

*Bogusław Michalec, Bartosz Leksander*

**OKREŚLENIE BEZWYMIAROWEGO WSPÓŁCZYNNIKA  
OPORÓW I WSPÓŁCZYNNIKA SZORSTKOŚCI  
W PRZEKROJU ZATORU  
Z GRUBEGO RUMOSZU DRZEWNEGO**

***DEFINITION OF DIMENSIONLESS COEFFICIENT  
OF RESISTANCE AND COEFFICIENT OF ROUGHNESS  
IN CROSS-SECTION OF STREAM WITH WOOD JAM***

**Streszczenie**

W pracy przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w potoku Bukowińskim, których celem było określenie wpływu zatoru, utworzonego z kłody, na zmianę wartości bezwymiarowego współczynnika oporów i współczynnika szorstkości. Wykonane pomiary obejmowały niwelację podłużną oraz poprzeczną koryta ciekłu, pobór rumowiska dennego oraz pomiary hydrometryczne. Niwelacja poprzeczna obejmowała pięć przekrojów poprzecznych na odcinku potoku o długości 47 m, które zostały zlokalizowane przed, za, oraz w rejonie zatoru z grubego rumoszu drzewnego. Wykazano zróżnicowanie prędkości przepływu wody w rejonie zatoru. Obliczono bezwymiarowy współczynnik oporów, uwzględniając bezwzględną szorstkość dna określoną według wzoru Gładki [van Rijn 1984]. W celu określenia bezwzględnej szorstkości dna pobrano trzy próby rumowiska dennego w przekroju z kłodą. Stwierdzono, że zator w potoku Bukowińskim, utworzony z kłody, powoduje zmianę warunków hydraulicznych przepływu wody i wzrost o ponad 71% wartości bezwymiarowego współczynnika oporów w przekroju zatoru. Określono również współczynnik szorstkości koryta i wykazano, że współczynnik ten w przekroju z zaturem, przesłaniający w 60% przekroju koryta przy przepływie wynoszącym  $0,141 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , jest większy o ponad 17,5% od wartości współczynnika szorstkości w przekrojach przed i za zaturem.

**Słowa kluczowe:** potok, szorstkość, zator z rumoszu drzewnego, bezwymiarowy współczynnik oporów, współczynnik szorstkości

### Summary

The results of investigations carried out in the stream Bukowiński are presented in this paper. The aim of investigation was definition of influence of wood jam on change of dimensionless coefficient of resistance and coefficient of roughness. The performed measurements included cross-section leveling and longitudinal leveling of the stream channel, bed sediment sampling, and hydrometric measurements. Cross-section leveling included five cross-sections in the 47-m long stream sector; these were located upstream and downstream the wood jam and in its region. Differentiation of water flow velocity in the region of wood log was shown. The dimensionless coefficient of resistance was calculated taking into account the equivalent bottom roughness determined by use of Gladki's formulae [van Rijn 1984]. In the aim of the qualification of the equivalent bottom roughness three samples of bottoms sediment were taken in the cross-section with the log. It was found that the wood log in the Bukowiński stream caused a change of hydraulic conditions of water flow and, in consequence, the dimensionless coefficient of resistance in the wood jam section increased by about 71%. The coefficient of channel roughness was also determined and it was shown that the coefficient of roughness in the section of wood jam, which 60% of channel cross-section cover by water flow carrying out  $0,141 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , caused increasing of this coefficient by over 17,5%.

**Key words:** stream, roughness, wood jam, dimensionless coefficient of resistance, roughness coefficient

### WSTĘP

W wyniku naturalnego obumierania lub rozpadu drzew rosnących w stre-  
fach nadbrzeżnych cieków, czy też powalenia ich przez wiatr, lawiny lub erozję  
brzegów poszczególne fragmenty drzew lub całe drzewa dostając się do koryta  
cieku tworzą zatory. Jak podaje Wyźga [2003] zatory z rumoszu drzewnego  
można podzielić na kłody, krzewy i drzewa z zachowaną koroną oraz tzw. zwa-  
ły. Kłody to pojedyncze pnie lub fragmenty pni, konarów i korzeni o długości  
większej niż 1 m i średnicy większej niż 10 cm. Natomiast zwały to różnorodne  
mieszaniny pni, konarów, gałęzi i korzeni wraz z materiałem mineralnym  
i drobniejszym materiałem organicznym.

