

WPLYW TURBULENCJI STRUMIENIA NA ROZMIARY LOKALNEGO ROZMYCIA NA MODELU JAZU

Janusz Urbański

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki laboratoryjnych badań rozmyć na modelu jazu z płaskim zamknięciem zasuwowym, niekłą do rozpraszania energii i poziomym, płaskim umocnieniem dna w dolnym stanowisku. Długość umocnionego dna była zmienna i wynosiła 0,50, 1,00 i 2,00 m. Model wykonany był w korycie o przekroju prostokątnym szerokości 1,0 m. Jako materiał rozmywalny wykorzystano piasek sortowany ($d_{50} = 1,1$ mm). W trakcie doświadczeń wykonywano pomiary głębokości rozmycia i chwilowych wartości prędkości w przekroju na końcu umocnień. Wyniki doświadczeń umożliwiły dokonanie oceny wpływu wartości wybranych charakterystyk turbulencji strumienia na rozmiary tworzącego się rozmycia. Wydłużanie umocnień dna w dolnym stanowisku zapewnia redukcję turbulencji strumienia, a tym samym powoduje spowolnienie rozwoju rozmycia w czasie i ograniczenie rozmiarów wyboju.

Słowa kluczowe: modelowanie fizyczne, jaz, lokalne rozmycie

WSTĘP

Strumień w dolnym stanowisku budowli piętrzącej charakteryzuje się wzmożoną burzliwością. Jest to następstwem procesów zachodzących na wypadzie nazywanych ogólnie rozpraszaniem energii. Ponadto po przejściu strumienia przez odskok hydrauliczny następuje zwiększenie wartości prędkości w pobliżu dna [Bogomolov i Michajlov 1965]. Wartości charakterystyk turbulencji i prędkości przy dnie maleją wraz z odległością od końca odskoku, co wykazały liczne wyniki badań [Kališ 1961, Wu i Rajaratnam 1996, Urbański 2006]. Poniżej budowli piętrzącej redukcja burzliwości przepływu w dużym stopniu następuje na odcinku umocnionego dna za wypadem, lecz w związku z ograniczoną jego długością w końcowym przekroju umocnień strumień

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

nadal charakteryzuje się podwyższoną turbulencją. Następstwem tego jest nasilenie się procesów erozji koryta rzeki i powstawanie lokalnych rozmyć za jazem. Procesy te nie są pożądane z punktu widzenia utrzymania stabilności koryta rzeki i zapewnienia stateczności budowli.

Bezpośredni wpływ wartości charakterystyk turbulencji przepływu na przebieg procesu rozmywania dna w czasie i ostateczne rozmiary rozmycia nie jest ostatecznie rozpoznany. Pomiary charakterystyk prędkości nad rozmywanym dnem są kłopotliwe. Wymagają użycia przyrządów o dużej dokładności i jednocześnie odpornych na uderzenia wynoszonych z wyboju ziaren gruntu. Podczas doświadczenia w korycie z dnem rozmywanym zmienia się głębokość i kształt rozmycia, a więc zmianie w czasie ulegają podstawowe parametry przepływu w obszarze wyboju. Uniemożliwia to uzyskiwanie wiarygodnych wyników pomiarów prędkości. W związku z tymi trudnościami badacze wiążą rozmiary rozmycia z parametrami turbulencji strumienia pomierzonymi na końcu umocnień, tzn. w przekroju bezpośrednio poprzedzającym wybój [Popova 1985, Błażejewski 1989, Hoffmans i Booi 1993, van der Meulen i Viñje (za: Przedwojskim i in. 1995)].

