

Rozkład przepływów w gładkich korytach o przekrojach dwudzielnych

Abstract

The discharge distribution in the smooth channels with the compound cross-section. The hydraulic characteristics of flow in smooth compound channel of a deep main channel and two flood-plains, were investigated in laboratory. The main channel to flood-plain depth ratio was varied, while maintaining constant bed slope. The effect of the interaction phenomenon on the discharge capacity was estimated by comparing the measured discharge under interacting conditions with computed using different methods.

The accuracies of different methods of discharge calculation were shown to be dependent upon the assumptions they make regarding the magnitude of the apparent shear stress on the particular interface chosen. Generally it was found that a discharge calculation in smooth compound channel using diagonal interfaces without apparent shear stress is possible.

Key words: smooth compound channel, discharge calculation, measured discharge

Wprowadzenie

Zdolność przepustową rzek i innych koryt ocenia się dla celów praktycznych wg formuł:

Chezy'ego, Manninga

$$V = cR^{1/2} J^{1/2} \quad (1)$$

$$c = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (2)$$

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \quad (3)$$

Darcy'ego-Weisbacha

$$V = \left[\frac{1}{\lambda} 8 g R J \right]^{1/2} \quad (4)$$

oraz Colebrooke'a-White'a

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda}} = -2,031 g \left[\frac{2,51}{RE \sqrt{\lambda}} + \frac{k_s/d}{3,71} \right] \quad (5)$$

$$Q = F V \quad (6)$$

c , n , k_s i λ wyznaczone z pomiarów lub z innych danych doświadczalnych.

Równanie przejścia:

$$c = \left[\frac{1}{\lambda} 8 g \right]^{1/2} \quad (7)$$

*Katedra Budownictwa Wodnego SGGW, ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa.

Uzyskane z badań laboratoryjnych wartości prędkości i natężenia przepływu w korytach o takich samych parametrach R, J, F oraz c, n lub λ są różne dla różnych kształtów przekrojów. Różnice ich formy można wówczas uwzględnić, wprowadzając współczynnik kształtu f – wzory (2) i (3) przybierają wówczas postać:

$$c = f \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (2')$$

$$V = f \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \quad (3')$$

W obliczeniach dla celów praktycznych współczynniki f wprowadzane są rzadko, co tłumaczy się tym, że liczba badań tej wielkości jest bardzo mała. Formuły (1) do (7) stosowane są obecnie powszechnie w obliczeniach tzw. koryt zwartych – pod którymi rozumie się najczęściej takie, w których nie występują skokowe zmiany głębokości w przekrojach poprzecznych.

Do obliczeń przekrojów dwudzielnych, występujących nadzwyczaj często w regulacji rzek, współczynników kształtu na ogół nie wprowadza się. Koryta te i warunki przepływu w nich są i były przedmiotem licznych i intensywnych badań. Nie można jednak oczekiwać rychłych i przydatnych inżynierom wyników tych badań, stąd konieczne jest wprowadzenie do praktyki metody orientacyjnego szacowania natężeń przepływów lub położenia zwierciadła wody w przekrojach wielodzielnych. Sposób taki, jak wiadomo, istnieje i polega na:

- podziale przekroju dwudzielnego lub innego złożonego na części, z których

każda ma kształt zwarty; w przekrojach dwudzielnych jest to z reguły ich część głęboka odpowiadająca w naturze właściwemu korytu rzeki i nazywana dalej korytem głównym (K_C) oraz jedna lub dwie części płytkie odpowiadające w naturze zatapianym tarasom i nazywanym dalej terenami lub obszarami zalewowymi (K_F); dalej parametrom odnoszącym się do przepływu w korycie głównym nadać indeks C , zaś do przepływu w terenie zalewowym – indeks F ,

- traktowaniu każdej z wydzielonych części jako zwanego osobnego przekroju, nie współdziałającego hydraulicznie z pozostałymi, i obliczaniu go według podanych uprzednio wzorów; całkowite natężenie przepływu jest wówczas sumą natężeń obliczonych dla poszczególnych sekcji.

