

ZWIĄZEK CHARAKTERYSTYK TURBULENCJI STRUMIENIA Z GŁĘBOKOŚCIĄ ROZMYCIA ZA JAZEM

Janusz Urbański

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

Wstęp

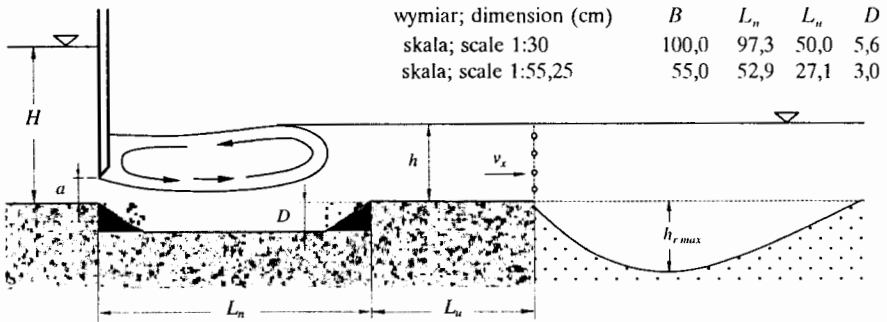
Rozmycie za jazem powstaje w wyniku oddziaływania strumienia o zaburzonej strukturze i podwyższonej turbulencji na ukształtowane w gruncie dno koryta. Intensywność procesu rozmywania w czasie trwania przepływu oraz rozmiary wyerodowanego dołu zależą od wielu czynników, spośród których największe znaczenie mają: jednostkowe natężenie przepływu q , wysokość piętrzenia z , początkowa głębokość strumienia h w dolnym stanowisku, miarodajna średnica ziarna gruntu podłoża d i liczba Froude'a Fr . Te parametry najczęściej występują we wzorach na maksymalną głębokość wyboju $h_{r, max}$. Rzadko natomiast w tych równaniach uwzględniane są charakterystyki turbulencji strumienia, gdyż trudno jest bezpośrednio określić wpływ stopnia burzliwości przepływu na przebieg procesu i rozmiary dołu rozmycia. Pomiarów charakterystyk prędkości nad rozmywanym dnem są kłopotliwe. Wymagają użycia przyrządów o dużej dokładności i jednocześnie odpornych na uderzenia wynoszonych z wyboju ziaren gruntu. Podczas prowadzenia doświadczenia zmienia się głębokość i kształt dołu rozmycia, a więc zmieniają w czasie ulegają podstawowe parametry przepływu w obszarze wyboju. Uniemożliwia to uzyskiwanie wiarygodnych wyników pomiarów. W związku z tymi trudnościami niektórzy badacze wprowadzają do wzorów na rozmiary rozmycia parametry turbulencji strumienia pomierzone na końcu umocnień, tzn. w przekroju bezpośrednio poprzedzającym wybój [BREUSERS 1966; POPOVA 1970; BŁĄZEJEWSKI 1989; HOFFMANS, BOOIJ 1993; VAN DER MEULEN i VIÑJE (za PRZEDWOJSKI i in. 1995)]. Spotykane w literaturze zależności mają ograniczony zakres stosowania do warunków, w jakich prowadzono doświadczenia.

W pracy przedstawiono wyniki laboratoryjnych badań modelowych rozmyć tworzących się za jazem w wyniku przepływu strumienia o wzmożonej burzliwości. W trakcie doświadczeń dokonywano pomiarów maksymalnej głębokości wyboju, ukształtowanej w osi modelu w określonym czasie trwania przepływu z jednoczesnym rejestrowaniem wartości chwilowych prędkości na końcu umocnień. Pomiarów prędkości umożliwiły rozpoznanie zmienności charakterystyk turbulencji w przekroju bezpośrednio poprzedzającym rozmywane dno w czasie kształtowania się wyboju. W oparciu o wyniki przeprowadzonych doświadczeń i formuły zaczerpnięte z literatury opracowano propozycje równań opisujących związek

maksymalnej głębokości wyboju z turbulentnymi charakterystykami strumienia na końcu wypadu.

Modele badawcze i metodyka doświadczeń

Laboratoryjne badania rozmyć przeprowadzono na modelach jazu z zamknięciem płaskim – zasuwą, niecką i sztywnym umocnieniem (rys. 1). Strumień wody wypływał spod zasuwy podnoszonej na wysokość a , w niecce powstawał zatopiony odskok hydrauliczny, a za umocnieniem na odcinku koryta wypełnionym piaskiem kształtował się dół rozmycia [URBAŃSKI 2003]. Modele wykonane były w dwóch skalach geometrycznych: 1:30 i 1:55,25 i zbudowane w korytach prostokątnych o szerokości B . Parametry hydrauliczne przepływów w doświadczeniach (tab. 1) modelowano w oparciu o kryterium podobieństwa Froude'a. Dla odpowiadających sobie par przepływów na obu modelach wartości bezwymiarowej liczby Fr_d strumienia w stanowisku dolnym są jednakowe.