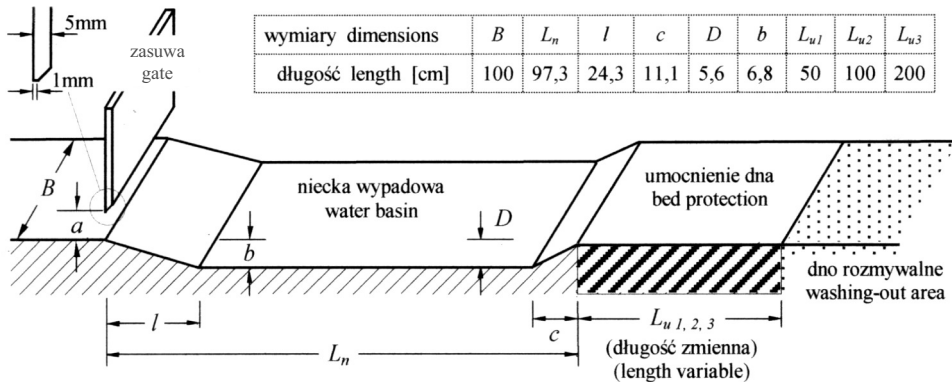
W pracy przedstawiono wyniki laboratoryjnych badań rozmyć na modelu jazu. W trakcie doświadczeń wykonywano pomiary głębokości rozmycia w osiowej płaszczyźnie modelu po określonym czasie trwania przepływu oraz rejestrowano wartości chwilowe prędkości na końcu umocnień, których długość była zmienna. Pomiary prędkości umożliwiły rozpoznanie wartości charakterystyk turbulencji w przekroju bezpośrednio poprzedzającym rozmywane dno, a w wyniku zastosowania zmiennej długości umocnień uzyskiwano różne wartości charakterystyk burzliwości przepływu w ich końcowym przekroju. Na podstawie wyników doświadczeń dokonano oceny wpływu charakterystyk turbulencji strumienia na rozmiary tworzących się rozmyć.

METODYKA BADAŃ

Doświadczenia na fizycznym modelu jazu przeprowadzono w laboratorium hydraulicznym SGGW. Schemat modelu przyjęto za Żbikowskim [1970] i wraz z podstawowymi wymiarami przedstawiono na rysunku 1.

Był to model jazu z płaskim zamknięciem zasuwowym, niecką do rozpraszania energii i poziomym, sztywnym umocnieniem dna za wypadem. Strumień wody wypływał spod zasuw, a w niecce powstawał i utrzymywany był zatopiony odskok hydrauliczny. Umocnienie dna w dolnym stanowisku miało zmienną długość (L_u), która wynosiła 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. Model wykonany był w korycie o przekroju prostokątnym szerokości 1,00 m.

Doświadczenia przeprowadzono dla trzech natężeń przepływu (Q), którym odpowiadały określone napełnienia koryta w stanowisku górnym (H) i dolnym (h) – tabela 1. Położenie zwierciadła wody dolnej utrzymywane było za pomocą kłapy zainstalowanej na końcu modelu, a wody górnej za pomocą zasuw piętrzącej, podnoszonej na wysokość a podczas każdego doświadczenia (rys. 1).



Rys. 1. Schemat modelu jazu wraz z podstawowymi wymiarami

Fig. 1. Schema of weir model with base dimensions

Tabela 1. Hydrauliczne parametry przepływów w doświadczeniach na modelu

Table 1. Hydraulic parameters of flow during of experiments in model

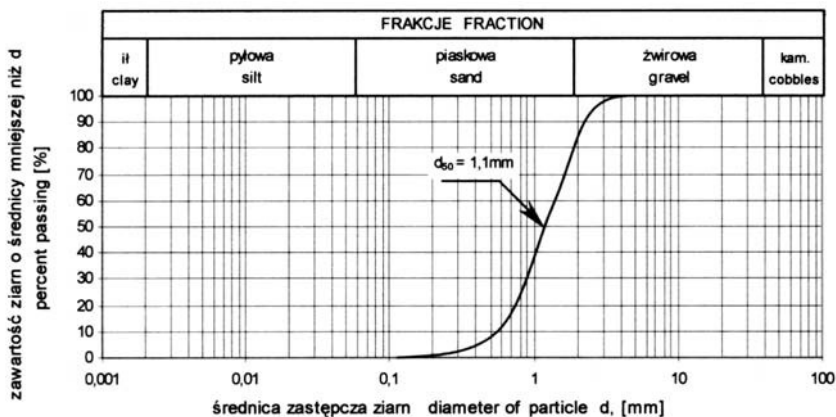
Q	q = Q/B	H	h	a	h ₁	h ₂	σ _z
m ³ ·s ⁻¹	m ² ·s ⁻¹	m	m	m	m	m	–
0,049	0,049	0,417	0,133	0,033	0,020	0,157	1,22
0,073	0,073	0,445	0,165	0,049	0,030	0,190	1,18
0,097	0,097	0,462	0,193	0,065	0,040	0,219	1,15