Obliczenia kontrolne [Kubrak, Żbikowski 1995; Wormleaton, Allen, Hadjipanos 1982] wykazały, że wyznaczone w ten sposób zdolności przepustowe są jednak wówczas średnio o 15–20% i maksymalnie o 30% większe niż rzeczywiste. Oznacza to, że zwymiarowane według takich założeń koryta przeprowadzi obliczeniowe natężenie przepływu przy większej głębokości wody niż obliczone. Uniknięcie omawianych błędów jest obecnie możliwe tylko wtedy, gdy współczynniki szorstkości c, n lub współczynniki oporów λ wyznacza się na podstawie wyników pomiarów w naturze obejmujących prędkości lub natężenia przepływu, spadki zwierciadła wody i geometrię przekroju koryta. Ocena współczynników c, n lub λ powinna być przy tym przeprowadzona osobno dla tak samo

wydzielonych części całego koryta, jakie będą przyjmowane w późniejszych obliczeniach projektowych. Jest to nie zawsze możliwe, gdyż kształt przekroju projektowego może być inny niż pomierzony, a poza tym prawie nigdy nie udaje się wykonać pomiarów przy rzadko zdarzających się wielkich wodach obliczeniowych. Tak więc, nawet wykorzystanie wyników pomiarów w obliczeniach projektowych nie wyklucza powstania trudnych lub niemożliwych do określenia błędów oceny przepustowości. Jest to jednak obecnie metoda bezspornie najwłaściwsza. Na ogół przyjmuje się, że droga do usunięcia w przyszłości przedstawionych błędów prowadzić powinna przez teorię lub eksperyment do poznania warunków przepływu i na ich podstawie do opracowania poprawnej i wiarygodnej metody oceny zdolności przepustowej interesujących nas tu koryt. Droga przez teorię jest jeszcze nie wybrana, tak że jako jedyna możliwa pozostaje przez eksperymentowanie. Ze względów organizacyjnych i kosztowych liczne i szerokie badania terenowe mogą być prowadzone tylko bardzo rzadko, co powoduje, że poszukiwanie formuł lub metod obliczeniowych następuje obecnie głównie w laboratoriach hydraulicznych.

Dotychczasowy stan badań

Badania hydrauliczne koryt dwudzielnych prowadzono już od początku naszego wieku, początkowo jeszcze rzadko, potem często, szczególnie w ostatnich 3 dekadach. Realizowano je między innymi w Stanach Zjednoczonych, Anglii, Niemczech, Francji. W badaniach tych wy-

znaczano najczęściej prędkości i natężenia przepływu lub naprężenia ścinające w fikcyjnych pionowych płaszczyznach rozdziału złożonego przekroju poprzecznego. Wyniki dość licznych z tych badań omawiał, analizował i porównywał z danymi uzyskanymi z własnych doświadczeń Kubrak i Żbikowski (1995). Analizy wykonywanych dawniej, wyłącznie poza naszymi granicami, badań wykazały, że są to materiały niewątpliwie dużej wartości poznawczej, lecz mało przydatne dla praktyki. W pracach tych nie zajmowano się najczęściej zagadnieniami rozkładu przepływów na koryto główne i tereny zalewowe. Podział ten był już określony przez uzyskiwane z badań zdolności przepustowej każdej z sekcji.

Pod rozkładem przepływu w korytach dwudzielnych rozumie się dalej stosunek Q_F/Q_C natężeń przepływu przypadających na tereny zalewowe (Q_F) i koryto główne (Q_C). Niewiele można znaleźć informacji (z wyjaśnionych poprzednio przyczyn) o określaniu tego stosunku w zależności od różnych parametrów (współczynników oporu lub szorstkości, od spadku zwierciadła wody oraz od geometrii przekroju). Niekiedy informacje te podaje się przy omawianiu badań warunków przepływu (prędkość, zdolności przepustowe, naprężenia ścinające, współczynniki oporu). Podziałowi zdolności przepustowej jako odrębnemu tematowi poświęcone były m.in. prace:

