

Kilka uwag o określaniu szorstkości koryt rzecznych

Wprowadzenie

Trafność oceny oporów przepływu lub charakterystyki szorstkości w korytach rzecznych jest jednym z czynników istotnie wpływających na dokładność obliczeń hydraulicznych. Ocena szorstkości może być potrzebna dla:

- istniejących koryt rzek i kanałów tam gdzie możliwe jest przeprowadzenie pomiarów geodezyjnych i charakterystyk geometrycznych i hydraulicznych dla jednego lub kilku stanów wody lub natężeń przepływu,
- nowo projektowanych koryt, w których znane są jedynie niektóre charakterystyki (np. ich przewidywana geometria czy rodzaj gruntu, w którym koryto jest uformowane).

W obu przypadkach cel wyznaczenia charakterystyk szorstkości jest właściwie jeden i ten sam, tj. umożliwienie przeprowadzenia obliczeń hydraulicznych (średnia prędkość, układu zwierciadła wody) w określonych warunkach przepływu, z tym, że:

- w pierwszym przypadku chodzi o przepływy inne niż te, dla których wykonano pomiary oraz wyznaczono charakterystyki szorstkości przez rozwiązanie tzw. zadania odwrotnego,
- w drugim przypadku, nie ma możliwości oparcia się na wynikach pomiarów i współczynniki szorstkości lub oporu wyznaczyć można jedynie z różnych wzorów, tabel, zaleceń itp.

W obu przypadkach jest to prognozowanie współczynników szorstkości (lub innych charakteryzujących opory przepływu) z tym jednak, że w pierwszym prognoza ta jako oparta na obserwacjach i pomiarach jest uważana na ogół za bardziej wiarygodną.

Ocena oporów przepływu na podstawie wyników pomiarów hydrometrycznych i geodezyjnych

Współczynniki szorstkości, prędkości lub oporów mogą być rozpatrywane jako charakterystyki lokalne odnoszące się do wybranego przekroju lub krótkiego odcinka rzeki oraz odcinkowe, które charakteryzują warunki przepływu na dłuższym odcinku rzeki. Najprostszym sposobem obliczenia tych współczynników jest wyznaczenie ich jako tzw. zadania odwrotnego ze wzorów na prędkość, np

wzoru Manninga

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

stąd współczynnik szorstkości

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

lub wzoru Darcy-Weisbacha

$$V = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{8 g \cdot R \cdot I} \quad (3)$$

stąd współczynnik oporu

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{\sqrt{8 g \cdot R \cdot I}}{V} \quad (4)$$

Aby wyznaczyć odpowiedni współczynnik, należy dysponować wynikami pomiarów przekrojów poprzecznych, spadku zwierciadła wody oraz natężenia (lub średniej prędkości) przepływu.

Charakterystyka szorstkości obliczona dla pojedynczego przekroju odzwierciedla lokalne warunki przepływu w przekroju, w którym wykonano pomiary geodezyjne. Dla dłuższego odcinka będzie ona miarodajna wtedy, gdy analiza dotyczy przekrojów położonych na odcinkach, gdzie parametry strumienia odpowiadają warunkom ruchu równomiernego. Współczynniki charakteryzujące szorstkość koryta określone tym sposobem mogą być obarczone znacznymi błędami, które są powodowane:

- błędami niwelacji spadku zwierciadła wody,
- niedokładnością pomiarów przekroju poprzecznego,
- niedokładnością oceny natężenia przepływu lub prędkości średniej.

Błędy oceny charakterystyk szorstkości na podstawie wyników pomiarów geodezyjnych i hydrometrycznych można ograniczyć stosując następujące wskazówki:

1. Spadek lokalny (dla określonego przekroju) powinien być mierzony na odcinkach równych 3–5 szerokości koryta w górę i w dół od przekroju. Jeżeli w korycie występują warunki ruchu równomiernego, odcinki te mogą być dłuższe.

2. Niwelacja zwierciadła wody powinna być wykonywana również w punktach pośrednich pomiędzy skrajnymi: górnym i dolnym, co pozwala wykreślić profil podłużny zwierciadła wody i ustalić wyrównany spadek lokalny.

3. Łata niwelacyjna powinna być ustawiona w miejscach, gdzie falowanie zwierciadła wody jest stłumione, lub powinna być osłonięta specjalną obudową tłumiącą falowanie.

4. Przy pomiarach powtarzalnych w tym samym przekroju niwelacja powinna obejmować ten sam odcinek rzeki i te same punkty pośrednie.