Za pierwszą głębokość sprzężoną (h_1) przyjęto najmniejszą głębokość strumienia za zasuwa, nazywaną przez Čertousova [1962] głębokością zdławioną i obliczaną jako $h_1 = \epsilon a$, gdzie ϵ jest współczynnikiem dławienia. Jego wartość zawarta w przedziale (0,615–0,69) uzależniona jest przez Żukowskiego [Kiselev 1974] od stosunku a/H . Drugą głębokość sprzężoną (h_2) obliczono z równania:

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

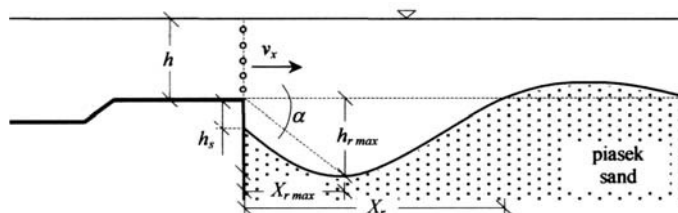
Jako współczynnik zatopienia odskoku hydraulicznego (σ_z), zgodnie z zaleceniami praktycznymi [Dąbkowski i in. 1982], przyjęto stosunek: $\sigma_z = \frac{h + d + \Delta z}{h_2}$. Wartość Δz , nazywaną spiętrzeniem strumienia na wypływie z niecki, oblicza się jako $\Delta z = \frac{v_h^2 - v_2^2}{2g}$,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

Doświadczenia polegały na formowaniu rozmycia za betonowym umocnieniem, gdzie dno koryta wypełnione było piaskiem sortowanym o krzywej uziarnienia przedstawionej na rysunku 2. Czas trwania przepływu wynosił 480 minut. Podłużne profile rozmytego dna mierzono w osiowej płaszczyźnie koryta po czasie: 30, 60, 120, 180, 240,



Rys. 2. Krzywa uziarnienia materiału rozmywalnego na modelu

Fig. 2. Granulation of sand used on the model



Rys. 3. Analizowane parametry charakteryzujące rozmycie

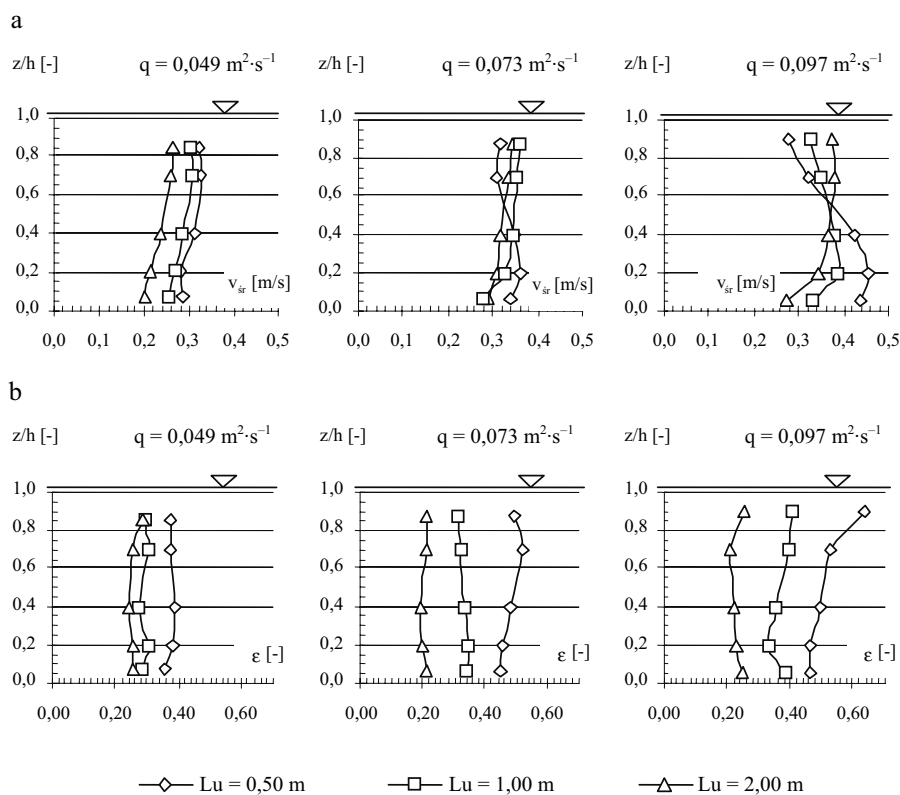
Fig. 3. The analysed parameters of scour

300, 360 i 480 minut od początku doświadczenia. Parametry rozmyć poddane analizom przedstawiono na rysunku 3.

