

Dorota ŚWIĄTEK¹, Janusz KUBRAK¹, Kinga PACHUTA²

¹Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW
Department of Hydraulic Engineering and Environmental Recultivation WAU

²Katedra Kształtowania Środowiska SGGW
Department of Environmental Improvement WAU

Określenie współczynników oporu w korycie rzeki nizinnej Assesment of friction factors for the lowland river

Słowa kluczowe: przepustowość, współczyn-
niki oporu

Key words: channels discharge capacity,
friction factors

Dolnym na podstawie pomiarów hy-
drometrycznych.

Metodyka badań

Wprowadzenie

Rzeki nizinne podlegają mniej lub bardziej intensywnym procesom zarastania brzegów i płycizn przybrzeżnych. Zarastanie wywołuje zmniejszenie czynnej powierzchni przekroju koryta i ma bezpośredni wpływ na wielkość i rozkład prędkości oraz spadek zwierciadła. Wpływ roślinności wodnej na hydrauliczne warunki przepływu i kształtowanie się koryta zmienia się wyraźnie w czasie trwania poszczególnych sezonów. Największy wpływ roślinności wodnej na warunki przepływu obserwuje się w rzekach o głębokości średniej do około 2 m (Dąbkowski i Pachuta 1996). W artykule określono współczynniki oporów przepływu dla wybranego odcinka rzeki Biebrzy w Basenie

Rzeka Biebrza płynie w północno-wschodniej części Polski (długość 156,5 km, powierzchnia dorzecza 7057,4 km²). Basen Dolny Biebrzy zajmuje obszar o powierzchni 350 km² i położony jest między przekrojem wodowskazowym Osowiec a ujściem do rzeki Narwi. Szerokość rzeki w tym rejonie zmienia się od 30 do 40 metrów, a jej długość wynosi około 51 km. Podobnie jak w Basenie Górnym i Środkowym, Biebrza jest w tym rejonie rzeką silnie meandrującą, której maksymalny spadek wynosi 0,013%. Do badań hydrometrycznych wybrano przekrój położony w pobliżu wsi Mocarze, w odległości 5,1 km powyżej wodowskazu Burzyn i zlokalizowany na 13,6 km jej biegu (rys. 1). Do pomiaru spadku zwierciadła wody wybrano prostoliniowy odcinek



RYSUNEK 1. Analizowany odcinek Biebrzy w okolicach wsi Mocarze
FIGURE 1. The analyzed reach of the lowland Biebrza River near Mocarze village

rzeki Biebrzy długości 1,2 km. Szerokość koryta wody brzegowej wynosi w tym miejscu około 40 m, a średnia głębokość 2,5 m. Spad zwierciadła wody mierzono niwelatorem AT-G7N. Wybrany przekrój podlegał równomiernemu zarastaniu strefy przybrzeżnej w skali roku. Pomiar prędkości przepływu w przekroju wykonywano sondą elektroakustyczną NAUTILUS C2000 w 15 pionach pomiarowych. Średnie wartości prędkości otrzymywano z uśrednienia ciągu pomiarowego prędkości chwilowej w czasie 30 sekund.

Wyniki pomiarów i ich analiza

W 2004 roku przeprowadzono pomiar przepływu i stanów wody w przekroju (tab. 1) oraz dokonano rozpoznania roślinności wodnej porastającej brzegi i skarpy koryta (tab. 2).

Strefy zajęte przez rośliny wodne i bagienne, na brzegach i w korycie głównym rzeki, wyznaczone na podstawie inwentaryzacji florystycznej sporządzonej metodą marszrutową w dniu 15.07.2004 roku pokazano na rysunku 2.

TABELA 1. Pomierzony stan i natężenie przepływu wody w przekroju na rzece Biebrzy
TABLE 1. Measured stage and discharge at the Biebrza River cross sections

Data pomiaru	Stan H [m n.p.m.]	Przepływ Q [$m^3 \cdot s^{-1}$]	Spadek wody J [‰]
15.07.2004	101,39	15,1	0,071

TABELA 2. Spis roślin zarejestrowanych w dniu 15.07.2004 roku w przekroju rzeki Biebrzy
TABLE 2. List of aquatic plants collected on the 15.07.2004 in the Biebrza River cross section

Lp.	Nazwa rodzajowo-gatunkowa rośliny	Strefa brze- wa	Strefa wody płytkiej do około 0,7 m
1	Rzęsa drobna (<i>Lemna minor</i>)	+	+
2	Rzęsa trójrowkowa (<i>Lemna trisulca</i>)	+	+
3	Mięta nadwodna (<i>Mentha aquatica</i>)	+	+
4	Niezapominajka błotna (<i>Myosotis palustris</i>)	-	+
5	Manna wodna (<i>Glyceria aquatica</i>)	-	+
6	Karbieńiec pospolity (<i>Lycopus europaeus</i>)	+	-
7	Szczaw lancetowaty (<i>Rumex hydrolapathum</i>)	-	+
8	Mietlica rozłogowa (<i>Agrostis stolonifera</i>)	-	+
9	Przytulia błotna (<i>Galium palustre</i>)	-	+
10	Zabiściek pływający (<i>Hydrocharis morsus ranae</i>)	-	+
11	Krwawnica pospolita (<i>Lythrum salicaria</i>)	-	+
12	Przetacznik bobowiczek (<i>Veronica beccabunga</i>)	-	+
13	Jaskier rozesłany (<i>Ranunculus repens</i>)	-	+
14	Psianka słodkogórz (<i>Solanum dulcamara</i>)	-	+
15	Gorysz bagienny (<i>Peucedanum palustre</i>)	-	+
16	Mozga trzcinowata (<i>Phalaris arundinacea</i>)	-	+
17	Potocznik wąskolistny (<i>Berula erecta</i>)	-	+
18	Trzcinnik lancetowaty (<i>Calamagrostis canescens</i>)	-	+

