

**Janusz URBAŃSKI**

Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW w Warszawie  
Department of Hydraulic Engineering and Environmental Recultivation WULS – SGGW

## **Wpływ szorstkości umocnień w dolnym stanowisku jazu na lokalne rozmycia dna**

### **Influence of roughness of bed protection downstream of weir on local scour**

**Słowa kluczowe:** budowla piętrząca, lokalne rozmycie, szorstkość umocnień dna, model hydrauliczny

**Key words:** weir, local scour, roughness of bed protection, hydraulic model

#### **Wprowadzenie**

Tworzenie się rozmyć miejscowych poniżej budowli piętrzących niesie ze sobą wiele zagrożeń. Powstający w dnie wybój doprowadzić może do zniszczenia umocnień w dolnym stanowisku. Wraz z pogłębianiem się rozmycia obniża się położenie zwierciadła wody poniżej jazu. Tym samym zmianie ulega rozkład obciążeń działających na budowlę: przy niezmiennym parciu wody spiętrzonej w górnym stanowisku zmniejsza się parcie wody dolnej. Nadmierny rozwój erozji doprowadzić może do odsłonięcia fundamentu budowli i utraty jej stateczności. W związku z tym na etapie projektowania obiektu bardzo ważne jest opracowanie wiarygodnej prognozy osta-

tecznych rozmiarów rozmycia. Prognozowanie rozmyć jest trudne, gdyż proces wzmożonej erozji koryt poniżej budowli, z uwagi na duży stopień złożoności, pozostaje w dalszym ciągu niedostatecznie rozpoznany.

Najdokładniejszą metodą prognozowania intensywności procesu rozmywania dna w czasie oraz ostatecznych rozmiarów wyboju są badania laboratoryjne na fizycznym modelu budowli odzwierciedlającym rzeczywiste rozwiązania konstrukcyjne. W ten sposób badać można wpływ różnych rozwiązań i modyfikacji budowli na rozmiary rozmyć.

Jednym ze sposobów ograniczania rozmiarów tworzącego się wyboju jest umacnianie dna i skarp koryta za wypadem budowli. Odpowiednio wykonane umocnienia, dzięki właściwie dobranej szorstkości powierzchni, skutecznie powinny na swej długości redukować prędkość w strefie przydennej. Zabudowa dna i skarp koryta zapewnia jednocześnie oddalenie przekroju występowania maksymalnej głębokości rozmycia od

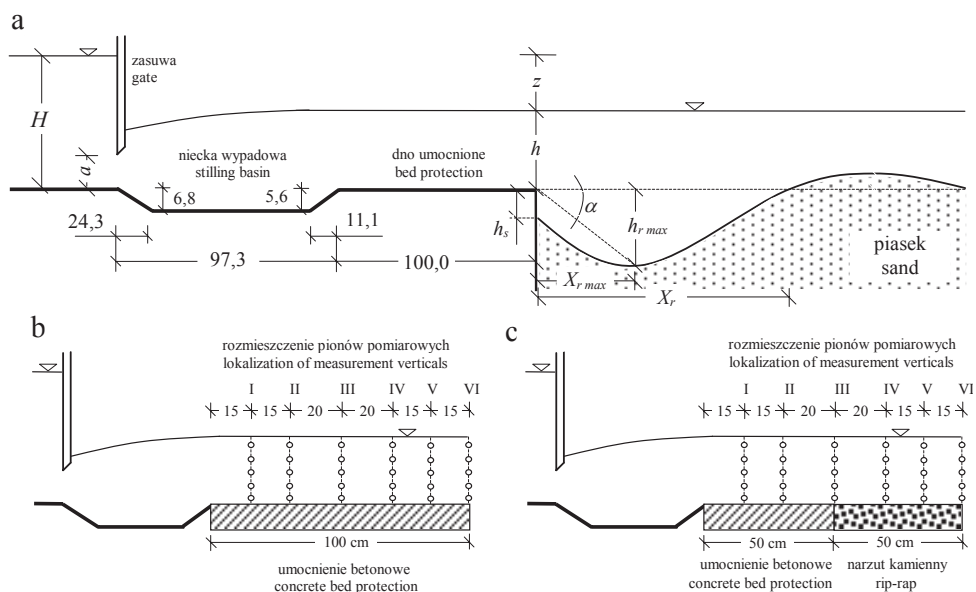
budowli, a tym samym zmniejsza ryzyko utraty stateczności obiektu. W pracy przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań modelowych rozmyć poniżej jazu z umocnieniem dna w dolnym stanowisku wykonanym jako betonowe i w postaci narzutu kamiennego. Przeprowadzono analizę wyników pod kątem rozpoznania wpływu szorstkości powierzchni umocnień na kształtowanie się rozmyć w czasie trwania przepływu oraz ostateczne rozmiary wyboju.