Znaczenie zatorów z rumoszu drzewnego jest szczególnie istotne ze  
względu na hydraulikę przepływu wody w rzekach i potokach terenów górskich  
i pogórskich. Jest ono najmniejsze w przypadku utworzenia tamy częściowej,  
przegradzającej część przekroju koryta. Gdy koryto zostanie przegrodzone na  
całej szerokości przez rumosze drzewne dochodzi do powstania tamy zupełnej,  
powodującej powstanie zmian profilu podłużnego zwierciadła wody przy prze-  
pływach niskich i średnich. Taki zator staje się tamą tzw. aktywną, gdy nastę-  
puje zatrzymywanie materiału dennego i dochodzi do formowania się progu.  
Przegroda utworzona z drzew powoduje zmniejszenie prędkości przepływu wo-  
dy, co sprzyja sedymentacji rumowiska rzecznoego na odcinku cieków powyżej

zatoru. Przy przepływach wyższych, aż do wezbraniowych, niewielkie zatory stanowią struktury zwiększające szorstkość dna i powodujące wzrost oporów przepływu wody. Przepływy wezbraniowe mogą powodować przemieszczanie pojedynczych kłód, konarów, a nawet drzew. Zgromadzone w ten sposób pnie i konary drzew w obrębie koryta powodują dzielenie się nurtu i powstanie żwirowych odsypów, przyczyniających się erozji brzegów rzeki i zwiększeniu szerokości jej koryta. Zatory z rumoszu drzewnego powodują również zwiększenie głębokości cieku w rejonie ich występowania, co sprzyja zmniejszeniu prędkości średniej przepływu wodny, zatrzymywaniu materii mineralnej w wraz z nią materii organicznej.

W potokach górskich i górskich częściach rzek dominującą formą rumoszu drzewnego są kłody, które mogą występować pojedynczo lub wraz z konarami, gałęziami i korzeniami mogą tworzyć zwały. Przegrodzenie koryta przez zator z rumoszu drzewnego powoduje spiętrzenie wody i zwiększenie oporów jej przepływu oraz wpływa na zmianę morfologii koryta i degradację jego brzegów. Stąd też w ramach dotychczas prowadzonych pracach regulacyjnych cieku zatory te były usuwane. Ze względu na wymogi stawiane przez Ramową Dyrektywę Wodną, dotyczące oceny stanu zasobów ekosystemów wodnych, których celem jest utrzymanie i poprawa stanu środowiska wodnego, należy dążyć do poprawy stanu ekologicznego cieku. Dla tego między innymi należy pozostawiać zwały drzew w korycie cieku, które sprzyjają utrzymaniu korzystnych warunków biologicznych dla ichtiofauny, poprzez zróżnicowanie warunków hydraulicznych i morfologicznych koryta. W takiej sytuacji, określając warunki przepustowości cieku, pojawia się konieczność określenia oddziaływania danego typu zatoru z rumoszu drzewnego na warunki przepływ wód, a w związku z tym wysokości spiętrzenia wody przez zator i współczynników szorstkości koryta w rejonie jego występowania. Celem pracy jest określenie bezwymiarowych współczynników oporów i współczynników szorstkości w przekrojach zlokalizowanych poniżej i powyżej zatoru utworzonego przez kłodę, oraz w przekroju zatoru. Kontynuacja zainicjowanych badań umożliwi określenie bezwymiarowych współczynników oporów i współczynników szorstkości w zależności od stopnia przesłonięcia przekroju cieku przez zator utworzony przez kłodę. Badania przeprowadzono w potoku Bukowińskim koło Spytkowic.