Rys. 1. Schemat modelu badawczego i podstawowe wymiary
Fig. 1. Schema of investigated model and basic dimensions

Tabela 1; Table 1

Parametry hydrauliczne przepływu podczas doświadczeń na modelach
Hydraulic parameters of flow during experiments on models

q ($m^2 \cdot s^{-1}$)	a (m)	H (m)	h (m)	Fr_d (-)
Model w skali; Model in scale 1: 30				
0,049	0,033	0,417	0,133	0,11
0,073	0,049	0,445	0,165	0,12
0,097	0,065	0,462	0,193	0,13
Model w skali; Model in scale 1: 55,25				
0,020	0,021	0,217	0,072	0,11
0,030	0,031	0,230	0,090	0,12
0,039	0,041	0,240	0,105	0,13

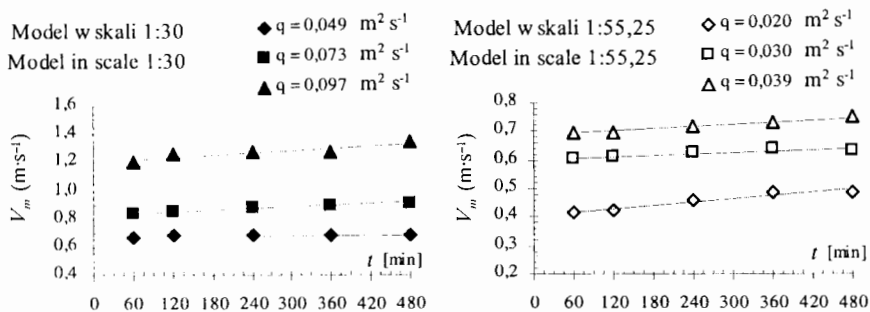
Eksperymenty polegały na formowaniu dołu rozmycia za wypadem przez strumień o zadanych parametrach hydraulicznych. W ich trakcie dokonywano

pomiarów maksymalnej głębokości wyboju, ukształtowanej w osi modelu w określonym czasie trwania przepływu i jednocześnie rejestrowano wartości chwilowe prędkości w osiowym pionie przekroju na końcu umocnień (rys. 1). Głębokość wyboju $h_{r,max}$ i chwilową prędkość w wybranym pionie mierzono po upływie 60, 120, 240, 360 i 480 minut od początku doświadczenia. Na obu modelach wykorzystano jeden materiał rozmywalny – piasek kalibrowany o $d_{50} = 1,1$ mm.

Do pomiarów prędkości wykorzystano elektrosondę PEMS rejestrującą chwilowe wartości poziomych składowych prędkości v_x i v_y z częstotliwością 0,1 s. Pomiary w pionie wykonywano w czterech punktach zanurzonych na głębokościach 0,9h, 0,7h, 0,5h i 0,2h pod zwierciadłem wody. W każdym punkcie rejestrowano wartości v_x i v_y w czasie 120 s. Analizom poddano tylko wyniki pomiarów podłużnej składowej prędkości v_x .

Wyniki i ich analiza

Parametrem charakteryzującym stopień turbulencji strumienia, używanym przez wielu badaczy [POPOVA 1970; ROZANOV 1984; VAN DER MEULEN, VIÑE (za PRZEDWOJSKI i in. 1995)] jest maksymalna prędkość pulsacyjna v_m obliczana jako: $\bar{v}_m = \bar{v} + 3\sigma$, gdzie: \bar{v} i σ oznaczają odpowiednio prędkość średnią i odchylenie standardowe tzn. intensywność turbulencji w przekroju bezpośrednio poprzedzającym rozmycie. Na obu modelach pomiar wartości chwilowych prędkości wykonywano tylko w osiowym pionie w przekroju poprzedzającym wybój. W oparciu o wyniki pomiarów wykonano obliczenia średnich wartości v_m w analizowanym pionie i wykazano, że wartość tej charakterystyki burzliwości strumienia nieznacznie rośnie wraz z pogłębianiem się wyboju w czasie (rys. 2).