### Metodyka badań

Schemat modelu hydraulicznego w badaniach, przyjęty za Żbikowskim (1970), przedstawiono na rysunku 1. Był

to model jazu typowego dla małych rzek nizinnych Polski – z płaskim zamknięciem zasuwowym, niecką do rozpraszania energii i poziomym umocnieniem dna za wypadem.

Strumień wypływał spod zasuwy piętrzącej podnoszonej na wysokość  $a = 0,049$  m podczas każdego doświadczenia. W niecce utrzymywany był zatopiony odskok hydrauliczny. Umocnienie dna w dolnym stanowisku, o całkowitej długości wynoszącej 1,0 m, wykonane było w pierwszym etapie doświadczeń w postaci płyty betonowej (rys. 1b). W drugim etapie badań bezpośrednio za niecką pozostawiono umocnienie betonowe na długości 0,50 m, a dalej zastosowano narzut z kamienia łamanego wykonany na odcinku dna długości 0,50 m



RYSUNEK 1. Schemat modelu jazu: a – wymiary modelu [cm] oraz analizowane parametry rozmyć, b – schemat modelu z umocnieniem betonowym, c – schemat modelu z umocnieniem kamiennym oraz rozmieszczenie pionów pomiarowych prędkości

FIGURE 1. Schema of the weir model: a – dimensions of model [cm] and analysed parameters of scour, b – schema of model for concrete bed protection, c – schema of model for rip-rap protection and localization of verticals of velocity measurements

(rys. 1c). Krzywą uziarnienia kruszywa użytego na narzut przedstawiono na rysunku 2. Chropowatość względną zastosowanego umocnienia kamiennego ( $\epsilon$ ) obliczono jako iloraz połowy średnicy zastępczej ( $d_{50}$ ) i głębokości strumienia w dolnym stanowisku na końcu umocnień ( $h$ ) i wynosiła ona  $k = 0,028$ . Za umocnieniami dno koryta wypełnione było materiałem rozmywalnym, gdzie przepływający strumień wody o zadanych parametrach formował wybój. Model wykonany był w korycie prostokątnym szerokości 1,0 m. Podstawowe wymiary modelu pokazano na rysunku 1a, a parametry hydrauliczne strumienia wody podczas doświadczeń zestawiono w tabeli 1.

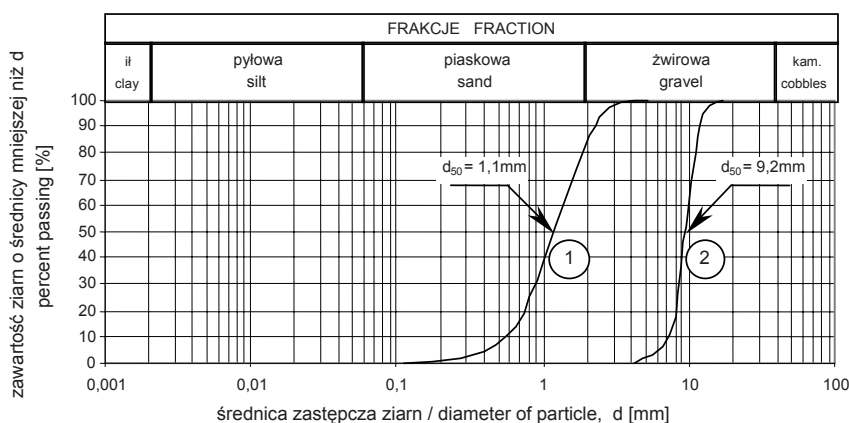
Za pierwszą głębokość sprzężoną ( $h_1$ ) przyjęto najmniejszą głębokość strumienia za zasuwą, nazywaną przez

