

JANUSZ URBAŃSKI

Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

EKSPERYMENTALNE BADANIA WPŁYWU SZORSTKOŚCI UMOCNIEŃ DNA W DOLNYM STANOWISKU JAZU NA ROZMIARY ROZMYĆ MIEJSCOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych, których celem było określenie wpływu szorstkości umocnień w dolnym stanowisku jazu na rozmiary miejscowych rozmyć dna. Doświadczenia przeprowadzono na modelu budowli z wypływem strumienia spod zasuw, niekłą do rozpraszania energii i poziomym, płaskim umocnieniem dna w dolnym stanowisku o długości 2,00 m. Umocnienie było wykonane jako betonowe oraz w postaci narzutu kamiennego o chropowatości względnej k z przedziału 0,024-0,028. W doświadczeniach wykorzystano jeden materiał rozmywalny – piasek ($d_{50} = 1,1$ mm, $(d_{84}/d_{16})^{0,5} = 1,77$). Zastosowanie umocnień dna w postaci narzutu kamiennego, czyli o zwiększonej szorstkości w stosunku do betonowych, zapewniło większą skuteczność redukcji prędkości i intensywności turbulencji strumienia przy dnie. Wpływało to na ograniczenie rozmiarów rozmycia oraz opóźnienie rozwoju erozji w czasie. Spowodowało także zmniejszenie miary kąta α , związanego z nachyleniem stoku wyboju od strony budowli. Jest to korzystne z punktu widzenia oceny stateczności jazu.

Słowa kluczowe: jaz, rozmycia miejscowe, szorstkość umocnień

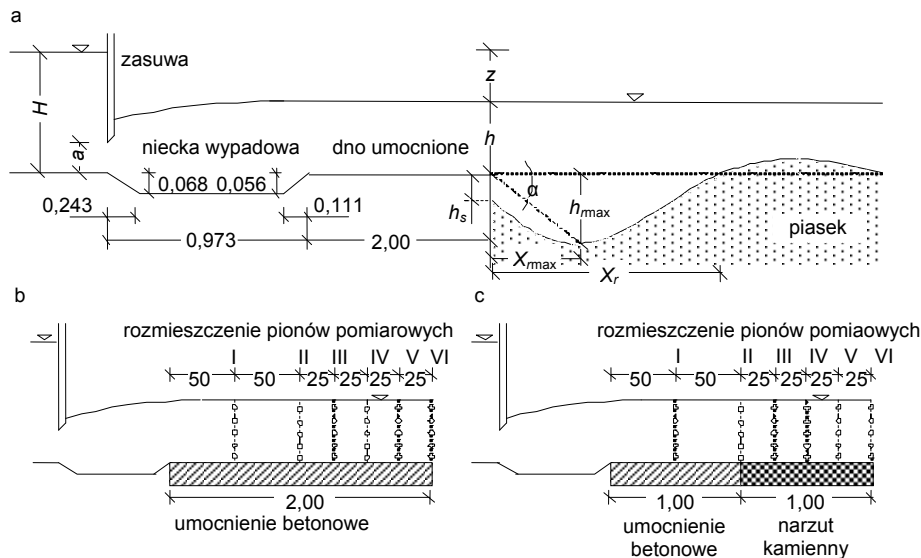
Wstęp

Nadmierny rozwój miejscowych rozmyć koryta poniżej jazu może doprowadzić do zniszczenia umocnień dna i skarpu w dolnym stanowisku, odsłonięcia fundamentu budowli i utraty jej stateczności. Z uwagi na te zagrożenia na etapie projektowania bardzo ważne jest opracowanie wiarygodnej prognozy rozmiarów tworzącego się wyboju. Jedną z metod rozpoznawania intensywności procesu rozmywania dna w czasie oraz prognozowania ostatecznych rozmiarów wyboju są badania laboratoryjne na fizycznym modelu budowli odzwierciedlającym rzeczywiste rozwiązania konstrukcyjne. W ten sposób oceniać można wpływ różnych rozwiązań i modyfikacji budowli na rozmiary rozmyć.

