejszeniem jej prędkości i spiętrzeniem), która po przebyciu przeszkody, względnie podczas jej przebywania, zwiększa swą prędkość. Te objawy charakteryzują ruch wody nierównomierny. Ruch ten pojawia się także w łóżyskach przyrodzonych (bez budowli zwężających swobodny przepływ) na odcinkach rzek o znacznych i zmiennych spadach prowadzących rumowisko. Ruch wody jest tu przyspieszony na szypotach a opóźniony na głębinach.

Poza tem ważnym dla budowy mostów a szczególnie dla fundamentów jest ruch wód wgłębnych.

Ponieważ szczupłe ramy tej notatki nie pozwalają omówić całokształtu tych zagadnień, ograniczono się tylko do omówienia ruchu równomiernego oraz częściowo nierównomiernego, o ile ten ostatni występuje w łóżyskach przyrodzonych.

Zagadnienie zwięźcenia swobodnego przepływu wody przez budowle mostowe zostało ostatnio omówione w Polsce przez prof. Rybczyńskiego¹⁾ i inż. Żbikowskiego²⁾.

Przed tem zagadnieniem musimy jednak — w budowie mostów — rozwiązać inne zagadnienie, mianowicie oznaczyć maksymalny przepływ sekundowy wody w miejscu projektowanego mostu.

Do tego celu służą rozmaite metody: a) bezpośredni pomiar, b) użycie wzorów empirycznych dla wyznaczenia przepływu objętości wielkiej wody, wreszcie c) wyznaczenie tej objętości spadem i przekrojem.

Bezpośrednim pomiarem nie rozporządzamy prawie nigdy, ponieważ — pomijając trudności pomierzenia kulminacyjnych wodostanów — ani stan wody ani objętość przepływu nie są wartościami stałymi. Są one zależnymi od rozmaitych zmiennych czynników naturalnych i sztucznych, jak np. od zmian kształtu przekroju łóżyska spadu, kultury dorzecza, klimatu, zmienności jezior, budowli regulacyjnych i t. p. Ta metoda, zatem jest najtrudniejszą w zastosowaniu.

Drugą metodą są formuły empiryczne dla przepływu wielkiej wody, ułożone przeważnie na podstawie najniekorzystniejszych warunków, jakie się wogóle zdarzyć mogą w danym dorzeczu i istniejących stosunkach hydrologicznych. Otrzymujemy tu zwykle objętość nieco większą od rzeczywistej, asekurując się tem samem od błędów ujemnych.

W formułach tych dla większych dorzeczy wprowadzone są czynniki mające wpływ na objętość przepływu wielkiej wody np. jak powierzchnia dorzecza (w potęgze pierwszej lub wykładnikiem różnym od jedności), długość dorzecza, współczynniki charakteryzujące topografię, wysokość opadu i t. p.

Do rozpowszechnionych w praktyce należą formuły: Adams'a, Brix'a, Bürkli-Ziegler'a, Craig'a, Dickens'a, Dredge'a, Fanning'a, Fuller'a, Iszkowskiego, Köstlin'a, Klunzinger'a (metoda wykreślna), Kreśnika, Lauterburg'a, Mairich'a, Pascher'a, Pfeifer'a, Specht'a, Van Kooten'a i formuła autora.

Metody używane dla małych dorzeczy, wydane przeważnie przez władze (Min. robót publicznych, Min. komunikacji czy kolei i t. p. w różnych państwach) ograniczają się do podania spływu wielkiej wody z 1 km² na podstawie danych topograficznych, opadowych i roślinności. (Metody te używa się dla bardzo małych mostów i przepustów).

¹⁾ M. Rybczyński: „Kryterjum dla obliczania światła mostów“. Czasopismo Techniczne 1926.

²⁾ St. Żbikowski: „Le problème du remous produit par un pont“. III-cia Konfer. Hydr. Państw Bałtyckich 1930.

Ostatnio, podjął próbę, zbudowania formuły dla małych dorzeczy prof. Rożański³⁾ uwzględniając przytem natężenie, zasięg i czas trwania opadów nawalnych.

Trzeci wreszcie sposób wyznaczenia objętości przepływu wody wogóle (nie tylko największej), polega na pomiarzeniu powierzchni przekroju łóżyska rzeki w przekroju badanym lub w pobliżu przekroju badanego oraz jemu i napełnieniu odpowiadającego spad, wreszcie obliczenia objętości przepływu wzorami empirycznymi określającymi średnią sekundową prędkość wody, wyrażoną dwoma zmiennymi t. j. spadem I oraz głębokością średnią T względnie promieniem hydraulicznym R danego przekroju.

Średnia sekundowa prędkość wody v w przekroju A jest wartością matematyczną a nie rzeczywistą, otrzymujemy ją bowiem z relacji

$$Q = A \cdot v \text{ m}^3/\text{s} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

z czego

$$v = \frac{Q}{A} \text{ m/s} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

przyczem ogólny kształt formuły na prędkość jest funkcją uwikłaną, składającą się zwykle z iloczynu lub ilorazu funkcji zmiennych niezależnych występujących w potęgach różnych od jedności

$$v = F[\varphi(I), \psi(T)] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Jeżeli przyjmimy jeszcze osobny czynnik niezależny, występującą tu funkcję szorstkości łóżyska $\varrho(S)$, to wzór (3) przybiera kształt

$$v = F_0[\varphi_0(I), \psi_0(T), \varrho(S)] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3a)$$

przyczem jednak musimy mieć na uwadze, że funkcja ϱ współczynnika szorstkości łóżyska S jest wprost zależną od czynników głównych I i T (względnie R), czyli:

$$\varrho(S) = \varrho[\varphi_1(I), \psi_1(T)] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3b)$$

a wówczas wedle (3a) będzie:

$$v = F_0[\varphi_0(I), \psi_0(T), \varphi_1(I), \psi_1(T)] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3c)$$

Jeżeli jednak zrobimy

$$\varphi = (\varphi_0, \varphi_1) \text{ a } \psi = (\psi_0, \psi_1) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3d)$$

co pod względem matematycznym nie przedstawia większych trudności i podstawimy (3d) we wzór (3c), otrzymamy z powrotem dotychczas używaną formę (3).