## **CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU BADAŃ**

Zlewnia potoku Bukowińskiego położona jest w południowo-zachodniej części województwa małopolskiego, w powiecie nowotarskim, w gminie Jabłonka. Według Kondrackiego [2002] zlewnia badanego przekroju należy do Beskidu Orawsko-Podhalańskiego. Zlewnia wchodzi w skład Karpat Zewnętrznych Zachodnich. Potocznie teren ten nazywany jest Podbabiogórzem, ze względu na bliskość stoków Babiej Góry. Pobliska przełęcz Spytkowicka

stanowi główny europejski dział wód, oddzielający zlewiska Morza Bałtyckiego i Czarnego. Zgodnie z podziałem Polski na regiony klimatyczne, opracowanym przez Wosia [1999], zlewnia znajduje się w regionie XXVI Śląsko-Krakowskim. W zlewni dominują gleby brunatne o odczynie w całym profilu kwaśnym – pH od 3,5 do 5,0. Zlewnia potoku ma mocno i wyraźnie rozwinięty dział wodny, mało zwarty kształt i powierzchnię topograficzną równą około 6 km<sup>2</sup>, licząc do przekroju badawczego. Źródła badanego potoku wypływają na wysokości ponad 800,00 m n.p.m. Położenie hipsometryczne wskazuje na charakter górski badanej zlewni, ponieważ jej powierzchnia usytuowana jest na wysokości powyżej 600 m n.p.m. Potok Bukowiński jest ciekim IV rzędu, wprowadzającym wody do Czarnej Orawy, wpływającej do Orawy, której recypientem jest Dunaj.

## **METODYKA**

Odcinek badawczy został zlokalizowany w km 3+500 potoku Bukowińskiego w Spytkowicach. Pomiary geodezyjne i hydrometryczne przeprowadzono na odcinku 47 metrów. Szerokość potoku na wyznaczonym odcinku badawczym wynosiła 3,5 m – 4,5 m. Wyznaczono pięć przekrojów poprzecznych (rys. 1), zlokalizowanych w przekroju kłody tworzącej zator (przekrój II-II), w odległości 30 cm powyżej i poniżej zatoru (przekroje II'-II' i II''-II'') oraz 29 metrów powyżej przekroju z zaturem (przekrój I-I) i 18 metrów poniżej przekroju z zaturem (przekrój III-III).

Pomiary geodezyjne przekrojów poprzecznych i spadku dna oraz pomiary hydrometryczne prędkości przepływu wody zostały wykonane 24 kwietnia 2010 roku. W trakcie pomiarów pobrano trzy próby rumowiska dennego w przekroju II-II, w którym znajdowała się kłoda. Pomiary geodezyjne wykonano za pomocą niwelatora Topcon ET-G7. Pomiary hydrometryczne przepływu wody w każdym z pięciu wytypowanych przekrojów poprzecznych wykonano za pomocą indukcyjnego młynka hydrometrycznego Nautilus C2000 firmy OTT Hydrometrie. Rumowisko denne pobrano z wierzchniej warstwy dna metodą konwencjonalną w celu określenia składu granulometrycznego. Dokonano również pomiaru temperatury wody w celu określenia współczynnika lepkości kinematycznej wody.

Na podstawie wyników pomiarów określono parametry: pole powierzchni każdego przekroju poprzecznego, głębokości napełnienia w pionach hydrometrycznych, średnie prędkości przepływu wody w pionach hydrometrycznych i w całym przekroju poprzecznym. Na podstawie pomierzonych prędkości przepływu obliczono przepływ całkowity w poszczególnych przekrojach metodą Harlachera [Byczkowski 1996].



**Rysunek 1.** Lokalizacja odcinka badawczego potoku Bukowińskiego wraz z przekrojami pomiarowymi

**Figure 1.** Location of investigated section of the stream Bukowiński with measurement cross-sections

Bezwymiarowy współczynnik oporów Darcy-Weisbacha w korytach otwartych może być obliczany z prawa oporów sformułowanego przez Colebrooka-White'a dla przewodów zamkniętych [Schroeder 1989]. Dla koryt otwartych zapisuje się je następująco:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[ \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{k_s}{12.2R \cdot f} \right] \quad (1)$$

gdzie:

- $\lambda$  – bezwymiarowy współczynnik oporów [-],
- $k_s$  – chropowatość absolutna [m],
- $f$  – współczynnik kształtu przekroju [-],
- $\text{Re}$  – liczba Reynoldsa dla przepływu wody [-].

Liczbę Reynoldsa obliczono dla współczynnika lepkości kinematycznej wynoszący  $1,2369 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , który został określony na podstawie pomierzonej temperatury wody w potoku, wynoszącej  $7^\circ\text{C}$ .