W celu ograniczenia rozmiarów tworzącego się wyboju i odsunięcia od budowli przekroju występowania maksymalnej głębokości rozmycia stosuje się umocnienia dna i skarp koryta za wypadem. Odpowiednio wykonane umocnienia, dzięki właściwie dobranej szorstkości powierzchni, powinny na swej długości skutecznie redukować prędkość strumienia przy dnie. W pracy przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań modelowych rozmyć poniżej jazu z umocnieniem dna w dolnym stanowisku wykonanym jako betonowe i w postaci narzutu kamiennego. Przeprowadzono analizę wyników pod kątem rozpoznania wpływu szorstkości powierzchni umocnień na kształtowanie się rozmyć w czasie trwania przepływu oraz ostateczne rozmiary wyboju.

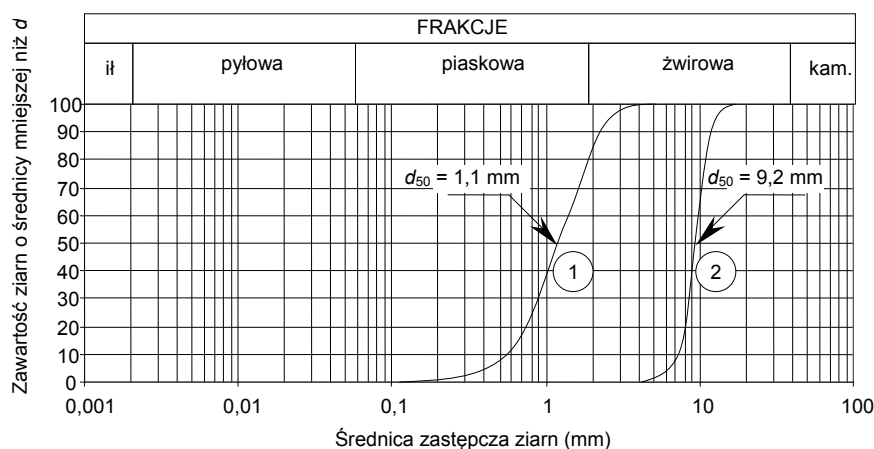
Metodyka

Schemat modelu w badaniach, przyjęty za ŻBIKOWSKIM (1970), przedstawiono na rysunku 1. Był to model jazu z płaskim zamknięciem zasuwowym, niekłą do rozpraszania energii i poziomym umocnieniem dna za wypadem. Strumień wody w doświadczeniach wypływał spod zasuwki piętzącej podnoszonej na wysokość a . W niecce był utrzymywany zatopiony odskok hydrauliczny. Umocnienie dna w dolnym stanowisku o całkowitej długości wynoszącej 2,0 m było wykonane w pierwszym etapie doświadczeń w postaci płyty betonowej (rys. 1 b). W drugim etapie badań bezpośrednio za



Rys. 1. Schemat jazu poddanego badaniom: wymiary modelu (m) oraz analizowane parametry rozmyć (a), schematy modelu z umocnieniem betonowym (b) i kamiennym (c) oraz rozmieszczenie pionów pomiarowych prędkości

Fig. 1. Schema of the weir model: dimensions of model (m) and analysed parameters of scour (a), schema of model for concrete bed protection (b) and rip-rap (c) and localization of measurement verticals of velocity