Szczegółowy kształt tej formuły występuje w hydraulice w rozmaitych postaciach np.

$$v = \alpha \cdot I^m \cdot \beta \cdot T^n = \kappa \cdot I^m \cdot T^n \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

³⁾ A. Rożański: „Oznaczenie przepływu wielkiej wody w potokach“. Pamiętnik I. Zjazdu Hydr. 1929.

a może być także

$$v = \frac{\varphi(I)}{\psi(T)} = \frac{\alpha I^m}{\beta T^n} = \kappa \frac{I^m}{T^n} \quad (5)$$

lub wreszcie jak u Prof. Matakiewicza, druga formuła⁴⁾

$$v = \frac{\alpha \cdot I^{\varphi(I)}}{\beta + T^{\psi(T)}} \cdot T \quad (6a)$$

oraz trzecia formuła^{4) 5)}

$$v = c \cdot T^n \cdot I^{\varphi(I)} \quad (6b)$$

w czym α , β , κ i c są wartościami stałymi.

Zauważyć tu należy, że forma (5) z ujemnym wykładnikiem jednego z czynników głównych aczkolwiek matematycznie poprawna nie jest chętnie przez hydrologów używana, natomiast forma (4) $v = \varphi(I) \cdot \psi(T)$ nawet z rozwinięciem obydwóch głównych funkcji znalazła w hydraulice obszerne zastosowanie.

Nim przystąpimy do pobieżnego chronologicznego omówienia poszczególnych wzorów hydraulicznych na prędkość średnią używanych w Polsce, musimy w krótkości uzasadnić przyczynę, z powodu której hydromechanika cieczy rzeczywistych nie miała dotychczas możliwości (jako nauka ścisła) rozwiązania zagadnienia ruchu wody w łóżyskach przyrodzonych.

Podstawa hydromechaniki cieczy rzeczywistych sięga drugiej połowy XVII wieku i związana jest z nazwiskiem Newtona, który w „Principiach” ustalił poglądy na istotę cieczy rzeczywistych i ustawił hipotezę oporów występujących przy ruchu cieczy lepkich.

Następnie G. G. Stokes opierając się o wyniki teoretyczne L. Navier’a i S. D. Poisson’a oraz B. de Saint Venant’a, określił matematycznie ruchy ślizgowe, odbywające się w przestrzeni euklidesowej.

Równania Stokes’a niedomagają jednak teoretycznie ponieważ występuje w nich wielkość naprężenia normalnego p w trzech składowych, które na podstawie elementarnego prawa Newtona określamy równaniem o charakterze empirycznym.

Stokes określił analitycznie cechy ruchu ślizgowego (ruch taki prawie nie występuje w przyrodzie), którego równania pozostają w zgodności z doświadczeniem tylko wówczas, gdy ściany łóżyska są bardzo gładkie a średnia prędkość jest niewielką.

Przepływ cieczy rzeczywistych w rzekach i kanałach oraz w przewodach zamkniętych, przy charakterze burzliwym usuwa się z pod rygoru prawa Newtona.

⁴⁾ M. Matakiewicz: „Pomiary wodne”. Podr. Bryły.

⁵⁾ M. Matakiewicz: „Ogólna formuła na średnią chyżość przepływu w łóżyskach rzecznych i kanałowych”. 1925, Zesz. Nr. 2. Wydawn. Akad. Nauk Techn.

Ten dział zjawisk bowiem, w którym bezwładność i lepkość cieczy występują jako wielkości równorzędne, jest narazie dostępny tylko dla metod doświadczalnych. Graniczne (skrajne) obszary badań przepływu cieczy rzeczywistych t. zn. obszary, w których albo zupełnie zanika wpływ lepkości cieczy wobec wielkości sił bezwładności, albo odwrotnie, w których wpływ lepkości — wobec wielkości sił bezwładności — przeważa, są dostępne dla opisanego nauką ścisłą, natomiast obszar środkowy, w którym oba te czynniki są wielkościami równorzędnymi starano się udostępnić teoretycznym badaniom zapomocą doświadczeń.

Wyniki tych doświadczeń streścił Reynolds miarą stosunku wielkości sił bezwładności do sił tarcia w postaci wzoru empirycznego

$$R = \frac{r \cdot v \cdot l}{\mu} \quad \dots \quad (7)$$

w którym r oznacza gęstość cieczy, v prędkość w badanym miejscu, μ współczynnik lepkości cieczy a l charakterystyczny wymiar linjowy. Liczbę R nazwano prędkością zredukowaną a jej wartość liczbową, według autora, liczbą Reynolds'a. Liczba ta wskazuje jakim prawom wolno nam badany przypadek hydrodynamiczny podporządkować, należy ona zatem do kryterjów mechanicznego podobieństwa przebiegów hydrodynamicznych.