5. Należy dążyć do dużej liczby pomiarów spadku w tym samym przekroju, gdyż zgodnie z zasadą o normalności rozkładu błędów, wraz ze wzrostem liczebności pomiarów maleje obciążenie błędami wartości środkowych i średnich.

Za najwłaściwszą metodę oceny szorstkości dla odcinka rzeki (czyli tzw. liniowych charakterystyk szorstkości) uważa się obliczenia z wykorzystaniem wzoru różnicowego:

$$\Delta Z = \frac{\alpha}{2g} (V_1^2 - V_2^2) + \left(\frac{Q}{A_s} - \frac{n_s}{R_s^{2/3}} \right) \Delta L \quad (5)$$

gdzie:

α – współczynnik Coriolisa,

ΔZ – różnice rzędnych zwierciadła wody na odcinku ΔL ,

V_1, V_2 – średnie prędkości przepływu w przekrojach obliczeniowych,

n_s – średni współczynnik szorstkości,

R_s – średni promień hydrauliczny

A_s – średnia powierzchnia przekroju.

W obliczeniach prowadzonych dla całego odcinka lub jego wybranych fragmentów zakłada się różne współczynniki szorstkości i za poprawne uznaje się te, przy których obliczony układ zwierciadła wody zbliży się do istniejącego. Kryterium prawidłowości obliczeń może stanowić minimum sumy odchyleń rzędnych obliczonych od zaniwelowanych (we wszystkich bądź tylko w wybranych przekrojach).

Ocena szorstkości projektowanych koryt rzecznych

Oceny szorstkości projektowanych lub przeobrażonych w inny sposób koryt często dokonuje się na podstawie różnego rodzaju wskazówek, zaleceń, zdjęć lub tabel. Metoda ta w wielu przypadkach może dać popra-

wne wyniki. Niezbędne do tego jest jednak duże doświadczenie projektanta oraz odpowiednie dane porównawcze z innych rzek.

Bardzo ważne jest także przeanalizowanie warunków morfologicznych, które będą występowały w rozpatrywanym korycie rzeki oraz ich wpływu na kształtowanie oporów przepływu. Opory przepływu w korytach rzecznych kształtowane są przez liczne i różnorodne czynniki, z których zwykle jako najważniejsze wymienia się: tarcie wewnętrzne, tarcie zewnętrzne, zmienność kształtów i wymiarów przekrojów poprzecznych, odspajanie i transport rumowiska rzeczno, lokalne przeszkody utrudniające przepływ wody, roślinność zarastająca koryto, nieregularność i krzywizny układu poziomego. Całkowite opory koryta są sumą oporów cząstkowych, wynikających z oddziaływania wymienionych i innych czynników. Udział poszczególnych składników w oporach całkowitych jest różny w różnych rzekach i na różnych odcinkach danej rzeki i zależy od charakterystycznych znamion poszczególnych rzek lub odcinków.

Zróżnicowanie warunków przepływu sprawia, że opory przepływu w korytach rzek zmieniają się w szerokim przedziale. Przeprowadzone obliczenia współczynników szorstkości w korycie Bzury (odcinek od ujścia Skierniewki do ujścia Słudwi) wykazały, że na odcinku, gdzie trasa składała się z regularnych i łagodnych krzywizn, współczynnik szorstkości $n \approx 0,025-0,028$. Natomiast na odcinku, gdzie trasa składała się z łuków o większej krzywiznie, a przekroje koryta były nieregularne, współczynnik $n = 0,035-0,038$. W korycie Liwy (rejon Kwidzyna) na odcinku uregulowanym (prosty odcinek trasy, regularny trapezowy kształt koryta) współczynnik $n \approx 0,0245$. Na nie uregulowanym odcinku Liwy o znacznie zróżnicowanym układzie poziomym (nieregularne krzywizny o promieniach mniejszych od 5-krotnej szerokości koryta) i przy lokalnie występującej erozji brzegowej, współczynnik $n \approx 0,035-0,038$. Duże zróżnicowanie współczynni-

ków szorstkości stwierdzono również w korycie Gołdapy (odcinek 12 km w górę od Kanału Brożajckiego). W korycie o naturalnym rozwinięciu układu poziomego na odcinkach, gdzie brzegi pozbawione były porostu drzew i krzewów, a lokalnie występowała erozja brzegowa współczynnik $n = 0,030-0,040$, natomiast dla górnej części tego odcinka, gdzie brzegi były gęsto porośnięte drzewami, o bardzo dobrze rozwiniętym i wchodzącym do koryta systemie korzeniowym, współczynnik szorstkości kształtował się w przedziale $n = 0,045-0,060$.