- P. McKee, E.M. Elsayy i E.J. McKeogh (1985), w której stosunek natężeń przepływów:

$$Q_* = \frac{Q_F}{Q_C} = \left(\frac{Q_{F1}}{Q_{C1}} \right) \left(\frac{\Psi_F}{\Psi_C} \right)^{1/2} \quad (8)$$

zależny jest od stosunku Q_{F1}/Q_{C1} przepływów po terenie zalewowym i w korycie głównym w założeniu, że przepływające w obu częściach przekroju strumienie wody nie oddziałują na siebie oraz od stosunku pomierzonych naprężeń ścinających ψ_F/ψ_C w płaszczyźnie rozdziału złożonego przekroju koryta:

$$\psi_F = \frac{\tau_{F1}}{\tau_F} \quad (9)$$

$$\psi_C = \frac{\tau_{C1}}{\tau_C} \quad (10)$$

gdzie:

τ_C – naprężenia ścinające w płaszczyźnie rozdziału koryta głównego i terenu zalewowego przy nieuwzględnieniu przepływu w terenie zalewowym,

τ_F – naprężenia ścinające w płaszczyźnie rozdziału koryta głównego i terenu zalewowego przy nieuwzględnieniu przepływu w korycie głównym,

τ_{C1} – naprężenia ścinające w płaszczyźnie rozdziału koryta głównego i terenu zalewowego przy uwzględnieniu przepływu w terenie zalewowym,

τ_{F1} – naprężenia ścinające w płaszczyźnie rozdziału koryta głównego i terenu zalewowego przy uwzględnieniu przepływu w korycie głównym.

Wzór (8) wyprowadzono przy założeniu stałości spadku energii we wszystkich częściach złożonego przekroju poprzecznego. W laboratorium Katedry Budownictwa Wodnego naprężeń tych nie mierzono, nie było więc możliwości wyko-

rzystania równania (8) do analiz porównawczych.

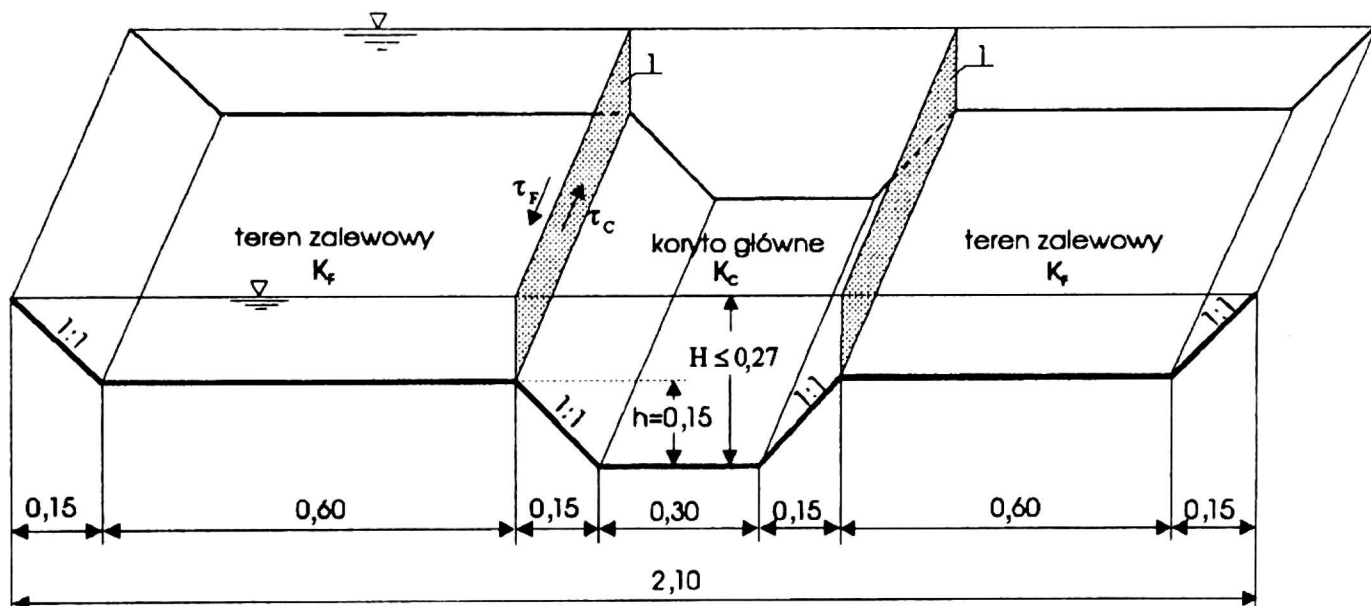
- C. Myersa (1987), których nie można było również wykorzystać, gdyż odnoszą się one tylko do badanych koryt o przekrojach prostokątnych.
- D.W. Knighta i K. Shiono (1990), którą wykorzystano po odpowiednich przekształceniach podanych dalej (patrz rozdział "Analizy").