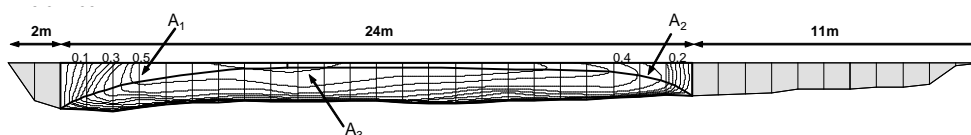
Wymienione w tabeli 2 rośliny wodne, zakwalifikowane jako roślinność miękką, wpływają na warunki przepływu zależne zarówno od cech gatunkowych roślin, ich fazy rozwojowej, jak i od budowy zbiorowiska. Początek wegetacji roślin wodnych określa się na podstawie wieloletnich obserwacji. Dla roślin wymienionych w tabeli 2 za początek wegetacji przyjmuje się zwykle dzień 1 kwietnia, a termin jej zakończenia przypada na okres pomiędzy końcem października i listopada (Dąbkowski Pachuta 1996). Największy rozwój roślin obserwowano w okresie najwyższej temperatury wody i powietrza, tj. na przełomie lipca i sierpnia.

Na podstawie pomierzonych wartości prędkości przepływu wody w przekroju wykreślono układy izolinii prędkości (rys. 3). Poza obszarem skoncentrowanego przepływu wolnym od roślinności występuje obszar przepływu spowolnionego przez roślinność brzegową, w którym prędkość spada poniżej 0,05 m/s, i wyraźny obszar z roślinnością bez przepływu wody.

Wykresy izolinii w przekroju poprzecznym wykorzystano do obliczeń współczynników oporu i szorstkości w korycie. W tym celu wykresy izolinii prędkości w przekroju poprzecznym podzielono na obszary powiązane z obwodem zwilżonym przekroju



RYSUNEK 2. Strefy roślinności w toni wodnej przekroju rzeki Biebrzy
 FIGURE 2. Aquatic plants zones in analyzed cross section



RYSUNEK 3. Izolinie prędkości w przekroju poprzecznym koryta rzeki Biebrzy
 FIGURE 3. Isolinie of velocity in the analyzed cross section

o wyraźnie zróżnicowanej chropowatości powierzchni, tzn. na obszary A_1 , A_2 , w których warunki przepływu kształtowane są pod wpływem roślinności wodnej, i obszar A_3 uzależniony od szorstkości dna koryta (Rouvé 1987). Granice podziału obszarów stanowią linie ortogonalne do izolinii prędkości, pozbawione naprężeń stycznych. Przyjmując słuszność założenia Einsteina, potwierdzonego wynikami badań Indlekofera (1981) o równości średnich prędkości przepływu w całym przekroju z prędkościami średnimi w każdym z wymienionych obszarów, wyznaczono pola powierzchni obszarów A_1 , A_2 , A_3 . Następnie ze wzoru Darcy'ego-Weisbacha wyznaczono średni współczynnik oporów w przekroju (1) dla średniej prędkości przepływu (2) obliczanej na podstawie pomierzonego na-

tężenia przepływu (Q) i pola przekroju strumienia (A) (Hydrauliczne podstawy... 2003):

$$\lambda_{gc} = \frac{8gRJ}{v} \quad (1)$$

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

Z warunku równości średnich prędkości przepływu w każdym z obszarów A_1 , A_2 , A_3 ze średnią prędkością w całym przekroju obliczono ze wzoru Darcy'ego-Weisbacha współczynniki oporów (λ_i) powierzchni z roślinnością na lewym brzegu, prawym brzegu i powierzchni dna:

$$v = v_i \quad (3)$$

oraz

$$\lambda_i = \frac{8gR_i J}{v} \quad (4)$$

Średni współczynnik oporów w przekroju koryta powiązany jest ze współczynnikami w obszarach zależnością:

$$\lambda_{gc} = \frac{\sum_1^3 \lambda_i O_i}{\sum_1^3 O_i} \quad (5)$$

gdzie:

g – przyspieszenie ziemskie,

A, A_i – pole przekroju i obszaru „ i ”,

O, O_i – obwód zwilżony przekroju i obszaru „ i ”,

R, R_i – promień hydrauliczny przekroju i obszaru „ i ”,

J – spadek zwierciadła wody,

λ_{gc} – współczynnik oporów całego przekroju,

λ_{gc}, λ_i – współczynnik oporów całego przekroju i obszaru „ i ”

i – numer części przekroju równy odpowiednio 1, 2 lub 3.