Rys. 2. Krzywe uziarnienia: piasku (1) i narzutu kamiennego (2) na modelu
 Fig. 2. Granulations: of sand (1) and rip-rap (2) used on the model

niecką pozostawiono umocnienie betonowe na długości 1,0 m, a dalej zastosowano narzut z kamienia łamanego wykonany na odcinku dna o długości 1,0 m (rys. 1 c). Krzywą uziarnienia kruszywa użytego na narzut przedstawiono na rysunku 2. Chropowatość względną zastosowanego umocnienia kamiennego k obliczono jako iloraz połowy średnicy zastępczej d_{50} i głębokości strumienia w dolnym stanowisku na końcu umocnień h ; zawierała się ona w przedziale 0,024÷0,028. Za umocnieniami dno koryta było wypełnione materiałem rozmywalnym, gdzie przepływający strumień wody formował wybój. Model był wykonany w korycie prostokątnym o szerokości 1,0 m. Podstawowe wymiary modelu pokazano na rysunku 1 a, a parametry hydrauliczne strumienia wody w doświadczeniach zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Hydrauliczne parametry przepływu w doświadczeniach na modelu
 Table 1. Flow conditions during investigations on the model

q (m ² /s)	H (m)	h (m)	z (m)	a (m)	h_1 (m)	h_2 (m)	σ_z
0,073	0,445	0,165	0,292	0,049	0,030	0,190	1,18
0,097	0,462	0,193	0,281	0,064	0,039	0,200	1,24

Za pierwszą głębokość sprzężoną h_1 przyjęto najmniejszą głębokość strumienia za zasuwą nazywaną przez Czertousowa (ČERTOUSOV 1962) głębokością zdławioną i obliczaną jako $h_1 = \mu a$, gdzie μ jest współczynnikiem dławienia. Jego wartość, uzależniona przez Żukowskiego (KISELEV 1974) od stosunku a/H dla badanych warunków hydraulicznych, zawierała się w przedziale 0,615÷0,617. Drugą głębokość sprzężoną, h_2 , obliczono z równania (1):

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 \frac{q^2}{gh_1^3}} - 1 \right) \quad (1)$$

Jako współczynnik zatopienia odskoku hydraulicznego σ_z , zgodnie z zaleceniami praktycznymi (DĄBKOWSKI i IN. 1982) przyjęto stosunek: $\frac{h+d+\Delta z}{h_2}$, gdzie $d = 0,056$ m – głębokość niecki wypadowej. Wartość Δz nazywaną spiętrzeniem strumienia na wypływie z niecki, oblicza się jako $\frac{v_h^2 - v_2^2}{2g}$, gdzie: v_h i v_2 są prędkościami w przekrojach strumienia o głębokościach odpowiednio h i h_2 .

Doświadczenia polegały na formowaniu rozmycia za umocnieniami, gdzie dno koryta było wypełnione piaskiem sortowanym o krzywej uziarnienia przedstawionej na rysunku 2. Czas trwania przepływu wynosił 480 min. Podłużne profile rozmytego dna mierzono w osiowej płaszczyźnie koryta po czasach: 60, 120, 180, 240, 300, 360 i 480 min od początku doświadczenia. Parametry rozmyć poddane analizom przedstawiono na rysunku 1 a.

