

ROZMYCIA DNA NA MODELU JAZU ZE ZMIENNĄ DŁUGOŚCIĄ UMOCNIEŃ W DOLNYM STANOWISKU

Janusz Urbański

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań wpływu długości umocnień w dolnym stanowisku jazu na kształtowanie się miejscowych rozmyć dna. Doświadczenia przeprowadzono na modelu budowli z wypływem wody spod zasuw, z nieką do rozpraszania energii i poziomym, płaskim umocnieniem dna długości 0,50, 1,00 i 2,00 m. W doświadczeniach wykorzystano jeden materiał rozmywalny – piasek o charakterystykach uziarnienia $d_{50} = 1,1$ mm, $(d_{84}/d_{16})^{0,5} = 1,77$. Wydłużanie umocnień dna koryta w dolnym stanowisku jazu wpływa na opóźnienie rozwoju rozmycia w czasie, co jest wynikiem zmniejszania się burzliwości strumienia wraz z odległością od końca odskołu hydraulicznego utrzymywanego w niecce. Im dłuższy odcinek umocnionego dna za wypadem, tym mniejsze jest nachylenie obniżającego się stoku wyboju, a maksymalna głębokość rozmycia bardziej oddalona od budowli, co ważne jest z punktu widzenia zachowania jej stateczności.

Słowa kluczowe: budowla piętrząca, lokalne rozmycia, turbulencja strumienia

WSTĘP

Lokalne rozmycia dna poniżej budowli piętrzącej powstają w wyniku zmiennego w czasie ruchu wody i rumowiska. Na przebieg tego zjawiska składa się wiele czynników, których wpływ często trudno jest jednoznacznie określić. Mimo badań prowadzonych od początku ubiegłego stulecia formowanie się lokalnej erozji dna pozostaje w środowisku hydrotechników w dalszym ciągu procesem niedostatecznie rozpoznany.

W praktyce zjawisko to niesie ze sobą wiele zagrożeń. Powstający w dnie wybój doprowadzić może do zniszczenia umocnień w dolnym stanowisku. Wraz z pogłębianiem się dołu rozmycia obniża się zwierciadło wody poniżej jazu. Tym samym zmianie ulega rozkład obciążeń działających na budowlę: przy niezmiennym parciu wody spiętrzonej

Adres do korespondencji – Corresponding author: Janusz Urbański, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska, Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: janusz_urbanski@sggw.pl

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 określenie rozmiarów rozmycia.

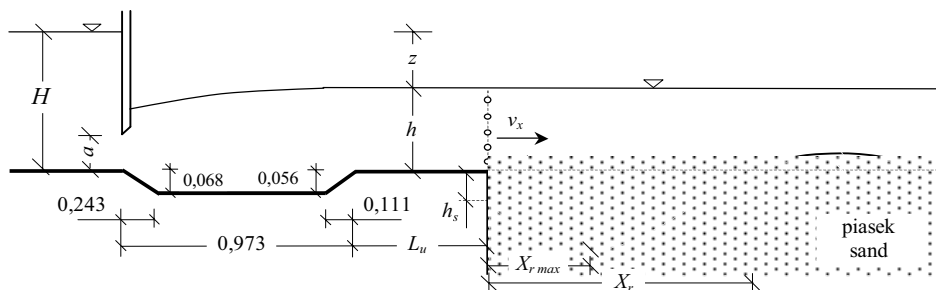
Najdokładniejszą metodą prognozowania intensywności procesu rozmywania dna w czasie oraz ostatecznych rozmiarów wyboju są badania laboratoryjne na fizycznym modelu budowli wykonanym w określonej skali geometrycznej. Fizyczny model odzwierciedla rzeczywiste rozwiązania konstrukcyjne budowli. W ten sposób badać można wpływ różnych rozwiązań i modyfikacji elementów budowli na rozmiary rozmyć i ich zmienność w czasie.