Przedstawione wyżej przykłady wskazują, że wpływ indywidualnych cech koryt rzecznych na ich szorstkość jest tak duży, iż przy ocenie jej charakterystyk niezbędne jest uwzględnienie zróżnicowania morfologicznego koryt. Wykorzystać w tym celu można procedury, które uwzględniają wpływ różnych czynników i właściwości koryta, mających w rozpatrywanym przypadku wpływ na kształtowanie się oporów przepływu (Cowan 1956; Garbrecht 1961; Morin i Favant 1975).

Najbardziej kompleksowo ujęta jest ocena szorstkości koryta w metodzie Cowana, gdzie współczynnik szorstkości charakteryzujący całkowite opory w korycie rzeki wyrażony został w następującej postaci:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)n_w \quad (6)$$

gdzie:

- n_0 – podstawowa wartość współczynnika szorstkości dla regularnego prostego koryta,
- n_1 – współczynnik ujmujący wpływ nierówności powierzchni przekroju,
- n_2 – współczynnik ujmujący zmiany kształtu i wielkości przekrojów poprzecznych,
- n_3 – współczynnik uwzględniający oddziaływanie lokalnych przeszkód w korycie,
- n_4 – współczynnik uwzględniający wpływ zarostania,

n_w – współczynnik uwzględniający wpływ układu poziomego (krzywizny trasy).

Wartości poszczególnych współczynników cząstkowych do wzoru (6) podano w tabeli 1. Zmieniają się one w stosunkowo szerokich przedziałach w zależności od stanu koryta, jego regularności czy rodzaju materiału dennego. Inaczej będą się więc kształtować w korytach rzek naturalnych, uregulowanych oraz kanałów.

Współczynnik n_0 charakteryzuje szorstkość koryta o gładkich brzegach i dnie oraz przy prostoliniowym układzie w planie. Dla koryt rzek w gruntach rozmywalnych jest to stan hipotetyczny, gdyż praktycznie w każdym przypadku powierzchnie dna i brzegów są w pewnym stopniu nieregularne (np. formy denne na dnie piaszczystym). Szorstkość powierzchni, która jest jednym z głównych czynników wpływają-

cych na całkowitą szorstkość koryta, zależy od wysokości występow znajdujących się na powierzchni obwodu zwilżonego. Przy analizie tego czynnika należy rozróżnić:

- koryta ze stałą (niedeformowalną) powierzchnią obwodu zwilżonego,
- koryta, których powierzchnia obwodu zwilżonego ulega przeobrażaniu (tzw. koryta z ruchomym dnem).

W pierwszym przypadku czynnikiem kształtującym opory są wymiary i kształt ziarn materiału dna i brzegów. W drugim występują czynniki dodatkowe, którymi są przestrzenne formy denne, powstające przy ruchu rumowiska wleczonego, oraz inne nierówności i deformacje dna, powstające prawie zawsze przy przepływie wody nad mobilnym dnem. Cowan dla koryt uformowanych w piaskach zaleca przyjmować $n_0 = 0,020$ (tab. 1).

TABELA 1. Współczynnik szorstkości wg Cowana (1956)

Opis koryta		Wartości współczynników cząstkowych	
Rodzaj materiału	piasek		0,020
	drobny żwir	n_0	0,024
	gruby żwir		0,028
	obrabiane skały		0,025
Stopień nieregularności powierzchni	koryto regularne		n_1
	mała nieregularność	0,005	
	średnia nieregularność	0,010	
	duża nieregularność	0,020	
Zmiany przekroju poprzecznego	przekrój stały	n_2	0,000
	zmiany sporadyczne		0,005
	zmiany częste		0,010–0,015
Wpływ przeszkód lokalnych	brak przeszkód	n_3	0,000
	przeszkody nieliczne		0,010–0,015
	przeszkody znaczne		0,020–0,030
	liczne przeszkody		0,040–0,060
Wpływ zarastania	brak zarastania	n_4	0,000
	porost:		
	niski		0,005–0,010
	średni		0,010–0,025
	wysoki		0,025–0,050
b. wysoki	0,050–0,100		
Stopień zakrzywienia trasy	mały	n_w	1,000
	średni		1,150
	duży		1,300

Wartości współczynnika n_1 charakteryzującego nierówności przekroju poprzecznego, kształtują się, według Cowana, w przedziale 0,00–0,020. Na wielkość współczynnika n_1 mają wpływ zarówno nierówności spowodowane formami dennymi, jak również inne deformacje przekroju spowodowane występowaniem erozji lub akumulacji.