Čertousova (1962) głębokością zdławioną i obliczaną jako  $h_1 = \mu a$ , gdzie  $\mu$  jest współczynnikiem dławienia. Jego wartość zawarta w przedziale (0,615–0,69) uzależniona jest według Żukowskiego od stosunku  $a/H$  (Kiselev 1974). Drugą głębokość sprzężoną ( $h_2$ ) obliczono z równania:

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

Jako współczynnik zatopienia odskoku hydraulicznego ( $\sigma_z$ ), zgodnie z zaleceniami praktycznymi (Dąbkowski i in. 1982), przyjęto stosunek:

$\sigma_z = \frac{h + d + \Delta z}{h_2}$ , gdzie  $d$  jest głębokością niecki wypadowej. Wartość  $\Delta z$ , nazywaną spiętrzeniem strumienia na wypływie



RYSUNEK 2. Krzywe uziarnienia materiału rozmywalnego (1) i narzutu kamiennego (2) na modelu  
FIGURE 2. Granulations of sand used on the model (1) and of rip-rap (2) on the model

TABELA 1. Hydrauliczne parametry przepływu w doświadczeniach na modelu  
TABLE 1. Flow conditions on the model during of investigations

$q$	$H$	$h$	$z$	$a$	$h_1$	$h_2$	$\sigma_z$
$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	m	m	m	m	m	m	–
0,073	0,445	0,165	0,292	0,049	0,030	0,190	1,18

z niecki, oblicza się jako,  $\Delta z = \frac{v_h^2 - v_2^2}{2g}$ ,  
gdzie  $v_h$  i  $v_2$  są prędkościami w przekro-  
jach strumienia o głębokościach odpo-  
wiednio  $h$  i  $h_2$ .

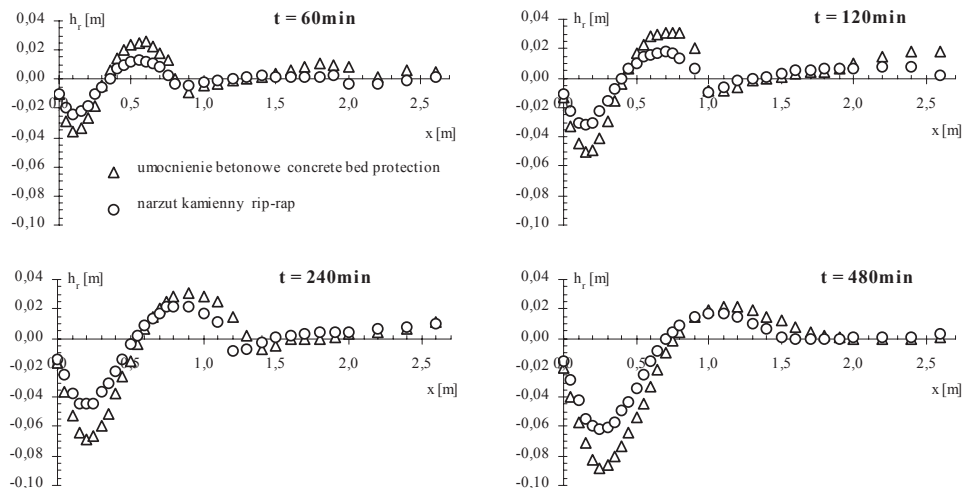
Doświadczenia polegały na formo-  
waniu rozmycia za umocnieniami, gdzie  
dno koryta wypełnione było piaskiem  
sortowanym o krzywej uziarnienia ( $d_{50} =$   
 $= 1,1$  mm) przedstawionej na rysunku 2.  
Czas trwania przepływu wynosił 480  
minut. Podłużne profile rozmytego dna  
mierzone w osiowej płaszczyźnie koryta  
po upływie: 30, 60, 120, 180, 240, 300,  
360 i 480 minut od początku doświad-  
czenia. Parametry rozmyć poddane ana-  
lizom przedstawiono na rysunku 1a.