Rys. 2. Zmienność maksymalnej prędkości pulsacyjnej v_m na końcu umocnień wraz z rozwojem rozmycia w czasie

Fig. 2. Variability of maximum turbulence of velocity v_m on the end of bed protection during development of erosion in time

Do opisu wyników pomiarów $h_{r,max}$ na badanych modelach wykorzystano ogólną postać związku podaną przez POPOVA [1985]:

$$h_{r,max} = \frac{v_m h_{kr}}{v_n} \left(\alpha \log \frac{v_m t}{h} - \beta \right), \quad (1)$$

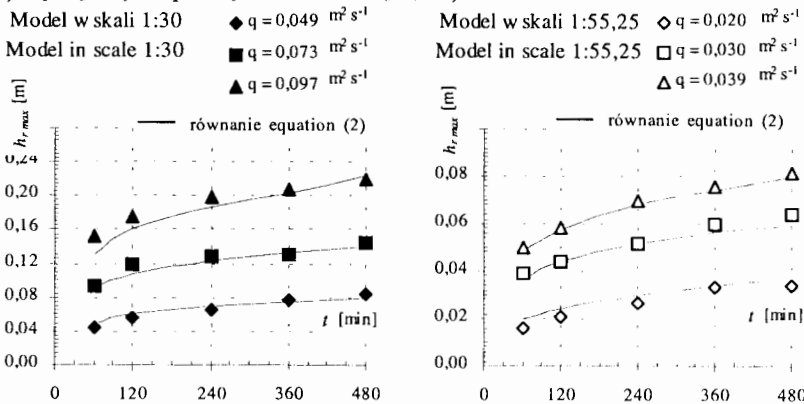
gdzie:

- v_n – prędkość nierozmywająca dla cząstek materiału dennego ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),
 h_{sr} = $(q^2 g^{-1})^{1/3}$ – głębokość krytyczna (m),
 v_m = $\bar{v} + 3\sigma$ – maksymalna prędkość pulsacyjna na końcu umocnień ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),
 t – czas trwania przepływu (min),
 h – głębokość strumienia na końcu umocnień (m),
 α, β – współczynniki liczbowe.

W oparciu o wyniki doświadczeń przeprowadzono obliczenia statystyczne metodą estymacji Marquardta wykorzystując standardowy program „Statgraphics” i wyznaczono wartości współczynników α i β do formuły (1). W rezultacie uzyskano równanie:

$$h_{r\max} = \frac{v_m h_{kr}}{v_n} \left(0,24 \log \frac{v_m t}{h} - 0,67 \right) \quad (2)$$

Prędkość v_n obliczono ze wzoru GONČAROVA [za: DĄBKOWSKIM i in. 1982]. Równanie (2) ważne jest dla warunków, w jakich przeprowadzono eksperymenty i w dość dobrym stopniu opisuje wyniki pomiarów $h_{r\max}$ (rys. 3), na co wskazują wartości podstawowych miar statystycznych charakteryzujących siłę związku: względny błąd różnicowy (WBR), stosunek wartości średnich (SWS), współczynnik korelacji (R), specjalny współczynnik korelacji (RS) zamieszczone w tabeli 2.



Rys. 3. Maksymalna głębokość rozmycia: pomierzona na modelach i obliczona wzorem (2)

Fig. 3. Maximum depth of scour measured on models and calculated on the base of equation (2)

Wykorzystano również ogólną postać formuły podanej przez VAN DER MEULENA i VIÑJE [za: PRZEDWOJSKIM i in. 1995]:

$$h_{r\max} = \frac{(v_m - \bar{v})^k h^m t^n}{x \delta^y} \quad (3)$$

w której:

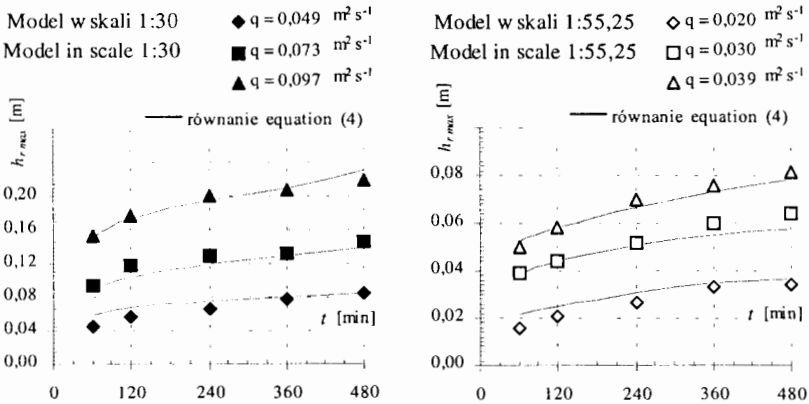
$$\delta = \frac{(\rho_r - \rho_w)}{\rho_w} \text{ – gęstość względna materiału dennego, tzn.:$$

- ρ_r – gęstość materiału dennego ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$),
 ρ_w – gęstość wody ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
 v_m, \bar{v}, h, t – jak poprzednio,
 k, m, n, x, y – współczynniki liczbowe.