Jednym ze sposobów ograniczania rozmiarów tworzącego się wyboju jest stosowanie ubezpieczeń dna i skarp koryta za wypadem budowli za pomocą odpowiednio wykonanych umocnień. W projektowaniu umocnień ważnym parametrem jest ich szorstkość i całkowita długość. Zbyt krótkie umocnienia nie spełniają w dostatecznym stopniu swej roli, a nadmierne ich wydłużanie jest kosztowne i niepożądane w naturalnym środowisku. Szorstkość powierzchni umocnień redukuje prędkość w strefie przydennej. W pracy przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań modelowych rozmyć za umocnionym odcinkiem dna koryta. Długość umocnienia w dolnym stanowisku była zmienna. Przeprowadzono analizę wyników pod kątem rozpoznania wpływu długości umocnień na kształtowanie się rozmyć w czasie trwania przepływu oraz ostateczne rozmiary wyboju.

Praca ta finansowana była ze środków na naukę w latach 2005–2007 jako projekt badawczy.

METODYKA BADAŃ

Schemat i wymiary badanego jazu przyjęto za Żbikowskim [1970] i przedstawiono na rysunku 1. Był to jaz typowy dla małych rzek nizinnych Polski, z płaskim zamknięciem zasuwowym, nieką do rozpraszania energii i poziomym, sztywnym umocnieniem dna za wypadem. Badania prowadzono na modelu tego jazu wykonanym w skali geometrycznej 1 : 30. Umocnienie dna w dolnym stanowisku miało zmienną długość (L_u) równą 0,50, 1,00 i 2,00 m. Poniżej umocnień dno koryta wypełnione było materiałem rozmywalnym, w którym przepływający strumień wody o zadanych parametrach formował wybój. Parametry rozmyć poddane analizom przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat modelu jazu z podstawowymi wymiarami [m] oraz analizowane parametry rozmyć
 Fig. 1. Schema of the weir model with base dimension [m] and analysed parameters of scour

Model wykonany był w korycie prostokątnym szerokości 1,0 m. Doświadczenia prowadzono, zadając różne przepływy wody (q) i odpowiadające im napełnienia koryta w stanowisku górnym (H) i dolnym (h). Uzyskiwano je, podnosząc zasuwę piętrzącą na określoną wysokość (a) podczas każdego doświadczenia. W niecce powstawał zatopiony odskok hydrauliczny. Wielkości hydrauliczne przeliczano według skal wynikających z kryterium podobieństwa Froude'a. Podstawowe wymiary modelu (wyrażone w metrach) podano na rysunku 1, a parametry hydrauliczne strumieni wody w doświadczeniach w tabeli 1.

Tabela 1. Hydrauliczne parametry przepływu w doświadczeniach na modelu

Table 1. Hydraulic parameters of flow during of investigation on model

q	H	h	z	a	h_1	h_2	σ_z
$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	m	m	m	m	m	m	–
0,049	0,417	0,133	0,296	0,033	0,020	0,157	1,22
0,073	0,445	0,165	0,292	0,049	0,030	0,190	1,18
0,097	0,462	0,193	0,281	0,065	0,040	0,219	1,15

Poddanym badaniom bezwzględnym długościom umocnień (L_u) odpowiadały długości względne, odniesione do głębokości wody nad płytą umocnienia (h), zebrane w tabeli 2.

Tabela 2. Długości względne umocnień w doświadczeniach

Table 2. Relative of lengths of bed protection in experiments

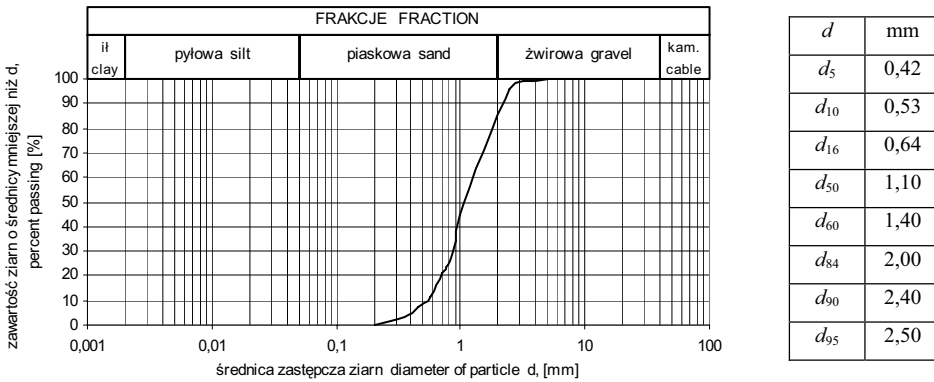
q	h	Długości względne umocnień (L_u/h) dla długości bezwzględnych (L_u) Relative of lengths of bed protection (L_u/h) for real lengths (L_u)		
		$L_u = 0,50$ m	$L_u = 1,00$ m	$L_u = 2,00$ m
$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	m			
0,049	0,133	3,76	7,52	15,04
0,073	0,165	3,03	6,06	12,12
0,097	0,193	2,59	5,18	10,36