W trakcie doświadczeń wykonywano  
także pomiary poziomych składowych  
wektora prędkości  $v_x$  i  $v_y$  (podłużnej  
i poprzecznej) w pionach rozmieszco-  
nych na długości umocnień (rys. 1b, c)  
w osiowej płaszczyźnie koryta. Wyko-  
rzystano elektrosondę PEMS, rejestrują-

cą wyniki z częstotliwością 0,1 s. W każ-  
dym pionie pomiary wykonano w pięciu  
punktach rozmieszczonych następująco:  
 $p_1$  w odległości 1 cm nad dnem,  $p_2$  na  
wysokości  $0,2h$  nad dnem,  $p_3 = 0,5h$ ,  
 $p_4 = 0,7h$ , a  $p_5$  na głębokości 2 cm pod  
zwierciadłem wody. Czas pomiaru pręd-  
kości w każdym punkcie wynosił 120 s.  
Rejestrowano zatem ciągi  $v_x$  i  $v_y$  o li-  
czebności 1200 elementów dla każdego  
kierunku. Na podstawie ciągów  $v_x$  obli-  
czono w każdym punkcie wartość inten-  
sywności turbulencji  $\varepsilon = \frac{\sigma}{v}$ , gdzie  $\sigma$  jest  
odchyleniem standardowym od średniej  
wartości prędkości  $v$  w punkcie.

## Wyniki badań i ich analiza

Analizie poddano podłużne profile  
rozmytego dna za umocnieniem beto-  
nowym i kamiennym ukształtowane po  
60, 120, 240 i 480 minutach trwania  
przepływu (rys. 3). Wzajemne położe-



RYSUNEK 3. Profile rozmytego dna po 60, 120, 240 i 480 minutach trwania przepływu na modelu hydraulicznym

FIGURE 3. Profiles of erosion after 60, 120, 240 and 480 minutes during the flow on the hydraulic model

nie punktów na wykresach dla rozmyć tworzących się za umocnieniem betonowym i kamiennym dla tych samych parametrów hydraulicznych strumienia świadczy o jednoznacznym wpływie rodzaju zastosowanego umocnienia na wielkość rozmycia. W wyniku zastosowania umocnienia w postaci narzutu kamiennego na modelu uzyskiwano w tym samym czasie trwania przepływu mniejsze rozmiary rozmycia, zarówno pod względem głębokości ( $h_{r\max}$ ) jak i długości wyboju ( $X_r$ ).

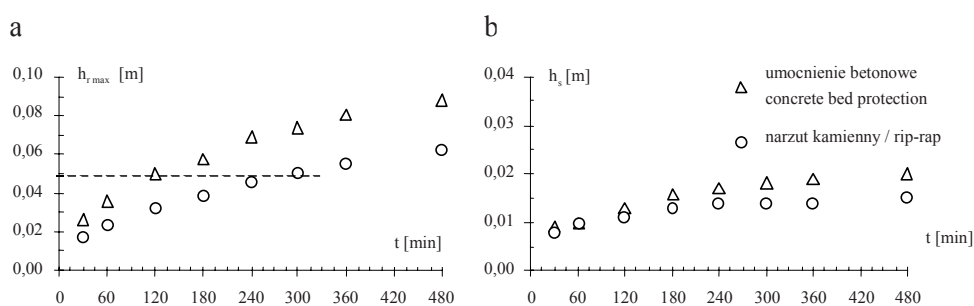
Na rysunku 4 przedstawiono zmienność maksymalnej głębokości wyboju ( $h_{r\max}$ ) i głębokości rozmycia krawędziowego ( $h_s$ ) w czasie trwania przepływu na modelu. Maksymalna głębokość rozmycia, ukształtowanego po dwóch godzinach trwania przepływu na modelu z umocnieniem betonowym, była w przybliżeniu równa  $h_{r\max}$ , ukształtowanej po pięciu godzinach za umocnieniem narzutem kamiennym. Zastosowanie umocnień w dolnym stanowisku o zwiększonej szorstkości powierzchni spowodowało opóźnienie rozwoju rozmycia w czasie.

W tabeli 2 zestawiono pomierzone na modelu po różnym czasie trwania przepływu głębokości rozmyć  $h_{r\max}$  i  $h_s$  za

umocnieniem betonowym i kamiennym. Podano również, jaki procent głębokości wyboju  $h_{r\max(b)}$  i  $h_{s(b)}$ , ukształtowanego za umocnieniem betonowym, stanowiły  $h_{r\max}$  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 64–70%  $h_{r\max(b)}$  za umocnieniem betonowym.