W obliczeniach bezwymiarowego współczynnika oporów w korytach otwartych pomijany jest współczynnik kształtu przekroju „f”. Pominięcie tego współczynnika powoduje niestalość wartości chropowatości absolutnej dla określonego bezwymiarowego współczynnika oporów przy niewielkich zmianach średnicy hydraulicznej przekroju poprzecznego. Jeżeli wartości liczby Reynoldsa obliczane dla przepływu w korytach są większe od 25000 można stosować uproszczoną formę wzoru (1) w postaci:

$$\lambda = \left[ -2 \log \left( \frac{k_s}{12.84R} \right) \right]^{-2} \quad (2)$$

gdzie oznaczenia jak we wzorze (1).

Bezwymiarowy współczynnik oporów w każdym z wyznaczonych przekrojów poprzecznych potoku Bukowińskiego został określony według równania (2). Chropowatość absolutną „ $k_s$ ”, określaną również jako bezwzględną szorstkość dna według Nikuradse [van Rijn 1984], można wyznaczyć za pomocą wzorów między innymi Kamphiusa, Hey'a, Mahmooda lub Gładki [Michalec 2009, van Rijn 1984]. Bezwymiarowy współczynnik oporów obliczono z bezwzględną szorstkość dna określoną według wzoru Gładki [van Rijn 1984]:

$$k_s = 2.3 \cdot d_{80} \quad (3)$$

w którym  $d_{84}$  oznacza średnice ziarna stanowiącego wraz z drobniejszymi 80% zawartości wagowej próbki. Bezwymiarowy współczynnik oporów, określony dla każdego z przekrojów, umożliwił obliczenie współczynniki szorstkości z zależności:

$$n = R^{1/6} \sqrt{\frac{\lambda}{8g}} \quad (4)$$

gdzie:

- R – promień hydrauliczny [m],
- g – przyspieszenie ziemskie [ $m \cdot s^{-2}$ ].

## WYNIKI BADAŃ

Obliczony przepływ całkowity w potoku Bukowińskim w trakcie wykonywanych pomiarów wynosił  $0,141 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Średni spadek dna, określony dla odcinka potoku pomiędzy przekrojami I-I i III-III wynosi 8%. Natomiast średnia prędkość przepływu wody w przekrojach znajdujących się poza zasięgiem oddziaływania zatoru, tj. w przekrojach I-I i III-III (tab. 1), wynosiła odpowiednio  $0,261$  i  $0,320 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , a maksymalne napełnienia w tych przekrojach były równe  $0,28$  i  $0,26 \text{ m}$ . W przekroju II'-II' zlokalizowanym bezpośrednio przed kłodą

napełnienie wynosiło 0,24 m, a prędkość średnia przepływu wody była równa  $0,276 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Na podstawie wykonanych pomiarów stwierdzono, że w wyniku przegrodzenia koryta przez kłodę pole powierzchni przekroju poprzecznego II-II zostało zmniejszone średnio o 43% w porównaniu do pola powierzchni przekrojów I-I i III-III. W przekroju II-II, ze względu na przegrodzenie koryta kłodą, prędkość średnia wynosiła  $0,671 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Na podstawie pobranych prób rumowiska rzeczno określono skład granulometryczny materiału mineralnego budującego dno potoku Bukowińskiego. Określona dla trzech prób średnia średnica  $d_{50}$  i średnia średnica  $d_{80}$  rumowiska pobranego z dna wynosiły odpowiednio 11 mm i 50 mm.

Obliczona liczba Reynoldsa na podstawie określonej średniej prędkości w danym przekroju i wyznaczonym współczynnikiem lepkości kinematycznej, wynoszącym 1,4285 cSt, wynosiła od 116766 do 89732, odpowiednio dla przekrojów powyżej i poniżej kłody. W przekroju z zatorem wartość liczby Reynoldsa była wyższa i wynosiła 120326.

Współczynnik oporów liniowych w każdym przekroju, obliczony według wzoru (2), w którym bezwzględna szorstkość dna  $k_s$  określono według wzoru Gładki (3), zamieszczono w tabeli 1. Wartość  $k_s$ , wynoszącą 0,115, obliczono dla średniej średnicy  $d_{80}$  obliczonej uśrednionej krzywej przesiewu wyznaczonej z trzech pobranych prób rumowiska dennego.