Za pierwszą głębokość sprzężoną (h_1) przyjęto najmniejszą głębokość strumienia za zasuwą, nazywaną przez Čertousova [1962] głębokością zdławioną, obliczaną jako $h_1 = \varepsilon a$, gdzie ε jest współczynnikiem dławienia. Jego wartość, zawarta w przedziale (0,615–0,69), zależy według Żukowskiego [Kiselev 1974] od stosunku a/H . Według Čertousova [1962], współczynnik dławienia pionowego przyjmuje wartości z przedziału (0,63, 0,65). Drugą głębokość sprzężoną (h_2) obliczono z równania:

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

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

W doświadczeniach formowały się rozmycia w piasku sortowanym o krzywej uziarnienia i średnicach charakterystycznych przedstawionych na rysunku 2. Czas trwania przepływu wynosił 480 minut. Podłużne profile rozmytego dna mierzono w osiowej płaszczyźnie koryta po 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360 i 480 minutach od początku doświadczenia.



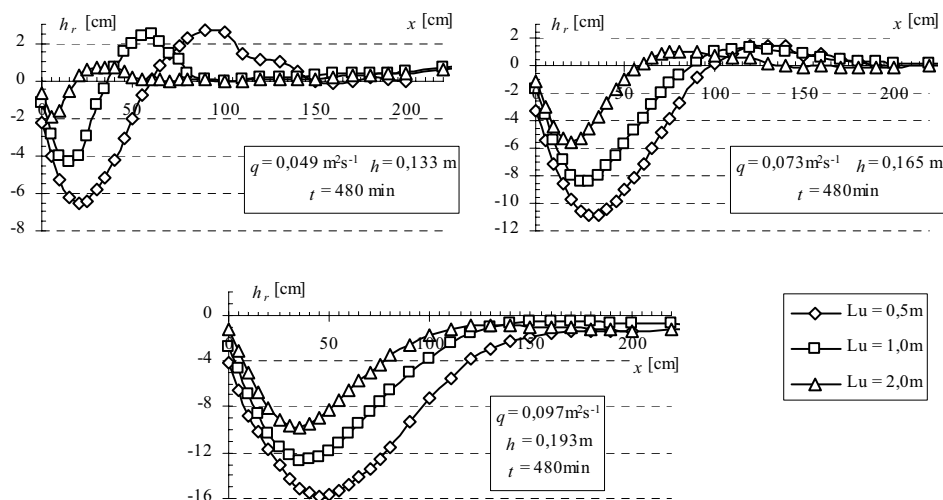
Rys. 2. Krzywa uziarnienia i średnice charakterystyczne materiału rozmywalnego użytego na modelu

Fig. 2. Granulation and characteristic diameters of sand used on the model

W trakcie doświadczeń wykonywano także pomiary poziomych składowych wektora prędkości v_x i v_y (podłużnej i poprzecznej) w osiowym pionie na końcu umocnienia. Wykorzystano do tego elektrosondę PEMS, rejestrującą wyniki co 0,1 s. Pomiary wykonywano w pięciu punktach rozmieszczonych w pionie następująco: p1 w odległości 1 cm nad dnem, p2 na wysokości $0,2h$ nad dnem, p3 – $0,5h$, p4 – $0,7h$, a p5 na głębokości 2 cm pod zwierciadłem wody. Czas pomiaru prędkości w każdym punkcie wynosił 120 s. W pracy autora [Urbański 2003] wykazano, że jest to wystarczający czas pomiaru, zapewniający stacjonarność i ergodyczność pola prędkości. Rejestrowane były ciągi v_x i v_y o liczebności 1200 elementów dla każdego kierunku. Na podstawie ciągów wartości v_x obliczono w każdym punkcie wartość względnej intensywności turbulencji $\varepsilon = \frac{\sigma}{\bar{v}}$, gdzie σ jest odchyleniem standardowym od średniej wartości prędkości \bar{v} w punkcie.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Analizie poddano pomierzone na końcu każdego doświadczenia podłużne profile rozmytego dna (rys. 3) za umocnieniem o różnych długościach (L_u). Wzajemne położenie wykresów dla tych samych parametrów hydraulicznych strumienia, lecz różnych wartościach L_u świadczy o jednoznacznym wpływie długości umocnień na wielkość rozmycia.