Na podstawie wyników badań Stokes'a i Reynolds'a zajął się H. A. Lorentz ujęciem matematycznym ruchu burzliwego, wychodząc z podstawowej myśli ruchu złożonego z ruchów głównego i pobocznego. Najprostszą formą matematyczną tej myśli są równania:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= \bar{v}_x + v'_x \\ v_y &= \bar{v}_y + v'_y \\ v_z &= \bar{v}_z + v'_z \\ p &= \bar{p} + p' \end{aligned} \right\} \quad \dots \quad (8)$$

w których $\bar{v}_x$, $\bar{v}_y$, $\bar{v}_z$ i $\bar{p}$ oznaczają składowe prędkości względnie ciśnienia ruchu głównego a v'_x , v'_y , v'_z i p' także składowe ruchu pobocznego.

Jednakowoż, na tej podstawie zbudowane równania różniczkowe, pozostały tylko formą matematyczną, której się nie udało scałkować nawet w najprostszych przypadkach a tem samem nie można sprawdzić ich zgodności z doświadczeniami.

W Polsce zajął się, matematycznym opisaniem ruchu burzliwego M. Broszko⁶⁾ 16), rozpoczynając pracę od najprostszych przypadków, przyczem wyniki jego badań pokrywają się naogół z dotychczasowymi

⁶⁾ A. T. Troskoleński: „Hydromechanika“, Lwów 1925.

¹⁶⁾ A. T. Troskoleński: „Najnowsze prądy w hydromechanice“, Lwów 1923.

wynikami badań nad rozkładem prędkości w rzekach, prowadząc do rozkładu prędkości według paraboli trzeciego stopnia. Pewna rozbieżność zachodzi tylko w najbliższym sąsiedztwie powierzchni swobodnej.

Z powyższego wynika, że dorobek hydromechaniki cieczy rzeczywistych jest nieznaczny, bo obok kryterjum Reynolds'a mamy równania Stokes'a, które tylko w nielicznych przypadkach są zgodne z doświadczeniami, następnie Lorentz'a, o których wyżej mowa i badania Broszki.

Poza tem dorobek ten nie może mieć pretensji do ścisłej i wolnej od niedomagań dyscypliny naukowej ponieważ u podstaw swoich oparty jest o elementarne prawo Newton'a, które jest prawem empirycznym z zasadniczymi uproszczeniami.

Również niewystarcza, nowoczesnemu hydrotechnikowi obecny obszar i wynik badań hydromechaniki, a szczególnie w dziedzinie ruchu wody w łożyskach przyrodzonych, na podstawie którego określamy objętość przepływu.

Ruch ten opisuje hydraulika zapomocą całego szeregu wzorów empirycznych na predkość srednią, opartych o wzór klasyczny (3).

Praktyczną formę, temu wzorowi nadał pierwszy de Chezy, co niektórzy przypisują także Tadin'emu i Eytelwein'owi⁷⁾. Według tego wzoru średnia prędkość przepływu w korytach otwartych wyraża się równaniem

$$v = c \sqrt{R \cdot I} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

w czym $I = \frac{H}{l}$ = spad zwierciadła wody, $R = \frac{A}{U}$ = promień hydrauliczny (A = przekrój, U = obwód zwilżony), wreszcie c = stała. Wzór ten został przekształcony na następujący:

$$v = K.R^\alpha.I^\beta \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

w czym α, β i K są stałymi wyznaczalnymi na podstawie doświadczeń.

Ostatnio dla łożysk przyrodzonych wielkość promienia hydraulicznego R , zastąpiono głębokością średnią $T = \frac{A}{B}$, w czym B = szerokość zwierciadła wody, wówczas:

$$v = K.T^\alpha.I^\beta \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (11)$$

Ponieważ ogólny wzór (3), względnie z niego wypływające wzory (9), (10) i (11) należą do typu funkcji uwikłanych, matematycznie nierozwiązalnych, usiłowało szereg autorów, posługując się dotychczasowymi wynikami hydromechaniki cieczy rzeczywistych (liczbą Reynolds'a) oraz wynikami doświadczeń, ustalić związek funkcjonalny czy to między funkcjami zasadniczymi czy też między temi z jednej, a szorstkością łożyska z drugiej strony.

⁷⁾ M. T. Huber: „Refleksje na temat hydrauliki“. Czas. Techn. 1926.

Obrazowo można tę zależność funkcjonalną dla pierwszego przypadku przedstawić geometrycznie w przestrzeni euklidesowej, w układzie prostokątnym (v, I, T) zapomocą powierzchni powstałej z dwóch krzywych $v = \varphi(I)$ oraz $v = \psi(T)$ ślizgających się jedna po drugiej, pod kątem prostym. Wówczas dla danego v musiałoby być $\varphi(I) = \psi(T)$, gdzie jednak sam kształt tych krzywych jest nie znany i matematycznie nie wyznaczalny.