Z uwagi na bezpieczeństwo i stateczność budowli piętrzącej ważnym parametrem charakteryzującym rozmycie jest nachylenie stoku wyboju od strony umocnień. Opisywane jest ono za pomocą miary kąta  $\alpha$  zawartego między prostą wyznaczającą poziome, nierozmyte dno a odcinkiem łączącym krawędź końca umocnień z punktem położonym w miejscu maksymalnego rozmycia dna (rys. 1a). Na podstawie wyników doświadczeń określono zmienność wartości kąta  $\alpha$  wraz z pogłębianiem się rozmycia w czasie (rys. 5).

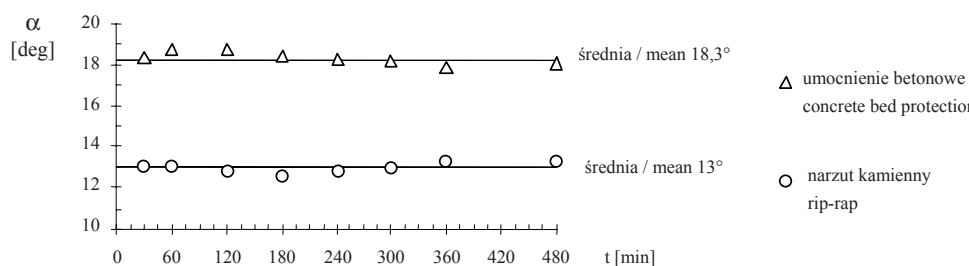
Wartość kąta  $\alpha$  zmieniała się nieznacznie wraz z pogłębianiem się wyboju. Mniejszą średnią wartość  $\alpha = 13^\circ$  uzyskano na modelu z dnem umocnio-



RYSUNEK 4. Zmienność  $h_{r\max}$  i  $h_s$  w czasie trwania przepływu na modelu hydraulicznym  
 FIGURE 4. Variability  $h_{r\max}$  i  $h_s$  during of flow on the hydraulic model

TABELA 2. Głębokości rozmycia ( $h_{r \max}$  i  $h_s$ ) ukształtowane w czasie ( $t$ )  
 TABLE 2. Depths of scour ( $h_{r \max}$  i  $h_s$ ) shaped in time ( $t$ )

$t$ [min]	$h_{r \max}$ [m] i $h_{r \max (b)}$ [%]		$h_s$ [m] i $h_{s(b)}$ [%]	
	umocnienie betonowe concrete bed protection	narzut kamienny rip-rap	umocnienie betonowe concrete bed protection	narzut kamienny rip-rap
60	0,036	0,024	0,01	0,01
	100%	66,7%	100%	100%
120	0,05	0,032	0,013	0,011
	100%	64,0%	100%	84,6%
240	0,069	0,045	0,017	0,014
	100%	65,2%	100%	82,3%
480	0,088	0,062	0,02	0,015
	100%	70,4%	100%	75,0%

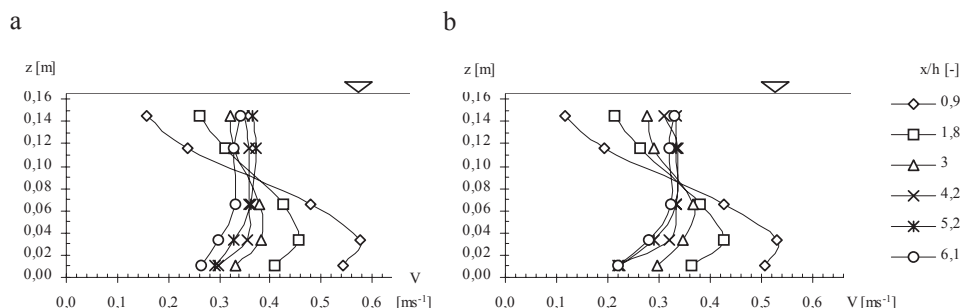


RYSUNEK 5. Zmienność kąta  $\alpha$  w czasie trwania przepływu na modelu hydraulicznym  
 FIGURE 5. Variability of angle  $\alpha$  during the flow of investigations on the hydraulic model

nym narzutem kamiennym. Zastosowanie umocnień o zwiększonej szorstkości zapewniło korzystniejszy kształt rozmycia z punktu widzenia oceny stateczności budowli.