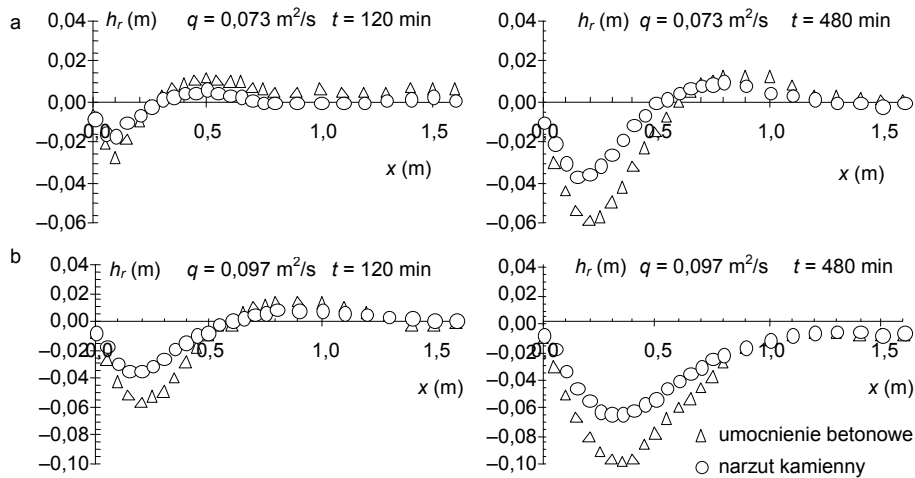
W trakcie doświadczeń wykonywano także pomiary poziomych składowych wektora prędkości: v_x i v_y (podłużnej i poprzecznej) w pionach rozmieszczonych na długości umocnień (rys. 1 b, c) w osiowej płaszczyźnie koryta. W każdym pionie pomiary wykonano w pięciu punktach rozmieszczonych następująco: p_1 – w odległości 1 cm nad dnem, p_2 – na wysokości 0,2 h nad dnem, p_3 – 0,5 h nad dnem, p_4 – 0,7 h nad dnem, a p_5 – na głębokości 2 cm pod zwierciadłem wody. Wykorzystano elektrosondę PEMS rejestrującą wyniki z częstotliwością do 0,1 s. Czas pomiaru prędkości w punkcie wynosił 120 s. Rejestrowano zatem ciągi v_x i v_y o liczebności 1200 elementów. Na podstawie ciągów v_x obliczono w każdym punkcie wartość intensywności turbulencji $\varepsilon = \sigma/v$, gdzie σ jest odchyleniem standardowym od średniej wartości prędkości v .

Wyniki i ich analiza

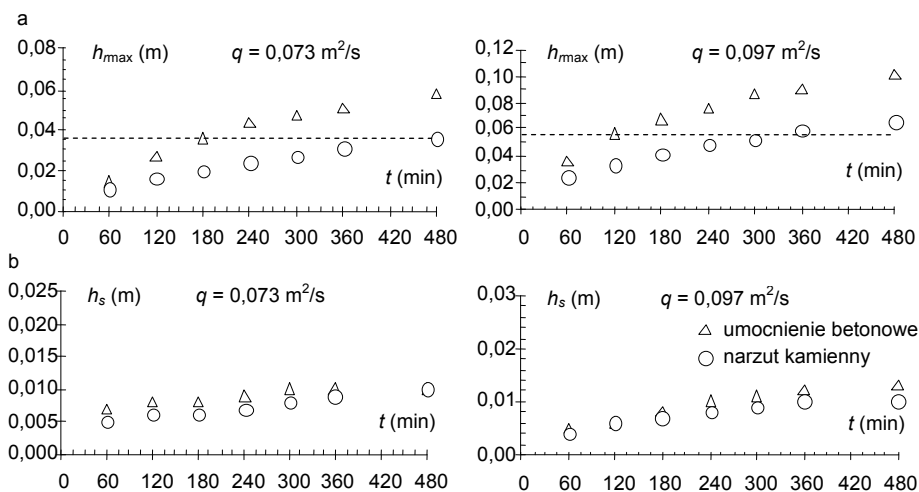
Analizie poddano podłużne profile rozmytego dna za umocnieniem betonowym i kamiennym, ukształtowane w czasie 120 i 480 minut trwania przepływu o natężeniu $q = 0,073$ m²/s (rys. 3 a) i $q = 0,097$ m²/s (rys. 3 b). W wyniku zastosowania umocnienia w postaci narzutu kamiennego na modelu uzyskiwano w tym samym czasie trwania przepływu mniejsze rozmiary rozmycia, zarówno pod względem głębokości h_{rmax} , jak i długości wyboju X_r , na co wskazuje wzajemne położenie punktów na wykresach.

Na rysunku 4 przedstawiono zmienność maksymalnej głębokości wyboju h_{rmax} (rys. 4 a) i głębokości rozmycia krawędziowego h_s (rys. 4 b) w czasie t trwania przepływu.