We wspomnianej już pracy Kubraka i Żbikowskiego (1995) obliczano wg kilku wybranych formuł wartości Q_C i Q_F dla koryta głównego i terenów zalewowych z uwzględnieniem związku hydraulicznego między nimi. Były to formuły: Ackersa (1993), Bairda i Ervina (1984), Nicollela i Uana (1979), Wormleatona, Allena i Hadjipanosa (1982) oraz Wormleatona i Merretta (1990). Wyniki tych obliczeń porównano z wynikami własnych badań laboratoryjnych.

Badania własne

Badania prowadzone były w laboratorium Katedry Budownictwa Wodnego SGGW w okresie od 2.11.1991 do 31.12.1994. Tematem była ocena przydatności istniejących metod analitycznych do określenia przepustowości koryt o przekrojach dwudzielnych niezadrzewionych i zadrzewionych. W jednej z częściowych analiz wyników własnych badań laboratoryjnych oraz uzyskanej (wg istniejących metod) oceny parametrów koryt bez drzew zajmowano się stosunkiem natężeń przepływu na terenach zalewowych i w korycie głównym.

Badania prowadzono w specjalnie wybudowanym dwudzielnym korycie



Rys. 1. Kształt i wymiary przekroju poprzecznego badanego koryta; 1 – przyjęte płaszczyzny rozdziału przekroju koryta

betonowym długości 16,0 m, szerokości 2,4 m i o stałym spadku dna 0,0005 (rys. 1). Pobocznice kanału wykonano z wygładzonego i pomalowanego betonu ($n \approx 0,01 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$). Wodę do modelu doprowadzano z obiegu zamkniętego. Przekrój pomiarowy zlokalizowano na środku długości koryta. Na odpływie z koryta zainstalowano ścianę ażurową oraz iglice do regulowania położenia zwierciadła wody. Wszystkie doświadczenia prowadzono przy przepływach nadkrytycznych i ruchu jednostajnym, tzn. przy zwierciadle wody równoległym do dna koryta. Pomiar głębokości wykonywano wodowskazem szpilkowym, a prędkości przepływu mikromłynkiem w 138 punktach przekroju (maksymalna liczba punktów); zakresem pomiarów objęto głębokości H od 0,16 do 0,27 m.

Na podstawie pomierzonych prędkości wykreślono izotachy, z których obliczano średnie prędkości i natężenia przepływów w 3 częściach przekroju (kanał główny K_C i tereny zalewowe K_F).

Analizy

Celem opisanych badań było wyjaśnienie, jak wyniki przyjmowanego w praktyce inżynierskiej podziału przepływu w korycie dwudzielnym na teren zalewowy i koryto główne odbiegają od rzeczywistości. Za rzeczywistość przyjmuje się przy tym podział złożonego przekroju koryta pionowymi płaszczyznami i dane o przepływach uzyskane z własnych badań laboratoryjnych opisanych w rozdziale "Badania własne".

Wartości przyjmowane za rzeczywiste porównywano z wynikami obliczeń:

- przepływu dla podziału przekroju koryta stosowanego w obliczeniach inżynierskich na 3 części pionowymi płaszczyznami rozdziału poprowadzonymi przez górne krawędzie skarp koryta głównego (rys. 1); porównaniami objęto również wyniki rzadziej, lecz również w praktyce stosowanego takiego samego podziału jak poprzednio, z tym jednak, że obwód zwilżo-

ny kanału głównego zwiększa się o wyprowadzone z górnej krawędzi skarpy koryta głównego pionowe odcinki linii rozdziału (ślady płaszczyzn rozdziału),