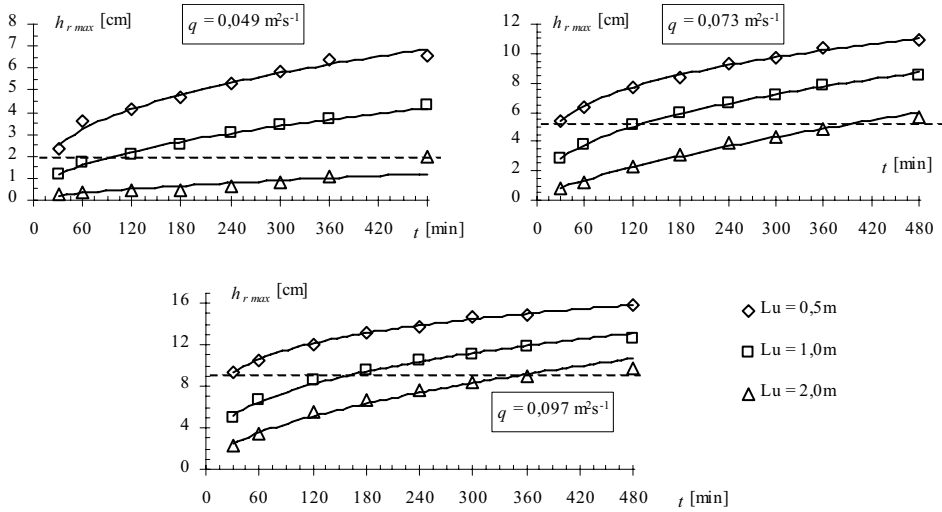
Rys. 3. Profile rozmytego dna za umocnieniem długości L_u po 480 min trwania przepływu
Fig. 3. Profiles of erosion for different length of bed protection L_u after 480 min during of flow

Wraz z wydłużaniem umocnień na modelu uzyskiwano w jednakowym czasie trwania przepływu mniejsze rozmiary rozmycia, zarówno pod względem głębokości h_{rmax} , jak i długości wyboju X_r . Po wydłużeniu umocnienia z 0,50 do 1,00 m uzyskano zmniejszenie maksymalnej głębokości wyboju (h_{rmax}) o 20–34%, w zależności od natężenia przepływu na modelu, a po wydłużeniu L_u do 2,00 m h_{rmax} zmniejszyła się nawet o 70% w doświadczeniach z przepływem $q = 0,049 \text{ m}^2/\text{s}$. Dla większych przepływów, tzn. $q = 0,073 \text{ m}^2/\text{s}$ i $q = 0,097 \text{ m}^2/\text{s}$, obserwowano mniejsze spłylenie rozmycia wraz z wydłużeniem umocnień od 0,50 do 2,00 m (o 40–50%).

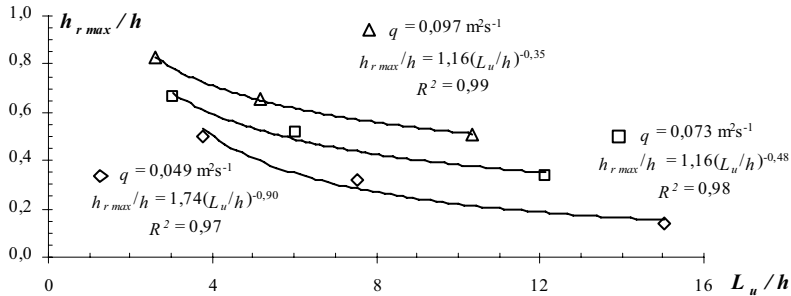
Na rysunku 4 przedstawiono zmienność maksymalnej głębokości wyboju (h_{rmax}) w czasie trwania przepływu. Maksymalna głębokość rozmycia po 30 min trwania przepływu na modelu z $L_u = 0,50 \text{ m}$ była w przybliżeniu równa głębokości ukształtowanej po 7–8 h za umocnieniem długości 2,00 m. Wydłużanie umocnień w dolnym stanowisku powoduje zatem spowolnienie procesu rozmycia w czasie.