I tak: W. Soldan⁸⁾ podaje przekształcenie i związek matematyczny dla przewodów zamkniętych, zapomocą liczby Reynolds'a, między wykładnikami potęgowymi równań (9) i (10) przyczem współczynnik stały c został również przekształcony na wartość

$$c = K \left(\frac{v \cdot l}{\mu} \right)^m \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

Ta wartość podstawiona w równaniu (9) daje szczegółowy kształt

$$v = K^{\frac{1}{1-m}} \cdot R^{\frac{0,5+m}{1-m}} \cdot I^{\frac{0,5}{1-m}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (14)$$

równania (10), przyczem między wykładnikami poszczególnych członów istnieje związek matematyczny. Wyrugowawszy z równań

$$\alpha = \frac{0,5 + m}{1 - m} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (14)$$

i

$$\beta = \frac{0,5}{1 - m} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (15)$$

wartość m otrzymujemy związek między wykładnikami członów głównych równania (10), mianowicie:

$$\beta = \frac{1 + \alpha}{3} \quad \text{oraz} \quad \alpha = 3\beta - 1, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (16)$$

z którego wynika wzajemna zależność funkcjonalna wykładników obydwóch głównych czynników R i I tak wzoru klasycznego (9) jak i pochodnego (10), o rozbudowie którego będzie później mowa.

Również Welikanow⁹⁾ z wyników doświadczeń pulsacji wód płynących dochodzi do wniosku, że wartość współczynnika burzliwości Navier-Stokes'a jest wprost proporcjonalną do liczby Reynolds'a. Jeżeli bowiem szorstkość łożyska wpływa na burzliwość prądu, to liczba wyrażająca tę szorstkość musi stać w stosunku funkcjonalnym do liczby Reynolds'a.

Z myślami przewodnimi Soldan'a i Welikanowa zbiegają się poniekąd także wyniki badań Augusta Wellnera¹⁰⁾, który wyjaśnia

⁸⁾ W. Soldan: „Über Geschwindigkeitsformeln“. III-cia Hydr. Konferencja Państw Bałtyckich 1930.

⁹⁾ Journal of the Scientific Institute of Amelioration Nr. XIX, 1929. Bulletin de l'Institut Hydrologique Nr. 23, Leningrad.

¹⁰⁾ A. Wellner: „Über Rauhezkeitsziffern“. III-cia Hydr. Konferencja Państw Bałtyckich 1930.

stosunek wartości charakteryzujących szorstkość łożysk c wzoru de Chezy'ego, n wzoru Ganguillet-Kutter'a oraz k wzoru Stricklera — do liczby Reynolds'a.

Oprócz wymienionych zajmowali się tem zagadnieniem także Eidoux, Flamant, von Mises, Pöschl i Parry, których prace oparte są o teoretyczną spójność kryterjum Reynolds'a od szorstkości łożyska.

Z tego powodu nasuwa się tu pewna doniosła uwaga mianowicie: Wyniki badań Reynolds'a, ujęte w kryterjum przedstawiające geometryczne podobieństwo przebiegów linii prądów czyli pól hydrodynamicznych uwarunkowanych mechanicznym podobieństwem układów sił¹¹⁾ — należą nietylko do ważnych momentów rozwoju hydrodynamiki cieczy rzeczywistych lecz także do takich momentów rozwoju hydrauliki tembardziej, że prace i poglądy Reynolds'a na istotę przebiegów burzliwych zapoczątkowały cały szereg badań doświadczalnych mających podstawowe znaczenie dla hydrauliki.

Z postępem rozwoju instrumentów mierniczych a szczególnie hydrometrów rozwijała się także hydraulika, otrzymując coraz obfitszy i dokładniejszy materiał pomiarowy. Szczególnie znaczny postęp należy zaznaczyć w rozbudowie formuł empirycznych opisujących średnią prędkość przepływu.

Dla łożysk przyrodzonych, można tu zanotować trzy grupy badaczy. Pierwszą, która uwzględnia współczynnik szorstkości, dobierany w obliczeniach doświadczalnie, drugą w której nowsi autorowie usiłują zbudować wzory niezawierające dowolnie dobieralnych współczynników. Formułom tym jednak brak ciągłości. Wreszcie trzecią grupę najnowszych autorów, która zasadniczo przyjmuje ciągłość formuły.

W ostatnich czasach występuje wśród hydrologów tendencja porzucenia ciągłości formuły i szukania nowej drogi rozwiązania szczególnie dla większych spadów, a to z powodów następujących.

Wyniki pomiarów hydrometrycznych wykazały, że dla większych spadów, od 10‰ w górę, punkty funkcji spadu w zależności od samego spadu (podobnie jak na rys. 2a) są bardzo rozrzucone i leżą na powierzchni płaskiej, której średnia wartość linearna nie da się wyznaczyć. Z tego jednak powodu nie wynika, że prawa ruchu wody przy spadzie wyżej 10‰ miałyby ulec zmianom nie dającym się przewidzieć lecz dzieje się to z tej prostej przyczyny, że w łożyskach przyrodzonych przy znacznie większych spadach, prowadzących rumowisko jest wyjątkowo rzadkim odcinek z ruchem jednostajnym. Z reguły jest to ruch zmienny, na szypotach przyspieszony a na głębinach opóźniony,

¹¹⁾ Z. Fuchs: „Kilka uwag do dynamiki cieczy“. Czas. Techn. 1927.

ponadto istnieją tu przejścia odskokiem z ruchu podkrytycznego w nadkrytyczny.

Zmierzony zatem spad zwierciadła wody nie ma nic wspólnego ze zmierzoną średnią prędkością wody. Gdyby można było zmierzyć spad linii energii, okazałoby się niewątpliwie ściśle prawo zależności spadów od kwadratu prędkości. Wobec nierównomiernego rozłożenia prędkości w przekroju, zmierzenie spadów linii energii także jest niemożliwe¹²⁾).