W trakcie doświadczeń wykonywano także pomiary poziomych składowych wektora prędkości: v_x i v_y (podłużnej i poprzecznej), w osiowym pionie na końcu umocnień. Wykorzystano elektrosondę PEMS, rejestrującą wyniki z częstotliwością 0,1 s. Pomiary wykonano w pięciu punktach pionu rozmieszczonych następująco: p_1 w odległości 1 cm nad dnem, p_2 na wysokości $0,2 h$ nad dnem, $p_3 - 0,5h$, $p_4 - 0,7h$, a p_5 na głębokości 2 cm pod zwierciadłem wody. Czas pomiaru prędkości w każdym punkcie wynosił 120 s. Rejestrowane były ciągi wartości v_x i v_y o liczebności 1200 elementów dla każdego kierunku. Na podstawie ciągów wartości chwilowych (v_x) obliczono w każdym punkcie średnią prędkość (v_{sr}) i względną intensywność turbulencji $\varepsilon = \frac{\sigma}{v_{sr}}$, gdzie σ jest odchyleniem standardowym.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Na rysunku 4 przedstawiono rozkłady prędkości i względnej intensywności turbulencji, pomierzone w osiowym pionie na końcu umocnień długości L_u . Kształt tachoid (rys. 4a) zmieniał się wraz z długością umocnień, a najwyraźniej było to widoczne



Rys. 4. Rozkłady prędkości (a) i intensywności turbulencji (b) w osiowym pionie na końcu umocnień

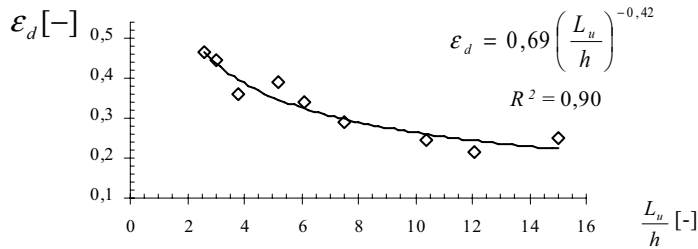
Fig. 4. Profiles of velocity (a) and turbulence intensity (b) in vertical axis on the end of the bed protection

w doświadczeniach z przepływem $q = 0,097 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Na końcu umocnień długości 0,50 i 1,00 m maksymalna prędkość występowała na głębokości większej od połowy napełnienia koryta (h), co było związane z przemieszczaniem się strumienia tranzytowego w pobliżu dna. Wraz z wydłużaniem umocnień malała prędkość przy dnie, a maksymalna wartość w pionie zbliżała się do zwierciadła wody, co typowe jest dla tzw. przejściowego odcinka przepływu za odskokiem hydraulicznym [Wu i Rajaratnam 1996]. Na podstawie położenia względem siebie linii na wykresach przedstawiających rozkłady względnej intensywności turbulencji (ϵ – rys. 4b) stwierdzić można, że burzliwość strumienia zmniejszała się wraz z wydłużaniem umocnień.

Badanym bezwzględnym długościom umocnień (L_u) odpowiadały długości względne odniesione do głębokości wody nad płytą umocnienia (h), zebrane w tabeli 2. Zmniejszanie się stopnia burzliwości strumienia w końcowym przekroju umocnień wraz z ich wydłużaniem widać na rysunku 5. Wartości względnej intensywności turbulencji (ϵ_d) pomierzone w punktach położonych w odległości 1 cm nad dnem na końcu umocnień uzależniono od bezwymiarowej długości umocnień L_u/h .

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
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