Maksymalna głębokość rozmycia ukształtowanego w czasie 3 h trwania przepływu na modelu z umocnieniem betonowym była w przybliżeniu równa głębokości h_{rmax} ukształtowanej w czasie 8 h za umocnieniem narzutem kamiennym (rys. 4 a). Zastosowanie umocnień w dolnym stanowisku o zwiększonej szorstkości powierzchni spowodowało opóźnienie rozwoju rozmycia w czasie.



Rys. 3. Profile rozmytego dna po 120 min (a) i 480 min (b) trwania przepływu
Fig. 3. Profiles of erosion after 120 min (a) and 480 min (b) during flow



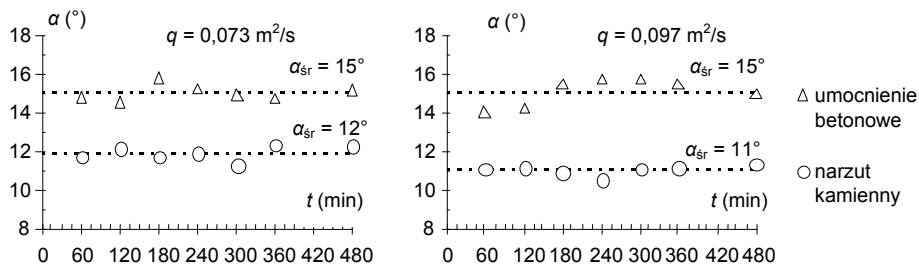
Rys. 4. Zmienność $h_{r\max}$ (a) i h_s (b) w czasie trwania przepływu na modelu
Fig. 4. Variability $h_{r\max}$ (a) i h_s (b) during flow on the model

W tabeli 2 zestawiono pomierzone po różnych czasach trwania przepływu głębokości rozmyć $h_{r\max}$ i h_s za umocnieniem betonowym i kamiennym oraz podano, jaki procent głębokości wyboju $h_{r\max(b)}$ i $h_{s(b)}$ ukształtowanego za umocnieniem betonowym stanowiły głębokości $h_{r\max}$ i h_s za umocnieniem wykonanym w postaci narzutu kamiennego. W wyniku zastosowania umocnienia kamiennego uzyskano znaczne zmniejszenie głębokości wyboju. Maksymalna głębokość wyboju ukształtowanego za umocnieniem wykonanym w postaci narzutu kamiennego stanowiła 60-65% $h_{r\max(b)}$ za umocnieniem betonowym.

Tabela 2. Głębokości rozmycia h_{rmax} i h_s ukształtowane w czasie t
 Table 2. Depths of scour h_{rmax} and h_s shaped in time t

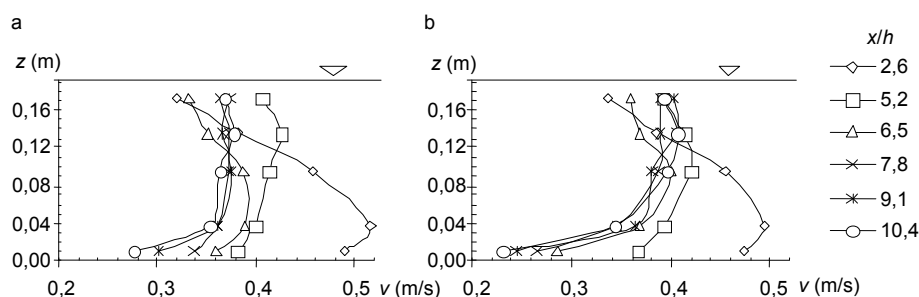
q (m ² /s)	t (min)	h_{rmax} (m) i % $h_{rmax(b)}$		h_s (m) i % $h_{s(b)}$	
		umocnienie betonowe	umocnienie beto- nowo-kamienne	umocnienie betonowe	umocnienie beto- nowo-kamienne
0,073	120	0,026	0,016	0,008	0,006
		100%	61,5%	100%	75,0%
	240	0,043	0,026	0,009	0,007
		100%	60,4%	100%	77,7%
	480	0,058	0,036	0,01	0,01
		100%	62,1%	100%	100,0%
0,097	120	0,056	0,034	0,007	0,006
		100%	60,7%	100%	85,7%
	240	0,076	0,048	0,010	0,008
		100%	63,2%	100%	80,0%
	480	0,101	0,066	0,013	0,010
		100%	65,3%	100%	76,9%