- według 5 formuł analizowanych w pracy Kubraka i Żbikowskiego (1995),
- według Knighta i Shiono (1990):

$$\frac{\lambda_F}{\lambda_C} = -0,1065 + 0,8893 \left[(H-h) \frac{1}{H} \right]^{-3,7} \quad (11)$$

po podstawieniu jej do obliczonych ilorazów Q_F/Q_C :

$$\frac{Q_F}{Q_C} = \frac{F_F \sqrt{R_F}}{F_C \sqrt{R_C}} \times \sqrt{\frac{1}{-0,1065 + 0,8893 \left[(H-h) \frac{1}{H} \right]^{-3,7}}} \quad (12)$$

Wszystkie wartości $Q_* = Q_F/Q_C$ obliczono na podstawie formuł (4), (5), (6) oraz wartości rzeczywiste $Q_{*M} = Q_{FM}/Q_{CM}$ (indeks M oznacza tu, że wartości Q_F i Q_C wyznaczono na podstawie wyników pomiarów w laboratorium) zestawiono dla wartości stosunków $(H-h)/H$ w tabeli 1 oraz na rysunku 2. Widoczne jest, że rzeczywiste i obliczeniowe wartości stosunków charakteryzujące podział przepływów w korycie dwudzielnym różnią się od siebie. Różnice te bardziej wyraźnie charakteryzuje rysunek 3, na którym podano wg tabeli 2 odchylenia stosunków $Q_* = Q_F/Q_C$ obliczonych według różnych formuł od war-

tości "rzeczywistych" tych wielkości $Q_{*M} = Q_{FM}/Q_{CM}$. Odchylenia te obliczono z formuły:

$$\Delta Q_* = \frac{Q_* - Q_{*M}}{Q_{*M}} 100\% \quad (13)$$

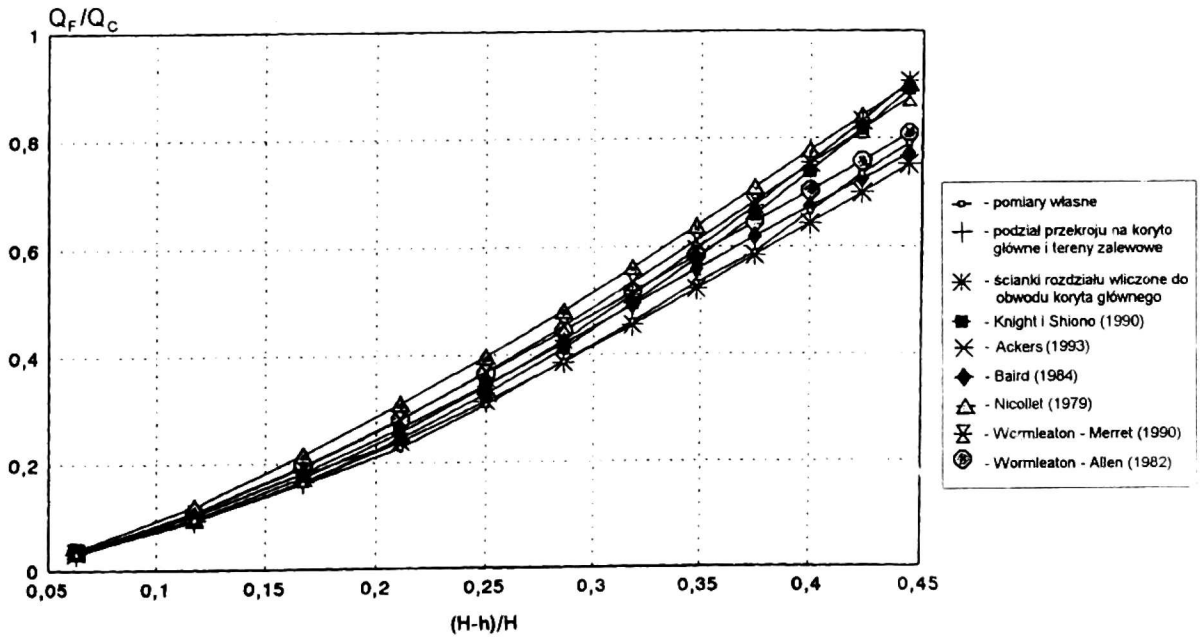
Obliczone na podstawie wyników pomiarów wartości $Q_{*M} = Q_{FM}/Q_{CM}$ podano w kolumnie 2, a w kolumnach 3 i 4 tabeli 1 te same wielkości, lecz obliczone ze wzoru Darcy'ego-Weisbacha w założeniu niezależności przepływów w poszczególnych sekcjach koryta bez włączenia lub z włączeniem do obwodu zwilżonego pionowych odcinków na płaszczyznach rozdziału. W pozostałych kolumnach podano wartości Q_* wg danych z pracy Kubraka i Żbikowskiego (1996) oraz wg Knighta i Shiono (1990).