Wyniki ośmiogodzinnych doświadczeń wykazały, że wydłużanie umocnień na modelu spowodowało ograniczenie zarówno maksymalnej głębokości wyboju (h_{rmax}) – rysunek 5, jak i głębokości rozmycia krawędziowego (h_s) – rysunek 6. Wykresy sporządzone w układzie współrzędnych bezwymiarowych, tzn. maksymalną głębokość wyboju (h_{rmax}), wielkość rozmycia krawędziowego (h_s) i długość umocnień (L_u) odniesiono do począt-

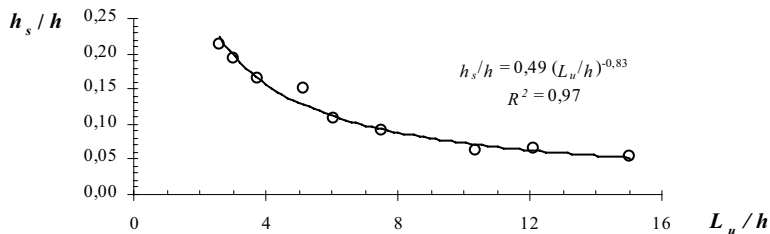
kowej głębokości strumienia (h) w dolnym stanowisku. Duże wartości współczynnika R^2 , podane na rysunkach 5 i 6, wskazują na istnienie ścisłej zależności między długością umocnień w dolnym stanowisku a rozmiarami miejscowego rozmycia.



Rys. 4. Zmienność maksymalnej głębokości rozmycia w czasie trwania przepływu na modelu
Fig. 4. Variability of maximum depth of scour during of flow

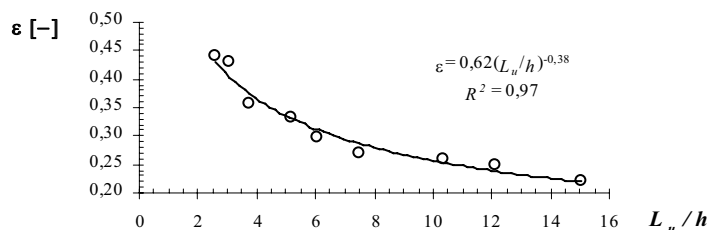


Rys. 5. Zmienność ilorazu $h_{r,max}/h$ z bezwymiarową długością umocnień L_u/h na modelu
Fig. 5. Variability of relation $h_{r,max}/h$ with dimensionless length of bed protection L_u/h on model



Rys. 6. Związek ilorazu h_s/h z bezwymiarową długością umocnień L_u/h
Fig. 6. Relation h_s/h with dimensionless length of bed protection L_u/h

Zjawisko spływania się dołu rozmycia, gdy zwiększają się długości umocnień dla tych samych parametrów przepływu (q , h , z), tłumaczone jest przez Żbikowskiego w pracy Dąbkowskiego i innych [1982] zmniejszaniem się burzliwości strumienia wraz z oddalaniem się od końca odskoku hydraulicznego utrzymywanego w niecce. Na rysunku 7 przedstawiono pomierzone i uśrednione w osiowym pionie na końcu umocnień wartości względnej intensywności turbulencji strumienia (ε). Krzywa na wykresie opisuje zależność stopnia burzliwości strumienia (ε) od bezwymiarowej długości umocnień L_u/h .



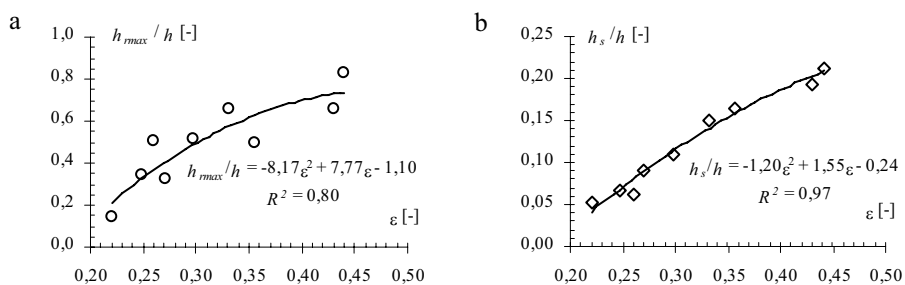
Rys. 7. Zależność $\varepsilon = f(L_u/h)$ uzyskana na podstawie wyników doświadczeń