Z uwagi na bezpieczeństwo i stateczność budowli piętrzącej ważnym parametrem charakteryzującym rozmycie jest nachylenie stoku wyboju od strony umocnień. Jest ono opisywane za pomocą miary kąta α zawartego między prostą wyznaczającą poziome, nierozmyte dno, a odcinkiem łączącym krawędź końca umocnień z punktem położonym w miejscu maksymalnego rozmycia dna (rys. 1 a). Na podstawie wyników doświadczeń określono zmienność wartości kąta α wraz z pogłębianiem się rozmycia w czasie (rys. 5). Wartość kąta α zmieniała się nieznacznie wraz z pogłębianiem się wyboju. Mniejszą średnią wartość α wynoszącą 11-12°, uzyskano na modelu z umocnieniem dna narzutem kamiennym. Zastosowanie umocnień o zwiększonej szorstkości zapewniło kształt rozmycia korzystniejszy z punktu widzenia oceny stateczności budowli.



Rys. 5. Zmienność kąta α w czasie trwania przepływu na modelu
 Fig. 5. Variability of angle α during flow on the model

Na rysunku 6 przedstawiono rozkłady prędkości uzyskane w wyniku pomiarów w pionach rozmieszczonych nad umocnieniem betonowym (rys. 6 a) i betonowo-kamiennym (rys. 6 b) podczas doświadczeń z przepływem $q = 0,097 \text{ m}^2/\text{s}$. Odległość pionu od końca niecki wypadowej x odniesiono do głębokości strumienia na końcu umocnień h , uzyskując bezwymiarowe ilorazy x/h . Kształty rozkładów zmieniały się wraz z odległością od niecki wypadowej, gdzie był utrzymywany zatopiony odskok hydrauliczny. W pionach pomiarowych położonych najbliżej końca niecki prędkość maksymalna występowała w punktach położonych w odległości $0,2h$ nad dnem. Było to związane z przemieszczaniem się strumienia tranzytowego przy dnie, który na długości umocnień rozszerzał się na całą głębokość. Wskazują na to kształty kolejnych tachoid na długości umocnień. Maksymalna prędkość w pionach przesuwała się w kierunku zwierciadła wody, a prędkość w punktach przy dnie malała, co jest typowe dla przejściowego odcinka strumienia za odskokiem hydraulicznym (WU i RAJARATNAM 1996).