Na rysunku 6 przedstawiono rozkłady prędkości uzyskane w wyniku pomiarów w pionach rozmieszczonych nad umocnieniem betonowym (rys. 6b) i betonowo-kamiennym (rys. 6c). 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, w której utrzymywa-

ny był zatopiony odskok hydrauliczny. W pionach pomiarowych położonych najbliżej końca niecki prędkość maksymalna występowała w punktach położonych w odległości 1 cm nad dnem. Było to związane z przemieszczaniem się w przydennej warstwie przepływu strumienia tranzytowego, który stopniowo rozszerzał się na całą głębokość. Wskazują na to kształty kolejnych tachoid na długości umocnień, gdyż maksymalna prędkość w pionach przesuwiała się w kierunku zwierciadła wody, co typowe jest dla przejściowego odcinka strumienia za odskokiem hydraulicznym (Wu i Rajaratnam 1996).



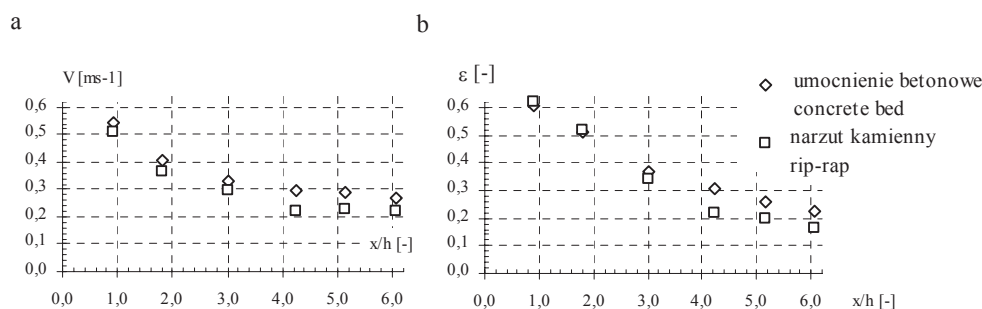
RYSUNEK 6 Rozkłady prędkości w pionach nad dnem umocnionym: a – betonem, b – narzutem kamiennym

FIGURE 6. Velocity profiles of weir over concrete bed: a – protection, b – rip-rap

Analizując przyczyny tworzenia się rozmyć, duże 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. 7a) stwierdzić można, że na długości umocnień następowała redukcja prędkości w dolnej strefie strumienia. Na końcu umocnienia betonowo-kamiennego prędkość w punkcie położonym w odległości 1 cm nad dnem wynosiła  $0,22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , co stanowi 81% wartości  $v$  na końcu umocnienia betonowego, wynoszącej  $0,27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Zastosowanie narzutu kamiennego spo-

wodowało większą skuteczność redukcji prędkości w pobliżu dna na długości umocnień.

Wzmożona turbulencja, charakteryzująca warunki przepływu za wypadem budowli piętrzącej, jest czynnikiem potęgującym proces erozji koryta rzeczno-ego (Popova 1985, Błażejowski 1989, Hoffmans i Booi 1993, 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. 7b). Wartość wzglę-



RYSUNEK 7 Wyniki pomiarów: a – prędkości, b – intensywności turbulencji, w punktach położonych w odległości 1 cm nad dnem umocnionym w dolnym stanowisku

FIGURE 7. Results of measurements concerning: a – the velocity, b – turbulence intensity downstream of weir, in points located 1 cm over the bed



nej intensywności turbulencji strumienia ( $\varepsilon$ ) wynosiła około 0,6 bezpośrednio za nieką wypadową i zmniejszyła się do 0,16–0,23 na końcu umocnień. Wyniki przeprowadzonych doświadczeń wykazały, że większa skuteczność redukcji stopnia turbulencji strumienia uzyskano w wyniku zastosowania umocnienia o zwiększonej szorstkości, na co wskazuje wzajemne położenie punktów na rysunku 7b.