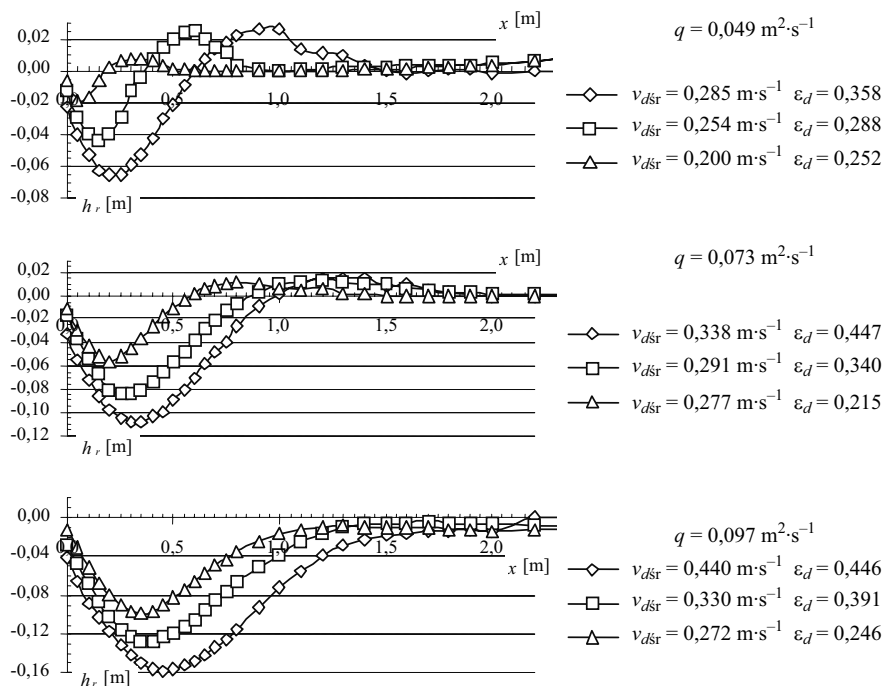
Rys. 5. Zależność $\varepsilon_d = f\left(\frac{L_u}{h}\right)$ uzyskana na podstawie wyników doświadczeń

Fig. 5. The relationship $\varepsilon_d = f\left(\frac{L_u}{h}\right)$ obtained on the basis of laboratory tests

Wyniki pomiarów opisano równaniem o ogólnej postaci $\varepsilon_d = k\left(\frac{L_u}{h}\right)^m$, gdzie k i m są współczynnikami liczbowymi wyznaczonymi statystycznie. Duża wartość współczynnika R^2 , wynosząca 0,90, świadczy o istnieniu ścisłego związku burzliwości strumienia mierzonej na końcu umocnień z ich długością. 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 nieką wypadową.

Na rysunku 6 przedstawiono pomierzone po 480 minutach trwania przepływu podłużne profile rozmyć dna w dolnym stanowisku, uformowane w wyniku przepływu strumienia o natężeniu przepływu (q), prędkości przy dnie na końcu umocnień równej ($v_{d\&sr}$) i względnej intensywności turbulencji (ε_d). Wzajemne położenie profili rozmyć dla określonego q i różnych wartości ($v_{d\&sr}$) i ε_d jednoznacznie świadczy o zmniejszaniu się rozmiarów wyboju wraz ze spadkiem wartości tych charakterystyk turbulencji. Po jednakowym czasie trwania przepływu uzyskiwano mniejsze rozmiary rozmycia, zarówno pod względem głębokości ($h_{r\&max}$), jak i długości wyboju (X_r).

Zmienność maksymalnej głębokości wyboju ($h_{r\&max}$) w czasie trwania przepływu w doświadczeniach przedstawiono na rysunku 7. Przy mniejszych wartościach charakterystyk turbulencji strumienia na końcu umocnień obserwowano powolniejszy rozwój rozmycia w czasie. W doświadczeniach z przepływem $q = 0,073 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ maksymalna głęboko-