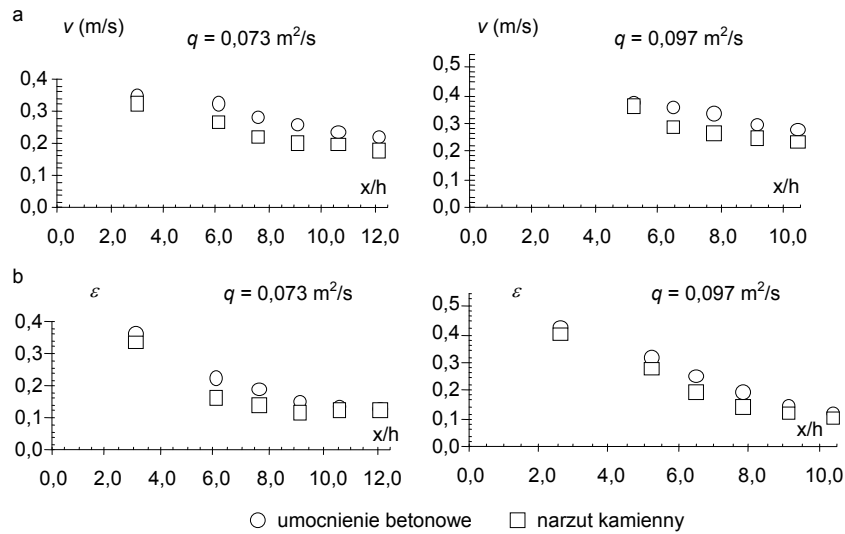


Rys. 6 Rozkłady prędkości w pionach nad dnem umocnionym betonem (a) i narzutem kamiennym (b) w doświadczeniach z przepływem $q = 0,097 \text{ m}^2/\text{s}$

Fig. 6. Velocity profiles in downstream over concrete bed protection (a) and rip-rap (b) in experiments at flow $q = 0.097 \text{ m}^2/\text{s}$

Z punktu widzenia oceny przyczyn tworzenia się rozmyć największe znaczenie mają wartości prędkości w punktach położonych w pobliżu dna. Na podstawie zamieszczonych rozkładów (rys. 6) i wykresów przedstawiających zmienność prędkości w punktach położonych w odległości 1 cm nad dnem umocnionym (rys. 7 a) można stwierdzić, że na długości umocnień następowała redukcja prędkości w dolnej strefie strumienia. W doświadczeniach z przepływem $q = 0,097 \text{ m}^2/\text{s}$ na końcu umocnienia betonowo-kamiennego prędkość w punkcie położonym w odległości 1 cm nad dnem wynosiła $0,23 \text{ m/s}$, co stanowi 82% wartości v na końcu umocnienia betonowego, wynoszącej $0,28 \text{ m/s}$. Zastosowanie narzutu kamiennego spowodowało większą skuteczność redukcji prędkości w pobliżu dna na długości umocnień.

Wzmocniona turbulencja, charakteryzująca strumień za wypadem budowli piętrzącej, jest czynnikiem potęgującym proces erozji koryta rzecznego (POPOVA 1985, BŁĄZEJEWski 1989, URBAŃSKI 2005). Duża zmienność wartości prędkości chwilowej i pulsacje ciśnienia ułatwiają odrywanie ziaren gruntu od dna i ich przemieszczanie. Na długości umocnień w dolnym stanowisku następuje redukcja stopnia burzliwości strumienia (DĄBKOWSKI i IN. 1982, URBAŃSKI 2007), co potwierdziły wyniki doświadczeń



Rys. 7. Wyniki pomiarów prędkości (a) i intensywności turbulencji (b) w punktach położonych w odległości 1 cm nad dnem umocnionym w dolnym stanowisku
 Fig. 7. Results of velocity measurements (a) and turbulence intensity in downstream (b) in points located 1 cm over bed

(rys. 7 b). Wartość względnej intensywności turbulencji strumienia ε w pobliżu dna wynosiła około 0,35-0,40 w pionie oddalonym o 0,50 m od końca niecki wypadowej i zmniejszyła się do 0,10-0,14 na końcu umocnień. Wyniki doświadczeń wykazały, że większą skuteczność redukcji stopnia burzliwości strumienia uzyskano w wyniku zastosowania umocnienia o zwiększonej szorstkości, na co wskazuje wzajemne położenie punktów na rysunku 7 b.

Wnioski

1. W wyniku zastosowania umocnień dna na modelu w dolnym stanowisku w postaci narzutu kamiennego, czyli o zwiększonej szorstkości w stosunku do betonowych, uzyskano ograniczenie rozmiarów rozmycia oraz opóźnienie rozwoju erozji dna w czasie. Maksymalna głębokość wyboju ukształtowanego za umocnieniem wykonanym w postaci narzutu kamiennego stanowiła 62-65% $h_{r,max}$ za umocnieniem betonowym.