Zestawione w tabeli 2 i na rysunku 3 wartości ΔQ_* są zróżnicowane. Tłumaczyć to można w ten sposób, że w odchyleniu ΔQ_* zawarte są również błędy pomiarów.

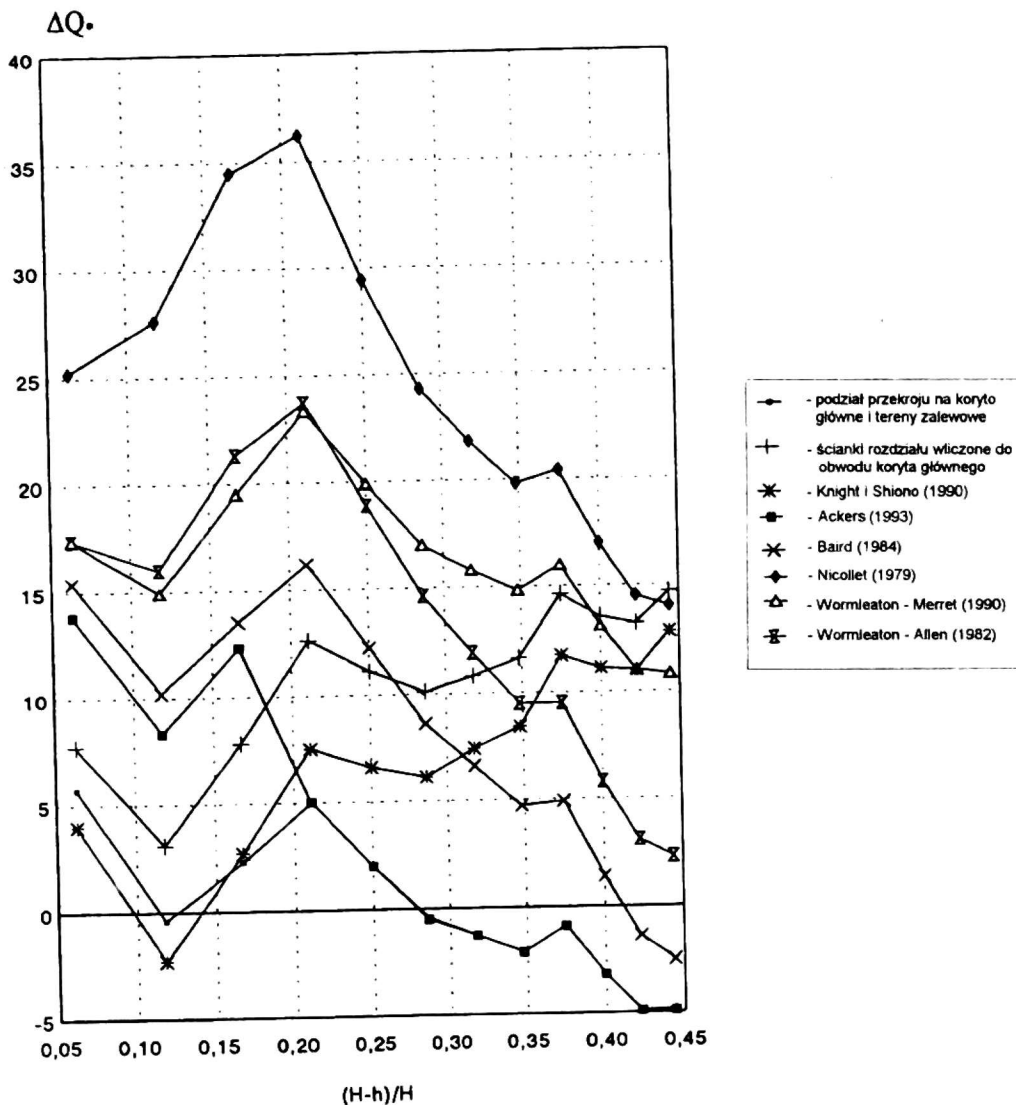
W toku dalszej analizy przeprowadzono ocenę przydatności rozpatrywanych metod szacowania oceny wartości stosunków $Q_* = Q_F/Q_C$. Jako kryterium przydatności przyjęto nieprzekroczenie odchyień dziesięcioprocentowych co najmniej w 80% wyników obliczeń. Kryterium to spełniają: w pierwszym rzędzie podział przepływu w założeniu, że całe koryto składa się z nie oddziaływających na siebie sekcji głębokiej i terenów zalewowych, w drugiej kolejności przyjęcie do wyznaczania natężeń przepływu w poszczególnych sekcjach metody Ackersa i