Bezwymiarowe współczynniki oporów powiązane są ze współczynnikami szorstkości Manninga zależnością:

$$n_i = \sqrt{\frac{\lambda_i R_i^{\frac{1}{3}}}{8g}} \quad (6)$$

Wyznaczone w opisany sposób wartości współczynników oporu i szorstkości zestawiono w tabeli 3. Wartości współczynników oporów i szorstkości wyznaczone dla powierzchni roślin wodnych są

kilkukrotnie większe od wartości dla dna koryta. Roślinność wodna w analizowanym przekroju rzeki Biebrzy wpływa na hydrauliczne warunki przepływu w 15,1% + 13,2% = 28,3% powierzchni przekroju. W pozostałej części przekroju, tzn. w 71,7% powierzchni przekroju warunki przepływu kształtowane są pod wpływem dna koryta.

Dla współczynników oporu można wyznaczyć absolutne chropowatości powierzchni (k_s) ze wzoru Colebrooka-White'a:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,0 \log \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k_s / R}{14,84} \right) \quad (7)$$

gdzie Re jest liczbą Reynoldsa obliczaną z zależności:

$$Re = \frac{4Rv}{\nu} \quad (8)$$

gdzie:

ν – kinematyczny współczynnik lepkości wody,

R – promień hydrauliczny przekroju strumienia.

Wyznaczone w ten sposób chropowatości absolutne k_s dla powierzchni roślinności wodnej w przekroju, osiągają wartości rzędu 3–4 cm, a dla powierzchni dna chropowatość absolutna ma wartość 3 mm (tab. 3).

Podsumowanie

Roślinność wodna bardzo mocno wpływa na warunki przepływu wody w rzece Biebrzy. Wartości współczynników szorstkości dla powierzchni roślinności wodnej w analizowanym

TABELA 3. Współczynniki oporu i szorstkości do wzoru Manninga w przekroju rzeki Biebrzy
 TABLE 3. Values of the Manning's coefficients and Darcy-Weisbach's friction factors in the analyzed cross section

Obszar przekroju Part of cross sections	A_i	$\frac{A_i}{A} \cdot 100\%$	O_i	R_i	V	v	λ_i	Re_i	k_s	n_i
	[m ²]	[%]	[m]	[m]	[m/s ²]	[m/s]	[-]	[-]	[m]	[m ^{-1/3} ·s]
1	5,40	15,1	1,73	3,12	1,20E-06	0,405	0,110	4 210 698	0,031	0,045
2	4,74	13,2	1,25	3,79			0,134	5 115 343	0,043	0,052
3	25,65	71,7	24,04	1,07			0,038	1 439 326	0,003	0,022
Cały przekrój czynny	35,79	100,0	27,02	1,32			0,047	1 786 828	0,005	0,026

przekroju są dwukrotnie większe od wartości współczynników szorstkości dna koryta i średniej wartości współczynnika szorstkości przekroju. Roślinność wodna oddziałuje na warunki przepływu w 1/3 powierzchni przekroju. Warunki przepływu w pozostałych 2/3 powierzchni przekroju kształtowane są pod wpływem chropowatości dna rzeki. Wartości chropowatości absolutnej osiągają wartość rzędu 3–4 cm dla powierzchni roślinności wodnej w przekroju oraz wartość 3 mm dla powierzchni dna.

Literatura

- DĄBKOWSKI Sz.L., PACHUTA K. 1996: Roślinność i hydraulika koryt zarośniętych. Biblioteka Wiadomości IMUZ 89, Wydawnictwo IMUZ, Falenty.
- INDLEKOFER H. 1981: Überlagerung von Rauigkeitseinflüssen beim Abfluß in offenen Gerinnen. Mitt. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen, Heft 37.
- Hydrauliczne podstawy obliczania przepustowości koryt rzecznych, 2003 (red.) J. Kubrak, E. Nachlik. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- ROUVÉ G. 1987: DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft, Hydraulische Probleme beim

naturnahen Gewässerausbau Ergebnisse aus Schwerpunktprogramm "Anthropogene Einflüsse auf hydrologische Prozesse", Band 2.

Summary

Assesment of friction factors for the lowland river. Calculation methods of discharge capacity in rivers and channels with flexible vegetation are based at the Manning's and Darcy-Weisbach's friction factors to appear local river bed stresses coupled with other fluid dynamic processes. An example of friction factors calculation has been developed in this paper. The hydrometrical measurement has been surveyed in a selected cross section in the Lower Biebrza basin. The absolute roughness for the divided parts of cross sections has been calculated by using Collebrook-White's equation. Results show that friction factors for the vegetation boundary are much greater then for the bottom of cross sections.

Authors' address:

Dorota Świątek, Janusz Kubrak, Kinga Pachuta
 Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
 Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska
 ul. Nowoursynowska 159, 02-766 Warszawa
 Poland