## Wnioski

Autor przeprowadził badania na modelu hydraulicznym jazu z wypływem wody spod zasuwy, nieką do rozpraszania energii i umocnieniem dna o zmiennej szorstkości w dolnym stanowisku. Celem badań było jakościowe rozpoznanie kształtowania się miejscowych rozmyć dna. Badania pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Zastosowanie umocnień dna w dolnym stanowisku w postaci narzutu kamiennego, czyli o zwiększonej szorstkości w stosunku do betonowych przy zachowaniu niezmiennych hydraulicznych parametrów strumienia i czasu trwania przepływu na modelu powodowało ograniczenie rozmiarów rozmycia oraz opóźnienie rozwoju rozmycia w czasie.
2. Następstwem zwiększenia szorstkości powierzchni umocnień w dolnym stanowisku było zmniejszenie się kąta  $\alpha$ , związanego z nachyleniem stoku wyboju od strony budowli. Jest to korzystne z punktu widzenia stateczności obiektu.
3. Ograniczenie rozmiarów rozmycia w wyniku zwiększania szorstkości

umocnień przy stałych parametrach przepływu ( $q$ ,  $h$ ,  $z$ ) jest skutkiem zmniejszania się prędkości przepływu strumienia i intensywności turbulencji w strefie przydennej. Wprowadzenie narzutu kamiennego o chropowatości względnej  $k = 0,028$  na miejsce umocnienia betonowego spowodowało około dwudziestoprocentową redukcję intensywności turbulencji na końcu umocnionego dna.

## Literatura

- BŁAŻEJEWSKI R. 1989: Prognozowanie rozmyć miejscowych gruntów niespoistych poniżej budowli upustowych. Rocznik Akademii Rolniczej w Poznaniu. Rozprawy naukowe 190, Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Poznaniu, Poznań.
- ČERTOUSOV M.D. 1962: Gidravlika – specjalny kurs. Gosudarstvennoje Energetičeskoje Izdatelstvo. Moskwa, Leningrad.
- DĄBKOWSKI Sz.L., SKIBIŃSKI J., ŻBIKOWSKI A. 1982: Hydrauliczne podstawy projektów wodnomelioracyjnych. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- HOFFMANS G.J.C.M., BOOIJ R. 1993: The influence of upstream turbulence on local scour holes. Public Works and Water Mgmt., Road and Hydr. Engrg. Div., Delft, The Netherlands.
- KISELEV P.G. 1974: Spravočnik po gidravličeskim rasčeta. Energia, Moskwa.
- POPOVA K.S. 1985: Rasčet izmenenia głubiny mestnych razmyvov za plotinami vo vremeni. *Izvestia VNIIG*, 119.
- URBAŃSKI J. 2005: Związek charakterystyk turbulencji strumienia z głębokością rozmycia za jazem. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 506, *Kształtowanie Środowiska*: 507–513.
- URBAŃSKI J. 2007: Rozmycia dna na modelu jazu ze zmienną długością umocnień w dolnym stanowisku. *Acta Scientiarum Polonorum, Architectura* 6 (2): 27–36.



WU S., RAJARATNAM N. 1996: Transition from hydraulic jump to open channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering* 122, 9: 526–528.

ŻBIKOWSKI A. 1970: Badania laboratoryjne zależności głębokości rozmycia poniżej przelewu od długości umocnień i czasu trwania doświadczenia. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa.

about 1.0 m long. The bed protection in downstream was made as concrete and as rip-rap with relative roughness  $k = 0.028$ . As bed material in experiments was used sand ( $d_{50} = 1.1$  mm,  $(d_{84}/d_{16})^{0.5} = 1.77$ ). In result of use rip-rap as bed protection downstream obtained reduction of velocity and turbulence intensity of stream near the bed on the length in downstream. It was influence on decrease of sizes of local scour.

## Summary

**Influence of roughness of bed protection downstream of weir on local scour.** In paper are presented investigation results of scour downstream of weir for different roughness of bed protection. Investigations were conducted on model construction with stilling pool and horizontal bed protection

### Author's address:

Janusz Urbański  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska  
02-787 Warszawa, ul. Nowoursynowska 166  
e-mail: janusz\_urbanski@sggw.pl