Przejście bowiem z wielkiej prędkości na małą, z niskiego poziomu na wysoki, a zatem z małej głębokości na wielką jest zarazem przejściem z jednej formy ruchu w drugą a mianowicie z ruchu podkrytycznego w nadkrytyczny. Podstawą tego rozumowania są: a) prawo zachowania energii t. j. prawo Bernouilli'ego, oraz b) prawo zachowania linearnej ilości ruchu, które ustala, iż w systemie cząsteczek uważanych jako jedną całość, ilość ruchu nie może się zmienić wskutek samego tylko przeniesienia się jednych cząsteczek ponad drugie, lecz że zmiana w ilości ruchu może nastąpić jedynie wskutek działania siły zewnętrznej. Prawo to zatem wymaga odwrotnie, aby w jednostce czasu siła była równą zmianie w ilości ruchu w tym czasie, czyli, aby się równała masie mnożonej przez przyspieszenie. Główna charakterystyka obydwóch ruchów występuje w prędkości, mianowicie: prędkości przy stanach niższych jak krytyczne są większe niż prędkości przenoszenia się fali, zaś powyżej głębokości krytycznej są od niej mniejsze¹³⁾).

Rozumowanie to o ruchu nierównomiernym, jest ważnym do pewnej granicy głębokości średniej T , którą możnaby określić stosunkiem powierzchni pasa obwodu zwilżonego, wywołującego ruch burzliwy, do całej powierzchni przekroju. Jeżeli ten stosunek jest równy lub mniejszy od takiego stosunku dla spadów mniejszych jak 10‰ , to w takim razie warunki ogólnego przepływu i zależności funkcji spadów od samego spadów pozostają niezmiennic, to jest takie same jak dla małych spadów. Warunki takie mogą zaistnieć przy nabrzmiałych rzekach górskich.

Rozwój formuł empirycznych na średnią prędkość wody (których jest około 450 a omówione będą tylko z nich, używane w Polsce) — w pierwszej grupie badaczy zaznaczył się tem, że wielkość c z klasycznego wzoru (9) początkowo uważana przez Eytelwein'a i Dupuit'a za stałą o wartości 50,93, okazała się zmienną i zależną od zasadniczych czynników I , T względnie R (wzór 3 b).

¹²⁾ K. Pomianowski: „O ruchu burzliwym podkrytycznym“. Przegląd Techniczny 1922.

¹³⁾ K. Pomianowski: „O ruchu podkrytycznym i zniszczeniu energii na odskoku Bidone'a“. Pamiętnik I-go Zjazdu Hydrotechnicznego.

Ganguillet i Kutter znaleźli na podstawie doświadczeń:

$$c = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0,00155}{I}}{1 + \left(23 + \frac{0,00155}{I}\right) \frac{n}{\sqrt{R}}} \quad (17)$$

Jeżeli wielkość stałą we wzorze (17) nazwiemy

$$p = 23 + \frac{0,00155}{I}$$

to wówczas
$$n = \frac{\sqrt{R}}{cp} \left[\left(\frac{p-c}{2} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{c-p}{2} \right)^2 + \frac{cp}{\sqrt{R}}} \right] \quad (18)$$

a jeżeli oznaczmy
$$a = 23 + \frac{1}{n} + \frac{0,00155}{I}$$

$$b = \left(23 + \frac{0,00155}{I} \right) n$$

to
$$c = \frac{a}{1 + \frac{b}{\sqrt{R}}} = \frac{a\sqrt{R}}{b + \sqrt{R}}.$$

Tym sposobem powstał mały wzór Kutter'a, dla którego

$$c = \frac{100\sqrt{R}}{m + \sqrt{R}} \quad (19)$$

Ponieważ wpływ spadku I ponad $0,2\text{‰}$ jest mniejszy jak prawdopodobne błędy wzoru, uprościł Frank wzór (17) do kształtu

$$c = \frac{(23+1)\sqrt{R}}{(23n + \sqrt{R})^n} \quad (20)$$

Do tych klasycznych kształtów formuł można zaliczyć jeszcze formuły Bazin'a, starą (Darcy-Bazin)

$$c = \frac{1}{\sqrt{a + \frac{b}{R}}} \quad (21)$$

i nową

$$c = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}} \quad (22)$$

a przez porównanie z formułą Kutter'a otrzymano:

$$\gamma = 0,87m - 0,13\sqrt{R} \quad (23)$$

Krytykę tych formuł ogłosili Biegeleisen i Bukowski (Gesundheitsing 1914), Rümlein (Wie bewegt sich fließendes Wasser?, Drezno 1913), Lueger i Brinkhaus (Hnbch der Ingwiss.), Möller

(Grundriss des Wasserbaues), Gravelius (Z. f. Gewässerkunde Bd. I) i wielu innych jak Schoklitsch, Rühlmann, Bindemann i t. d.

Krytyka ta głównie tanguje dowolnie dobieralne (zależnie od intuicji i czucia hydraulicznego rachującego temi formułami inżyniera) współczynniki szorstkości koryta, którą to dobieralność nie ujęto do-tychczas żadnem odpowiedniem wyrażeniem matematycznym. Na obli-czenie tych współczynników (zależnych od spadu I) wpływa w wysokim stopniu błąd popełniony przy pomiarze tego spadu. Jeżeli ten na długości np. 100 m wynosi a m to zamiast prawdziwej wielkości współczynnika

$$c = v : \sqrt{R \cdot I}$$

otrzymujemy błędną wartość

$$c = v : \sqrt{R \left(I + \frac{a}{100} \right)}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (24)$$

nie licząc błędów z powodu nieumiętnego dobrania wartości n , γ i t. d.