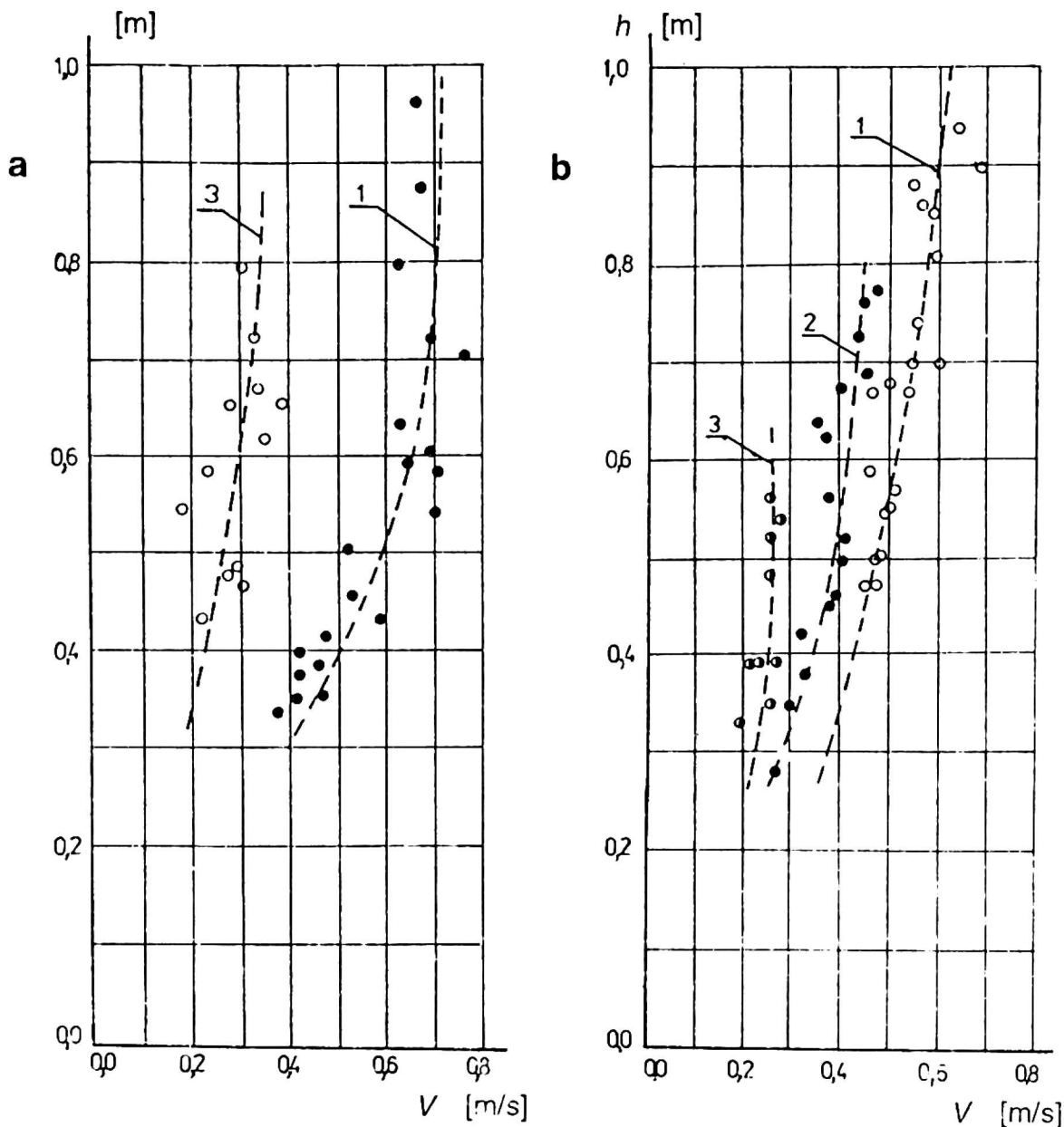
Współczynnik n_2 , uwzględniający wpływ zmian kształtu i wymiarów przekrojów poprzecznych, oraz n_3 , uwzględniający wpływ lokalnych przeszkód są charakterystykami mocno zindywidualizowanymi dla poszczególnych rzek. Podobnie jest ze współczynnikiem n_4 , uwzględniającym wpływ roślinności. O wartości tych współczynników decydują indywidualne cechy rzek, takie jak: zróżnicowanie przekrojów i linii brzegowej koryta, rodzaj i stan roślinności w korycie i na brzegu, wykonywane zabiegi konserwacyjne i eksploatacja rzeki. Szczególnie duży wpływ na współczynniki szorstkości mogą wywierać przeszkody lokalne i roślinność. Według Cowana

lokalne przeszkody mogą spowodować nawet 2–3-krotny wzrost współczynnika szorstkości (tab. 1). Na duży wpływ nieregularności koryta i przeszkód lokalnych wskazuje również Garbrecht (1961). Stopień zmniejszenia współczynnika Stricklera $k_{st} = 1/n$ spowodowany nieregularnościami koryta według Garbrechta przedstawiono w tabeli 2.