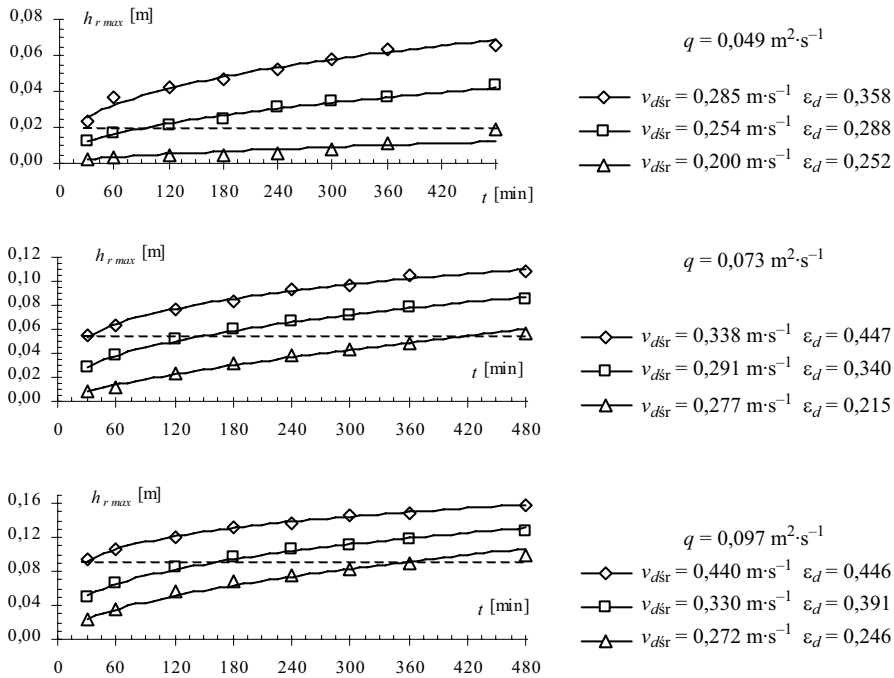
Rys. 6. Profile rozmytego dna po 480 minutach trwania przepływu na modelu (v_{dsr} , ϵ_d – wartości charakterystyk turbulencji na końcu umocnień)

Fig. 6. Profiles of scour after 480 minutes of flow on the model (v_{dsr} , ϵ_d – values of turbulence characteristics on the end of the bed protection)

kość rozmycia ukształtowanego przez strumień o względnej intensywności turbulencji na końcu umocnień równej 0,447 po 0,5 h była w przybliżeniu równa h_{rmax} ukształtowanej w czasie 8 h przez strumień o stopniu burzliwości (ϵ_d) zredukowanym do 0,215. Podobna zależność występowała w doświadczeniach z przepływem $q = 0,097 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

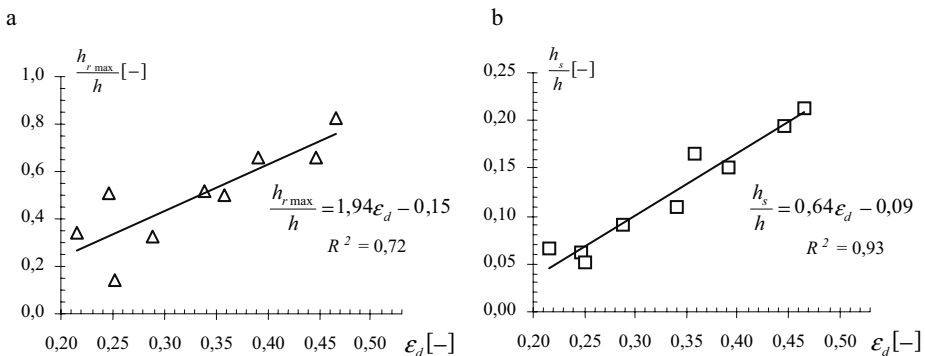
Na podstawie wyników doświadczeń podjęto próbę opracowania związku rozmiarów rozmycia z intensywnością turbulencji strumienia (ϵ_d) na końcu umocnień. Wykresy na rysunku 8 sporządzono we współrzędnych bezwymiarowych. Maksymalną głębokość wyboju (h_{rmax} – rys. 8a) i wielkość rozmycia krawędziowego (h_s – rys. 8b) odniesiono do głębokości strumienia (h) nad płytą umocnienia. Bezwymiarowe głębokości rozmycia uzależniono od stopnia burzliwości strumienia (ϵ_d) na końcu umocnień, wykorzystując równanie funkcji liniowej. Przebieg linii na wykresach wskazuje na wzrost głębokości wyboju wraz ze wzrostem stopnia burzliwości strumienia. Większą siłę związku ($R^2 = 0,93$) uzyskano w przypadku głębokości rozmycia krawędziowego (h_s – rys. 8b).