**Tabela 1.** Parametry przepływu wody w przekrojach pomiarowych badanego odcinka potoku Bukowińskiego, określone dla przepływu  $Q = 0,141 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

**Table 1.** Parameters of water flow for the investigated cross-sections of the stream Bukowiński established for water discharge  $Q = 0.141 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$

Przekrój Cross-section	Pole powierzchni przekroju Cross-section area F [m <sup>2</sup> ]	Promień hydrauliczny Hydraulic radius R [m]	Prędkość średnia Average velocity of flow V <sub>sr</sub> [m·s <sup>-1</sup> ]	Bezwymiarowy współczynnik oporów Dimensionless resistance coefficient λ [-]	Współczynnik szorstkości Roughness coefficient n [-]
I-I	0,54	0,150	0,261	0,151	0,032
II'-II'	0,51	0,120	0,276	0,176	0,033
II-II	0,21	0,064	0,671	0,297	0,039
II''-II''	0,52	0,120	0,271	0,176	0,033
III-III	0,44	0,110	0,320	0,188	0,034

Obliczony współczynnik szorstkości w przekroju z kłodą (tab. 1), jako średnia ważona, w której wagą są obwody zwilżone przekrojów cząstkowych w płaszczyźnie pionowej zatoru, tj. części lewo- i prawobrzeżnej oraz znajdującej się pod kłodą, wynosi 0,039. Współczynnik przesłonięcia tego przekroju, określony jako stosunek pola powierzchni przekroju poprzecznego bez kłody do



poła powierzchni zatory, przy napełnieniu odpowiadającemu przepływowi wynoszącemu  $0,141 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , jest równy 60%.

## WNIOSKI

Obecność zatoru w korycie ciekła, utworzonego z kłody, wpływa na zmianę warunków hydraulicznych przepływu wody, powodując wzrost prędkości przepływu i zwiększenie się bezwymiarowego współczynnika oporów. Średnia prędkość przepływu wody przez przekrój zatoru jest niespełna 1,4 krotnie większa od średniej prędkości w korycie potoku bez zatoru. Zator z kłody, przesłaniający 60% przekroju koryta przy przepływie wynoszącym  $0,141 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , powoduje wzrost bezwymiarowego współczynnika oporów o ponad 71%. Na podstawie obliczonych bezwymiarowych współczynników oporów w każdym z badanych przekrojów poprzecznych potoku Bukowińskiego stwierdzono również zwiększenie się wartości współczynnika szorstkości koryta w przekroju z zaturem. Współczynnik ten jest o ponad 17,5% wyższy od średniego współczynnika szorstkości obliczonego dla przekrojów powyżej i poniżej kłody. Nie stwierdzono wyraźnego wpływu zatoru na deformację dna koryta w przekrojach znajdujących się 0,3 m powyżej i poniżej kłody.

## BIBLIOGRAFIA

- Byczkowski A. 1996. *Hydrologia*. T. 2, Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Kondracki J. 2002. *Geografia regionalna Polski*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- Michalec B. 2009. *Wybrane metody określenia intensywności transportu rumowiska unoszonego*. Michalec B. Monografia. Polska Akademia Nauk Oddział w Krakowie, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, z.8, 91.
- Schroeder W. 1989. *Gestaltungsmoeglichkeiten einer Renaturierungsstrecke und hydraulische Nachweise*. Wasserbau-Mitteilungen der TH Darmstadt, Heft 29.
- van Rijn L. C. 1984. *Sediment transport. Part II: Suspended load transport*. Journal of Hydraulic Engineering, vol.110, No 10. 1613-1641.
- Woś A. 1999. *Klimat Polski*. PWN, Warszawa.
- Wyźga B., Zawiejska J., Kaczka R. 2003. *Znaczenie rumoszu drzewnego w ciekach górskich*. Aura nr 11.

Dr hab. inż. Bogusław Michalec  
Mgr inż. Bartosz Leksander  
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki  
30-059 Kraków, al. A. Mickiewicza 24/28  
rmmichbo@cyf-kr.edu.pl  
barteklex@gmail.com

Recenzent: Prof. dr hab. Ryszard Ślizowski