Wartość błędu z formuły (24) jest odwrotnie proporcjonalną do wartości prędkości średniej v . Jeżeli bowiem pomierzono za wielki spad to otrzymana prędkość średnia będzie mniejszą od rzeczywistej i odwrotnie.

Również przeciw użyciu, we formułach dla łożysk przyrodzonych, promienia hydraulicznego $R = A : U$ podniesiono zarzuty, ponieważ wartość tego promienia w dwóch różniących się wymiarami, przekrojach matematycznie niewyrażalnych może być jednaka, przeto wartość promienia hydraulicznego nie charakteryzuje dostatecznie przekroju¹⁴⁾.

Powierzchnię pola dowolności doboru współczynnika szorstkości dla stałej wartości promienia hydraulicznego przedstawiono graficznie (rys. 1), z którego wynika, że do każdej wartości spadu I można dobrać w pewnych granicach (np. prof. Matakiewicz określa wartość tę wzorem empirycznym $n = 0,0235 + 0,0019 I^{0,000}$)⁴⁾ dowolną wartość współczynnika n a tem samem średnia prędkość w przekroju dla stałego spadu nie będzie jednoznacznie określona. Występują tu znaczne różnice zależne od wielkości spadu. To samo tyczy drugiej niezależnej t. j. promienia hydraulicznego.

Druga grupa badaczy nowszych usiłuje opisać średnią prędkość przekroju w łożyskach przyrodzonych jednoznacznie t. j. unikając wy-żej podanych nieścisłości.

W tym celu promień hydrauliczny R zastępują inną wielkością bardziej charakteryzującą przekrój łożyska przyrodzonego, mianowicie głębokością średnią T a niektórzy także szerokością zwierciadła wody B wreszcie eliminują zupełnie nieokreślony współczynnik szorstkości.

¹⁴⁾ R. Weyrauch: „Hydraulisches Rechnen“. Stuttgart 1921.

Do tych badaczy należą głównie Siedek, Hermanek, Prof. Matakiewicz (pierwszy wzór), Christen, Lindboe i Gröger.

Formuły Siedeka nie są wprawdzie wygodnymi w użyciu lecz ważnymi ze względu na to, że zapoczątkowały cały szereg nowszych badań i spowodowały zmianę zapatrywań w kierunku dążności opisanie średniej prędkości w sposób jednoznaczny, eliminując dobiegalność współczynnika szorstkości,

Wzory te ze względu na ich kształt są w praktyce rzadko używane. Christen określa średnią prędkość w łożyskach rzecznych wzorem.

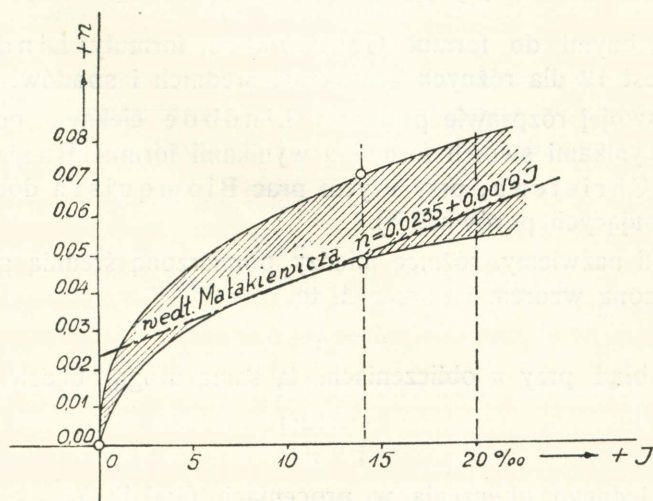
$$v = m \sqrt{T \cdot I} \sqrt[8]{B/2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (25)$$

a dla potoków prowadzących żwiry i rumowisko

$$m = \frac{6,31}{\sqrt[6]{T \cdot I}}$$

czyli

$$v = 6,31 \sqrt[3]{T \cdot I} \sqrt[8]{0,5 B} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (26)$$



Rys. 1.

Według Hermanka średnią prędkość obliczyć należy wzorem:

$$v = K \sqrt{T I} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (27)$$

w czem dla łożysk przyrodzonych

$$\left. \begin{array}{l} \text{dla } T < 1,5 \text{ m} \quad - \quad K = 30,7 \sqrt{T} \\ 1,5 < T < 6,0 \text{ m} \quad - \quad K = 34 \sqrt[4]{T} \\ T > 6,0 \text{ m} \quad - \quad K = 50,2 + 0,5 T \end{array} \right\} \quad . \quad . \quad (27a)$$

Jest to pierwszy wzór eliminujący szerokość zwierciadła wody B .

Prof. Matakiewicz w pierwszym swoim wzorze⁴⁾ przyjmuje zasadniczą formę

$$v = \alpha \cdot I^m T^n$$

i określa z doświadczeń wykładniki

$$\left. \begin{array}{l} \text{dla } I < 2^0_{00} \quad - \quad m = 0,50 \\ I = \text{do } 2,5^0_{00} \quad - \quad m = 0,51 \\ I = \text{do } 3,5^0_{00} \quad - \quad m = 0,52 \\ I = \text{do } 4,5^0_{00} \quad - \quad m = 0,53 \end{array} \right\} \quad . \quad . \quad . \quad (28)$$

wreszcie

$$\left. \begin{array}{l} \text{dla } T < 1 \text{ m} \quad - \quad n = 1 - T \\ T > 1 \text{ m} \quad - \quad n = 0,75 \end{array} \right\} \quad . \quad . \quad . \quad (28a)$$