Fig. 7. Relation $\varepsilon = f(L_u/h)$ base on results of experiments

Wyniki doświadczeń potwierdziły, że intensywność turbulencji maleje na długości strumienia za odskokiem hydraulicznym. Duża wartość współczynnika R^2 , wynosząca 0,97, świadczy o istnieniu ściślej zależności burzliwości strumienia na końcu umocnień od ich długości. Równania opisujące podobne zależności podali Dąbkowski i Urbański [2004] i Urbański [2006] po wykonaniu pomiarów charakterystyk turbulencji na długości strumienia w korycie z płaskim, poziomym i nierozmywalnym dnem za niecka wypadową.

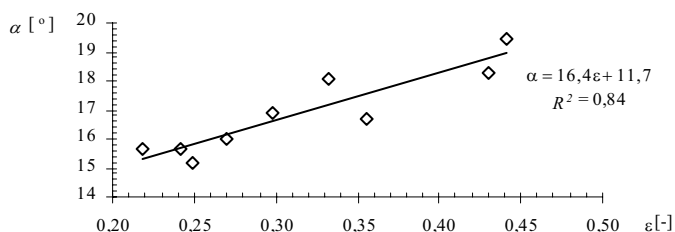
Wzmocniona turbulencja, charakteryzująca warunki przepływu za wypadem budowli piętrzącej, jest czynnikiem potęgującym proces erozji koryta rzecznoego [Breusers 1966, Popova 1985, Błażejewski 1989, Hoffmans i Booij 1993, Urbański 2005]. Duża zmienność prędkości chwilowej i duże pulsacje ciśnienia ułatwiają odrywanie ziaren gruntu od dna i ich przemieszczanie. Na podstawie wyników przeprowadzonych doświadczeń uzyskano zależność głębokości rozmycia od stopnia burzliwości strumienia na końcu umocnień. Wykresy na rysunku 8 przedstawiają związki rozmiarów rozmycia, tzn. jego maksymalnej głębokości (rys. 8a) i rozmycia krawędziowego (rys. 8b), z intensywnością turbulencji strumienia na końcu umocnień. Przebieg linii na wykresach wskazuje na wzrost głębokości wyboju wraz ze wzrostem stopnia burzliwości strumienia.

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 α , zawartego między prostą wyznaczającą poziome, nierozmyte dno a prostą łączącą krawędź końca umocnień z najniższym punktem profilu rozmycia (rys. 1). Na podstawie wyników doświadczeń wyznaczono wartości tego kąta i na rysunku 9 przedstawiono je w zależności od intensywności turbulencji na końcu umocnień. Wyniki, podobnie jak inni autorzy [Błażejewski 1989, Siwicki 2002], opisano funkcją liniową. Przebieg linii wykazuje, że wzrost burzliwości strumienia powoduje zwiększenie wartości kąta α , a zatem powoduje tworzenie się wyboju bliżej budowli, co



Rys. 8. Związek głębokości rozmyć z intensywnością turbulencji pomierzoną na końcu umocnień

Fig. 8. Relation between depth of local scour and intensity of turbulence measured on end of bed protection



Rys. 9. Wzrost miary kąta α wraz ze wzrostem intensywności turbulencji pomierzonej na końcu umocnień

Fig. 9. Increase of angle α with intensity of turbulence measured on end of bed protection

jest niepożądane z punktu widzenia stateczności obiektu. Zatem wydłużanie umocnień, powodujące zmniejszanie się stopnia burzliwości strumienia na ich końcu, zapewnia tym samym korzystniejszy kształt dołu rozmycia i oddalenie jego maksymalnej głębokości od budowli.

WNIOSKI

Analiza wyników doświadczeń nad kształtowaniem się rozmyć miejscowych na modelu jazu z wpływem wody spod zasuw, niekłą do rozpraszania energii i umocnieniem dna o zmiennej długości w dolnym stanowisku umożliwiła sformułowanie następujących wniosków:

1. Wydłużanie umocnień dna w dolnym stanowisku, przy zachowaniu niezmiennych hydraulicznych parametrów strumienia i czasu trwania przepływu na modelu, wpływało na ograniczenie rozmiarów rozmycia. Dotyczy to zarówno głębokości, jak i długości wyboju. Wpływ ten bardziej uwidaczniał się przy niższych natężeniach przepływu.