Tabela 1. Wartości Q_F/Q_C wyznaczone na podstawie pomiarów i obliczeń wg wzorów różnych autorów

$\frac{H-h}{H}$	Pomiary własne	Obliczenia							
		bez włączenia do obwodu zwilżonego odcinków rozdziału	z włączeniem do obwodu zwilżonego odcinków rozdziału	wg Knighta	wg Ackersa	wg Bairde'a	wg Nicoletta	wg Wormleatona-Merreta	wg Wormleatona-Allena
	Q_{*M}	Q_*	Q_*	Q_*	Q_*	Q_*	Q_*	Q_*	Q_*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,063	0,030	0,032	0,032	0,031	0,034	0,034	0,038	0,035	0,035
0,118	0,093	0,093	0,096	0,091	0,101	0,103	0,119	0,107	0,108
0,167	0,161	0,164	0,173	0,165	0,181	0,182	0,216	0,192	0,195
0,211	0,228	0,239	0,256	0,245	0,239	0,265	0,311	0,281	0,282
0,250	0,308	0,314	0,342	0,328	0,314	0,345	0,398	0,369	0,366
0,286	0,388	0,387	0,428	0,412	0,386	0,422	0,482	0,454	0,445
0,318	0,462	0,456	0,512	0,496	0,456	0,493	0,563	0,535	0,517
0,348	0,533	0,522	0,595	0,578	0,522	0,559	0,639	0,612	0,584
0,375	0,590	0,585	0,676	0,659	0,585	0,619	0,710	0,684	0,646
0,400	0,665	0,644	0,755	0,739	0,644	0,674	0,778	0,752	0,704
0,423	0,735	0,699	0,832	0,816	0,699	0,725	0,842	0,816	0,758
0,444	0,791	0,752	0,907	0,892	0,752	0,771	0,902	0,876	0,809



Rys. 2. Wartości Q_F/Q_C wyznaczone na podstawie pomiarów i obliczeń wg wzorów różnych autorów



Rys. 3. Procentowe odchylenia obliczonych stosunków $Q_* = Q_F/Q_C$ od wyznaczonych z pomiarów własnych $Q_{*M} = Q_{FM}/Q_{CM}$

wreszcie na koniec przyjęcie podziału wg Knighta i Shiono (przy dopuszczeniu znikomego nieosiągnięcia progu 80%).

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, że obliczanie podziału przepływu w korytach dwudzielnych na część głęboką i płytsze może być dokonane wg wzoru Darcy'ego-Weisbacha-Prandtla w założeniu, że sekcje koryta podzielonego płaszczyznami pionowymi nie oddziałują na siebie. Wskazano również, jakie od-

chylenia od wyników pomiarów daje obliczenie $Q_* = Q_F/Q_C$ innymi metodami. Wszystkie wnioski ważne są dla koryt gładkich o kształtach i wymiarach zbliżonych do kanału badanego w laboratorium.