Gröger na podstawie pomiarów wykonanych w dorzeczu Dunaju ustawił następujące formuły, ważne jednak w szczupłych granicach, mianowicie:

$$\begin{array}{l} \text{Jeżeli} \quad B_{\min} = 10 \text{ m}, \quad T = F : B, \quad I_{\max} = 0,005 \\ \text{to wówczas dla } 0,2 < T < 2,0 \text{ m} \quad - \quad v = 23,781 T^{0,776} \cdot I^{0,458} \\ \quad \quad \quad T > 2,0 \text{ m} \quad - \quad v = 22,11 T^{0,58} \cdot I^{0,43} \end{array} \quad \left. \right\} \quad . \quad . \quad (29)$$

Podobnymi do formuł Gröger'a są formuły Lindboe'go, których jest 12 dla różnych głębokości średnich i spadów.

W swojej rozprawie przytacza Lindboe ciekawe porównanie między wynikami swoich formuł a wynikami formuł Bazin'a, Siedek'a i Christen'a, przy użyciu prac Blomquist'a dochodzi on do następujących porównań¹⁴⁾.

Jeżeli nazwiemy, różnicę między pomierzoną średnią prędkością v a obliczoną wzorem v_1 przez Δ , to

$$\Delta = v_1 - v$$

a średni błąd przy n obliczeniach, tą samą drogą, będzie wówczas równy

$$\sqrt{\frac{\Sigma[\Delta^2]}{n}}$$

czyli dla jednego obliczenia w procentach $(100 \Delta : v) \%$, otrzymamy procentowy błąd dla n obliczeń

$$\frac{\Sigma \left[\frac{100 \Delta}{v} \right]}{n} \%$$

Stosując to rozumowanie obliczył Lindboe sumy dodatnich i ujemnych błędów formuł Bazin'a, Siedek'a, Christen'a i swoich, dochodząc do wniosku, że wartość $\gamma = 1,30$ używana przy obliczeniach formułą Bazin'a jest za małą, ponieważ różnica między sumą błędów dodatnich a sumą błędów ujemnych jest znaczną, wynosi bowiem 25,33 przy

$$\Sigma(+\Delta) = 28,05 \quad \text{i} \quad \Sigma(-\Delta) = 2,72.$$

Podobnie wykazuje formuła Christen'a dla łóżysk rzecznych
 $\Sigma(+\Delta) = 45,82$ i $\Sigma(-\Delta) = 36,81$.

Najkorzystniejsze wyniki otrzymał Lindboe przy swoich i Siedek'a formułach. Odnośnie zatem do najmniejszego błędu średniego w stosunku do wyników pomiarów hydrometrycznych dochodzi on do następującego uszeregowania formuł pod względem najmniejszości błędu: 1. Lindboe, 2. Siedek, 3. Bazin a 4. Christen.

Kryterjum użyte przez Lindboe'go do oceny dobroci wyników formuł, nie uwzględnia jednak wagi spostrzeżeń, przyczem należy tu zauważyć, że ze zbioru dowolnej ilości wyników pomiarów hydrometrycznych (choćby ze wszystkich dotychczas wykonanych), można zawsze wybrać taki szereg, który dla danej formuły empirycznej, w porównaniu z wynikami pomiarowymi tego szeregu da — w pewnych granicach — najmniejszość błędu. Nie trzeba przytem także zapominać, że pomiary hydrometryczne odbywają się często w warunkach niekorzystnych, oraz przy pomocy przyrządów mierniczych, których wskazania nie zawsze budzą zaufanie.

Wszystkim dotychczas omówionym formułom brak ciągłości.

Pierwszą ciągłą formułę na średnią prędkość w łóżyskach przyrodzonych zbudował Prof. Matakiewicz w r. 1910⁴⁾.

Formuła ta

$$v = \frac{116 \cdot I^{0,493+10 I}}{2,2 + T^{\frac{2}{3} + \frac{0,15}{T^2}}} \cdot T \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (30)$$

nazwana przez jej autora „drugą“, jest wprawdzie niewygodną w praktycznem użyciu, jednak liczenie nią ułatwiają tabele.

Dla bardzo małych głębokości średnich np. żłobów górskich wystarczy według prof. Matakiewicza zamiast formuły (30) użyć wyrażenia skróconego

$$v = 52,7 T \cdot I^{0,493+10 I} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (30 a)$$

Wzór ten został w r. 1925 zmodyfikowany na „trzeci wzór“ kształtu

$$v = 35,4 I^{0,493+10 I} T^{0,7} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (31)$$

używany w praktyce przez hydrotektów polskich⁵⁾.

Praktyczny ciągły wzór — do podręcznego użycia bez pomocy logarytmów i tablic — ogłosił w roku 1926 autor¹⁵⁾.