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 zawartego między prostą wyznaczającą poziome, nierozmyte dno a odcinkiem łączącym krawędź końca umocnień z punktem położonym



Rys. 7. Zmienność maksymalnej głębokości rozmycia w czasie trwania przepływu

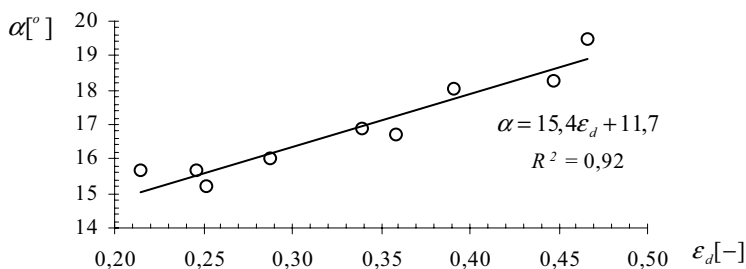
Rys. 7. Variability of maximum depth scour during the experiments



Rys. 8. Związek głębokości rozmycia z intensywnością turbulencji na końcu umocnień

Fig. 8. The relationship between depth of scour and turbulence intensity measured on the end of the bed protection

w miejscu występowania maksymalnego rozmycia (rys. 3). Na podstawie wyników doświadczeń wyznaczono wartości tego kąta i na rysunku 9 przedstawiono je w zależności od intensywności turbulencji (ϵ_d) na końcu umocnień. Wyniki, podobnie do innych autorów [Błażejowski 1989, Siwicki 2005], opisano funkcją liniową, uzyskując wartość współczynnika $R^2 = 0,92$. Przebieg linii wykazuje, że wzrost burzliwości strumienia po-



Rys. 9. Przyrost miary kąta α z intensywnością turbulencji na końcu umocnień

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

woduje zwiększenie wartości kąta α , a zatem powoduje tworzenie się wyboju bardziej przysuniętego do budowli, co jest niepożądane z punktu widzenia oceny stateczności obiektu.

WNIOSKI

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

1. Burzliwość strumienia, która liczbowo wyrażona może być między innymi za pomocą względnej intensywności turbulencji (ε), jest istotnym czynnikiem wpływającym na rozmiary lokalnego rozmycia.

2. Wydłużanie umocnień koryta w dolnym stanowisku zapewnia redukcję charakterystyk turbulencji strumienia dopływającego na rozmywalne dno, a tym samym powoduje spowolnienie rozwoju rozmycia w czasie, ograniczenie intensywności erozji koryta i rozmiarów wyboju. Zapewnia jednocześnie zmniejszenie kąta (α) nachylenia stoku wyboju od strony budowli, co jest korzystne z punktu widzenia zachowania jej stateczności.

PIŚMIENNICTWO

- Błażejowski R., 1989. Prognozowanie rozmyć miejscowych gruntów niespoistych poniżej budowli upustowych. Rocznik Akademii Rolniczej w Poznaniu, Rozprawy naukowe, Zeszyt 190. Wydawnictwo AR, Poznań.
- Bogomolov A.I., Michajlov K.A., 1965. Gidravlika. Izdatielstvo S.I., Moskva.
- Čertousov M.D., 1962. Gidravlika – specjalny kurs. Gosudarstvennoje Energetičeskoje Izdatelstvo, 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 wodnoinżynierskich. 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.
- Kališ J., 1961. Diminution de la turbulence derriere le ressaut. Rapport 111 IX Congres de IAHR, Dubrownik.
- Kiselev P.G., 1974. Spravočnik po gidravličeskim rasčeta. Energia, Moskva.
- Popova K.S., 1985. Rasčet izmenenia głubiny mestnych razmyvov za plotinami vo vremeni. Izvestia VNIIG, 119, 66–73.
- Przedwojski B., Błażejowski R., Pilarczyk K.W., 1995. River training techniques – fundamental, design and application. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- Siwicki P., 2005. Analiza geometrii rozmycia koryta poniżej jazu w warunkach laboratoryjnych. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych PAN 506, Kształtowanie Środowiska, 373–382.
- 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, 363–370.
- 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.

INFLUENCE OF TURBULENCE OF FLOW ON SIZES LOCAL SCOUR ON WEIR MODEL

Abstract. The paper presents the results of laboratory analysis of local scour in weir model with spillway, water basin and bed protection in downstream. The length of the bed protection was variable and was 0.50, 1.00, 2.00 m equal. The weir model was made in rectangular hydraulic channel which was 1.0 m wide. As a material to be eroded the sorted sand with $d_{50} = 1.1$ mm was used. During the experiments the measurement of the depth of the scour and velocity in cross section of the end of bed protection was made. The results of laboratory tests enable to estimate the influence of turbulence characteristics for the size of local scour. Extending of bed protection zone downstream of structure providing reduction of flow turbulence and by this – slowing down of erosion process in time and limitation dimension of local scour.

Key words: physical modeling, weir, local scour

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 15.06.2008