2. Wydłużanie umocnień dolnego stanowiska powoduje spowolnienie rozwoju rozmycia w czasie. Przy czterokrotnym zwiększeniu długości umocnień na modelu ukształtowanie tej samej głębokości wyboju (h_{rmax}) następowało po szesnastokrotnym wydłużeniu czasu trwania przepływu.

3. Zjawisko spłykania się dołu rozmycia z wydłużaniem umocnień dla tych samych parametrów przepływu (q , h , z) jest skutkiem zmniejszania się burzliwości strumienia wraz ze zmienną odległością od końca odskoku hydraulicznego utrzymywanego w niecce. Czterokrotne wydłużenie umocnień na modelu powodowało około pięćdziesięcioprocentową redukcję względnej intensywności turbulencji na ich końcu. Malejącej burzliwości strumienia na końcu umocnień towarzyszy zmniejszanie się kąta α nachylenia stoku wyboju od strony budowli. Jest to korzystne z punktu widzenia stateczności obiektu.

PIŚMIENNICTWO

- Błażejowski R., 1989. Prognozowanie rozmyć miejscowych gruntów niespoistych poniżej budowli upustowych. Rocznik Akademii Rolniczej w Poznaniu, Rozprawy naukowe, 190.
- Breusers H.N.C., 1966. Conformity and time scale in two-dimensional local scour. Proc. Symp. on Model and Prototype Conformity. Hydr. Res. Lab. Poona, India.
- Čertousov M.D., 1962. Gidravlika – specjalny kurs. Gosudarstvennoje Energetičeskoje Izdatelstwo, Moskva, Leningrad.
- Dąbkowski Sz.L., Urbański J., 2004. Intensywność turbulencji strumienia za odskokiem hydraulicznym. Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska 1 (28), 5–12.
- Dąbkowski Sz.L., Skibiński J., Żbikowski A., 1982. Hydrauliczne podstawy projektów wodnolioracyjnych. PWRiL, 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, Moskva.
- Popova K.S., 1985. Rasčët izmenenija głubiny mestnych razmyvov za plotinami vo vremeni. Izvestia VNIIG, 119.
- Siwicki P., 2002. Analiza wpływu skali modelu i uziarnienia materiału dennego na kształtowanie się w warunkach laboratoryjnych rozmyć koryta poniżej jazu. Maszynopis. Rozprawa doktorska, Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW, Warszawa.
- Urbański J., 2003. Mechanizm tworzenia się rozmyć za jazem w świetle eksperymentalnych badań modelowych. Maszynopis. Rozprawa doktorska, Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW, Warszawa.
- Urbański J., 2005. Związek charakterystyk turbulencji strumienia z głębokością rozmycia za jazem. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych 506, Kształtowanie Środowiska.
- Urbański J., 2006. Intensywność turbulencji strumienia za odskokiem hydraulicznym na dwóch modelach jazu [w:] Problemy hydrotechniki – Modelowanie i hydroinformatyka oraz wybrane zagadnienia ochrony przeciwpowodziowej. Red. St. Kostecki. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław.
- Żbikowski A., 1970. Badania laboratoryjne zależności głębokości rozmycia poniżej przelewu od długości umocnień i czasu trwania doświadczenia. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa.

LOCAL SCOUR ON MODEL OF WEIR WITH CHANGING LENGTH OF BED PROTECTION IN DOWNSTREAM

Abstract. In paper is presented investigation results of scour in downstream of weir for different length of bed protection. Investigations were conducted on model taired construction with the over of water above the gate, with stilling pool and horizontal bed protection

about lengths 50, 100 and 200 cm. Model was made in geometrical scale 1 : 30. As eroded material in experiments was used sand, $d_{50} = 1,1$ mm, $(d_{84}/d_{16})^{0,5} = 1,77$. Increase length of bed protection in downstream influence on slow down of scouring process, what is due of decrease turbulence intensity of stream below hydraulic jump. For longer bed protection obtained smaller upstream slope of the scour hole and further location place of occurrence maximum depth of scour. Reduction maximum scour depth and the upstream slope of the scour hole minimise the risk of weir failure.

Key words: weir, local scour, turbulence of flow

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 22.02.2007