Oznaczenia

- c – współczynnik prędkości,
- d – średnica hydrauliczna; $d = 4R$ w korytach otwartych,
- g – przyspieszenie ziemskie,
- H – całkowita głębokość wody w korycie głównym,
- h – głębokość koryta głównego,

Tabela 2. Wartości ΔQ_* wyznaczone na podstawie pomiarów i obliczeń wg wzorów różnych autorów

$\frac{H-h}{H}$	Obliczenia							
	bez włączania do obwodu zwilżonego odcinków rozdziału	z włączeniem do obwodu zwilżonego odcinków rozdziału	wg Knighta	wg Ackersa	wg Bairde'a	wg Nicoletta	wg Wormleatona-Merreta	wg Wormleatona-Allena
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,063	5,7	7,7	4,0	13,8	15,4	25,2	17,4	17,4
0,118	-0,4	3,1	-2,3	8,3	10,2	27,6	14,9	16,0
0,167	2,3	7,8	2,7	12,3	13,5	34,5	19,5	21,3
0,211	5,0	12,6	7,5	5,0	16,2	36,2	23,3	23,7
0,250	2,0	11,1	6,6	2,0	12,2	29,4	19,9	18,9
0,286	-0,4	10,1	6,1	-0,5	8,6	24,3	17,0	14,6
0,318	-1,3	10,8	7,4	-1,3	6,6	21,8	15,8	11,9
0,348	-2,1	11,6	8,4	-2,1	4,7	19,8	14,8	9,5
0,375	-0,9	14,6	11,7	-0,9	4,9	20,4	16,0	9,5
0,400	-3,2	13,5	11,1	-3,2	1,4	17,0	13,1	5,8
0,423	-4,9	13,2	11,0	-4,9	-1,4	14,5	11,0	3,1
0,444	4,8	14,7	12,8	-4,9	-2,5	14,0	10,8	2,3

- k_s – chropowatość bezwzględna,
 n – współczynnik szorstkości,
 Q – natężenie przepływu,
 $Q^* = Q_F/Q_C$ –
 – stosunek przepływu po terenie zalewowym do przepływu w korycie głównym
 ΔQ_* – odchylenie Q_* od wartości obliczonej z wyników pomiarów własnych,
 R – promień hydrauliczny,
 Re – liczba Reynoldsa,
 V – średnia prędkość przepływu,
 λ – współczynnik oporu,
 τ – naprężenie styczne,
 C, F – indeksy oznaczające koryto główne i tereny zalewowe.

Przykładowo Q_C, R_C, V_F i λ_F oznaczają kolejno natężenie przepływu i promień hydrauliczny w korycie głównym oraz prędkość przepływu i współczynnik oporu na terenach zalewowych.

Literatura

- ACKERS P. 1993: *Flow formulae for straight "two-stage" channels*. Journal of Hydraulic Research. Vol. 31. No 4, s. 263–275.
 BAIRD J.I., ERVINE D.A. 1984: *Resistance to flow in channels with overbank floodplain flow*. Proceedings of the 1 st. International Conference on Hydraulic Design in Water Resources Engineering, Southampton U.K., 4/137–4/150.
 KNIGHT D.W., SHIONO K. 1990: *Turbulence measurements in a shear layer region of a*

- compound channel*. Journal of Hydraulic Research. Vol. 28. No 2, s.175–196.
- McKEE P.M., ELSAWY E.M., McKEOGH E.J. 1985: *A study of the hydraulic characteristics of open channels with flood plains*. 21 st. Congress IAHR, Melbourne.
- KUBRAK J., ŻBIKOWSKI A. 1995: *Investigations into the hydraulic characteristics of channels with flood plains*. Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics. No 3–4.
- MYERS W.R.C 1987: *Velocity and discharge in compound channels*. Journal of the Hydraulic Engineering. Vol. 113. No 6, s. 753–765.
- NICOLLET G., UAN M. 1979: *Écoulements permanents á surface libre en lits composés*. La Houille Blanche. No 1–1979, s. 21–30.
- WORMLEATON R., ALLEN J., HADJIPANOS P. 1982: *Discharge assessment in compound channel flow*. Journal of Hydraulic Division. Vol. 108. No HY9, s. 975–993.
- WORMLEATON P.R., MERRETT D., J. 1990: *An improved method of calculation for steady uniform flow in prismatic main channel/flood plain sections*. Journal of Hydraulic Research. Vol. 28. No 2, s. 157–174.