2. Zwiększenie szorstkości powierzchni umocnień w dolnym stanowisku zapewniło zmniejszenie miary kąta α , związanego z nachyleniem stoku wyboju od strony budowli. Jest to korzystne z punktu widzenia oceny stateczności obiektu.

3. Zmniejszenie się rozmiarów rozmycia w wyniku zwiększenia szorstkości umocnień było następstwem redukcji prędkości przepływu strumienia i intensywności turbulencji przy dnie. Wprowadzenie narzutu kamiennego o chropowatości względnej wynoszącej 0,024-0,028 na miejsce umocnienia betonowego spowodowało około 20-procentową redukcję prędkości przy dnie na końcu umocnień.

Literatura

- BŁAŻEJEWSKI R., 1989. Prognozowanie rozmyć miejscowych gruntów niespoistych poniżej budowli upustowych. *Rocz. AR Pozn. Rozpr. Nauk.* 190.
- ČERTOUSOV M.D., 1962. *Gidravlika – special’nyj kurs*. Gosudarstvennoe Energetičeskoe Izdatel’stvo, Moskva.
- DĄBKOWSKI SZ.L., SKIBIŃSKI J., ŻBIKOWSKI A., 1982. *Hydrauliczne podstawy projektów wodno-melioracyjnych*. PWRiL, Warszawa.
- KISELEV P.G., 1974. *Spravočnik po gidravličeskim rasčëtam*. Ènergija, Moskva.
- POPOVA K.S., 1985. Rasčët izmenenija glubiny mestnych razmyvov za plotinami vo vremeni. *Izv. Vsesojuz. Naučno-Issled. Inst. Geol.* 119: 66-73.
- URBAŃSKI J., 2005. Związek charakterystyk turbulencji strumienia z głębokością rozmycia za jazem. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 506: 507-513.
- URBAŃSKI J., 2007. Rozmycia dna na modelu jazu ze zmienną długością umocnień w dolnym stanowisku. *Acta Sci. Pol. Archit.* 6, 2: 27-36.
- WU S., RAJARATNAM N., 1996. Transition from hydraulic jump to open channel flow. *J. Hydraul. Eng.* 122, 9: 526-528.
- ŻBIKOWSKI A., 1970. *Badania laboratoryjne zależności głębokości rozmycia poniżej przelewu od długości umocnień i czasu trwania doświadczenia*. Maszynopis. Politechnika Warszawska, Warszawa.

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE INFLUENCE OF BED PROTECTION ROUGHNESS IN DOWNSTREAM OF THE WEIR ON THE LEVELS OF LOCAL SCOURINGS

Summary. The paper presents the results of the laboratory investigations aiming at evaluating the impact of bed protection roughness on the levels of local bed scourings. A model taired construction with the outflow below the gate, stilling pool and horizontal bed protection of 2.00 m length was utilized for the tests. The bed protection was constructed of concrete and rip-rap of relative roughness of $k = 0.024-0.028$. Sand ($d_{50} = 1.1$ mm, $(d_{84}/d_{16})^{0.5} = 1.77$) was used in the experiments as an eroded material. The intensity of both velocity and turbulence of the stream at the bed level was limited more effectively owing to the application of rip-rap to protect the downstream bed. It visibly influenced the local scouring level decrease.

Key words: weir, local scour, roughness of bed protection

Adres do korespondencji – Corresponding address:

Janusz Urbański, Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa, Poland, e-mail: janusz_urbanski@sggw.pl

Zaakceptowano do druku – Accepted for print:

28.04.2009

Do cytowania – For citation:

*Urbański J., 2009. Eksperymentalne badania wpływu szorstkości umocnień dna w dolnym stanowisku jazu na rozmiary rozmyć miejscowych. *Nauka Przyr. Technol.* 3, 3, #104.*