Wpływ zarastania na opory przepływu w korycie rzeczonym może być bardzo duży. Wpływ ten zmienia się w czasie, w zależności od rodzaju i fazy rozwoju roślinności oraz napełnień koryta. Cowan podaje, że cząstkowy współczynnik n_4 może przyjmować wartości $n_4 = 0,00–0,10$. O dużym oddziaływaniu roślinności na opory przepływu świadczą pomiary wykonane w korytach rzek Liwa i Gołdapa. Przedstawione na rysunku związku prędkości i napełnienia koryta dla przekroju czystego i z zarastaniem wskazują, że pojawienie się zarastania powoduje zmniejszenie średniej prędkości przepływu (przy tych samych głębokościach) nawet o 50% (okres VII–VIII).

TABELA 2. Zmniejszenie współczynnika prędkości wskutek nieregularności koryta (Garbrecht 1961)

Współczynnik zmniejszający	Stan koryta
1,0	koryta o regularności odpowiadającej rurociągowi
0,96	koryta doświadczalne, koryta betonowe
0,92	koryta kanałów czysto wykutych w skałach, koryta kanałów i uregulowanych rzek w doskonałych stanach w piaskach lub żwirach
0,88	dno i brzegi w regularnym stanie, wyrównane koparką (likwidacja większych nierówności)
0,80	koryta zazwyczaj wykonywane przez koparkę; kształty regularne, bez wygładzania powierzchni
0,76	kamieniste nieregularne brzegi
0,72–0,68	koryta o nieregularnych przekrojach, wykonane koparką
0,64	kanały w złym stanie
0,60	kanały z odkładami i częściowo zsuniętymi brzegami
0,56	przekrój teoretyczny tylko w przybliżeniu, duże nieregularności



RYSUNEK Zależność prędkości od głębokości średniej: a – w korycie Liwy, b – w korycie Gołdapy; 1 – bez zarastania, 2 – koryto z roślinnością (VI i IX), 3 – koryto z roślinnością (VII, VIII)

Przy nie zmienionym spadku zwierciadła wody oznacza to takie same zmniejszenie współczynników prędkości.

Czynnikiem, który wywiera istotny wpływ na wielkość oporów przepływu jest również układ poziomy koryta. Cowan ocenia, że krzywizny mogą spowodować wzrost oporów przepływu nawet o 30%. W technicznej regulacji rzek, gdzie stosowano regularne i łagodne krzywizny trasy, a kąty wewnętrzne łuków kształtowały się najczęściej w przedziale $60^\circ < \alpha < 90^\circ$, wzrost oporów był stosunkowo niewielki i często był pomijany. Przy ocenie szorstkości ko-

ryt naturalnych lub w regulacji naturalnej, gdzie krzywizny trasy są znacznie bardziej zróżnicowane i ostrzejsze, dodatkowe straty na łukach powinny być uwzględniane.

Literatura

- CHOW VEN TE 1959: *Open channel hydraulics*. McGraw Hill Book Company, New York.
 COWAN W. L. 1956: *Estimating hydraulic roughness coefficients*. *Agricult. Engin.* 37; 7.
 GARBRECHT G. 1961: *Abflußberechnungen für flüsse und kanäle*. *Wasserwirtschaft* 2; 3.
 MORIN M., FAVANT M. 1975: *Protection contre les affouillement de berge dans l'empris des coudes des cours d'eaux*. *La Houille Blanche* 2/3.

ŻELAZO J. 1992: *Badania prędkości i oporów przepływu w naturalnych korytach rzek nizinnych*. Zesz. Nauk. SGGW Seria Rozprawy Naukowe i Monografie z. 149.

Summary

Remarks on calculation of roughness coefficient.

Some recommendations for selecting and calculating roughness coefficient in the natural river channels are

described. The influence of different hydraulic parameters on the roughness coefficient are presented.

Author's address:

J. Żelazo
Warsaw Agricultural University – SGGW
ul. Nowoursynowska 166
02-787 Warszawa
Poland