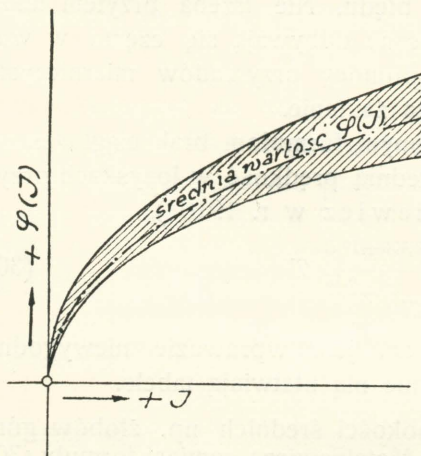
Wzór ten o prostym kształcie

$$v = (4 T - 12 + \sqrt{144 + 1667 T}) \sqrt{I} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (32)$$

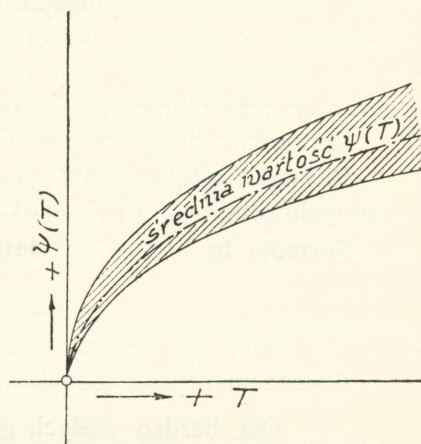
pomimo, że oparto go o wielką ilość zbiorów dotychczasowych doświadczeń, nie ma pretensji do ścisłości. Wyniki tego wzoru są jednak w szerokich granicach zgodne z wynikami pomiarów hydrometrycznych.

¹⁵⁾ A. Pareński: „Zur Berechnung der mittleren Quergeschwindigkeit in natürlichen Flussbetten“. Der Bauing 1926.

Wzory (30), (31) i (32) aczkolwiek uwzględniają ciągłość funkcji spadku i głębokości średniej nie są jeszcze doskonałymi. Zbudowano je na założeniu ruchu równomiernego, gdy tymczasem w rzeczywistości ruch taki w łóżyskach przyrodzonych nie istnieje a to wskutek ciągłych zmian przekroju i spadku, zmian po sobie następujących. Oprócz tego szorstkość dna i ścian łóżysk, nawet o tym samym spadzie, jest rozmaita zależnie od charakteru rzeki. Na prędkość sekundową wody wpływa także strata części siły żywej, płynącej wody, zużytej na poruszanie żwiru i rumowiska. Stratę tę także trudno pomierzyć a następnie opisać analizą matematyczną. Następna trudność opisanie prędkości średniej w łóżyskach przyrodzonych polega na tem, że opory ruchu wody wywołane szorstkością łóżyska, przy bardzo niskich stanach — nawet przy ruchach klasycznie równomiernych — są zu-



Rys. 2 a.



Rys. 2 b.

pełnie różne od takich oporów przy wyższych wodostanach a wartość stosunku wielkości powierzchni pasa przyściennego wywołującego swą szorstkością ruch burzliwy, do wielkości powierzchni całego przekroju jest dla różnych wodostanów, różną (odwrotnie proporcjonalną do wysokości stanu wody).

Te i tem podobne trudności są przyczyną dlaczego nie tylko hydromechanika ale i nauka czysto empiryczna, jaką jest hydraulika nie dała dotychczas zadowalniającej odpowiedzi na postawione jej przez praktykę inżynierską pytanie: Jak opisać ruch wody w łóżyskach przyrodzonych uwzględniając prawa jakim ruch ten podlega?

Ostatnie formuły (30) do (32) zbudowane na wartościach średnich (rys. 2 a i 2 b) szeregu wybranych spostrzeżeń hydrometrycznych, prędkości średniej a więc wielkości czysto matematycznej, są wzorami

interpolacyjnymi. Dają one w wyniku wartości jednoznaczne zależne od dwóch głównych czynników t. j. spadu I i głębokości średniej T .

Z powyższego przedstawienia sprawy wynika, że ujęcie i odtworzenie przepływów w łożyskach przyrodzonych, których kontur jest matematycznie niewyraźnym, możliwym jest dotychczas tylko w grubym przybliżeniu, metodami tylko empirycznymi. W praktyce używanie tych empirycznych wzorów a szczególnie wzorów ze stałym współczynnikiem prowadzi do wyników nie zawsze ścisłych i jest dopuszczalne tylko przy wstępnych przybliżonych obliczeniach.

Na zakończenie nasuwa się pytanie: Czy kiedykolwiek będzie możliwe opisywanie drogą teoretyczną przepływów o charakterze burzliwym w szorstkich łożyskach przyrodzonych o matematycznie niewyraźnym przekroju poprzecznym?

Na to pytanie szereg badaczy hydrotektów odpowiedziało przecząco, zaś hydromechanicy nie tracą w tym kierunku nadziei czego przykładem jest odpowiedź Troskolańskiego^{6), 16)}.

„Jasne jest, że dokładne odtworzenie przepływów w łożyskach o nieprawidłowych a więc matematycznie niewyraźnych, geometrycznych kształtach jest nieosiągalne, albowiem nie można nawet myśleć o ścisłym analitycznym ujęciu takich zjawisk, w których obok niezmiennych praw przyrodniczych grają rolę czynniki, wyłamujące się z pod wszelkiej prawidłowości. Możemy jednak z dokładnością dość znaczną opisać te zjawiska, zastępując nieprawidłowy kontur przekroju poprzecznego, zbliżonym do niego konturem o matematycznie wyraźnym kształcie; ponieważ błędy stąd płynące są zawsze jednokierunkowe, bo spowodowane niedocenieniem strat energetycznych, przeto wprowadzając odpowiednie poprawki, możemy opisać powyższe zjawiska z dokładnością bez porównania większą, niż ta, jaką dają nam formuły empiryczne“.



BIBLIOTEKA
GŁÓWNA



AKADEMII
GÓRNICZO
HUTNICZEJ

11 35683

Nie

wypożycza się

NZB

9309