Na podstawie wyników przeprowadzonych doświadczeń wykonano obliczenia statystyczne jak wyżej, wyznaczając wartości współczynników k , m , n i uzyskano równanie:

$$h_{r,max} = 0,5(v_m - v)^{0,79} h^{0,94} t^{0,146} \tag{4}$$

opisujące w dość dobrym stopniu wyniki pomiarów $h_{r,max}$ na obu modelach (rys. 4). Wskazują na to wartości miar statystycznych zamieszczone w tabeli 2. W równaniu (4) pominięto względną gęstość materiału dennego δ , gdyż doświadczenia przeprowadzono tylko dla jednego materiału rozmywalnego.



Rys. 4. Maksymalna głębokość rozmycia: pomierzona na modelach i obliczona wzorcem (4)

Fig. 4. Maximum depth of scour measured on models and calculated on the base of equation (4)

Tabela 2; Table 2

Wartości miar statystycznych opisujących siłę związku równań (2) i (4) z wynikami pomiarów $h_{r,max}$ na modelach

Value of statistic parameters describing power of relationship equation (2) and (4) with results of measures $h_{r,max}$ on models

q (m·s ⁻¹)	Równanie; Equation (2)				Równanie; Equation (4)			
	WBR	SWS	R	RS	WBR	SWS	R	RS
Model w skali; Model in scale 1:30								
0,049	0,06	1,01	0,79	1,00	0,14	1,12	0,79	0,99
0,073	0,16	0,85	0,77	0,99	0,07	0,94	0,77	1,00
0,097	0,07	0,95	0,80	1,00	0,03	1,00	0,79	1,00
Srednia; Mean	0,10		0,79	1,00	0,08		0,78	1,00
Model w skali; Model in scale 1:55,25								
0,020	0,11	1,11	0,80	0,99	0,14	1,13	0,80	0,99
0,030	0,05	0,96	0,79	1,00	0,07	0,96	0,80	1,00
0,039	0,02	0,98	0,80	1,00	0,04	0,98	0,80	1,00
Srednia; Mean	0,06		0,80	1,00	0,08		0,80	1,00

Wnioski

1. Maksymalna prędkość pulsacyjna v_m charakteryzująca burzliwość strumienia w przekroju, bezpośrednio poprzedzającym wybój, znieznacznie rośnie wraz z rozwojem rozmycia w czasie trwania przepływu.
2. Wzory (2) i (4) ze współczynnikami obliczonymi w oparciu o wyniki przeprowadzonych doświadczeń uzależniają maksymalną głębokość wyboju $h_{r,max}$ między innymi od turbulentnych charakterystyk strumienia opuszczającego wypad budowli, wyrażonych maksymalną prędkością pulsacyjną v_m . Wzory te ważne są w zakresie warunków, w jakich prowadzono badania modelowe i mogą stanowić wzbogacenie literatury dotyczącej problematyki rozmyć powstających za jazem, czyli kształtowanych przez strumień o podwyższonej turbulencji.

Literatura

- BLĄŻEJEWSKI R.** 1989. *Prognozowanie rozmyć miejscowych gruntów niespoistych poniżej budowli upustowych*. Roczn. AR w Poznaniu, Rozpr. Nauk. 190: 41–50.
- 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: 1–8.
- DĄBKOWSKI SZ L., SKIBIŃSKI J., ŻBIKOWSKI A.** 1982. *Hydrauliczne podstawy projektów wodnomelioracyjnych*. PWRiL Warszawa: 343, 485–490.
- HOFFMANS G.J.C.M., BOOIJ R.** 1993. *The influence of upstream turbulence on local scour holes*. proc. 25th IAHR-Congr., Paper A-14-1: 471–478.
- POPOVA K.S.** 1985. *Rasčet izmenenia głubiny mestnyh razmyvov za plotinami vo vremeni*. Izvestia VNIIG 119: 66–73.
- PRZEDWOJSKI B., BLĄŻEJEWSKI R., PILARCZYK K.W.** 1995. *River training techniques – fundamental, design and application*. AA Balcoma, Rotterdam: 400–403.
- ROZANOV N.P. (red.)** 1984. *Ustrojstva nižnego b'efa vodosbrosov*. Kolos, Moskwa: 64–69.
- URBAŃSKI J.** 2003. *Mechanizm tworzenia się rozmyć za jazem w świetle eksperymentalnych badań modelowych*. Rozpr. doktorska, Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW, Warszawa: 111–116.

Słowa kluczowe: jaz, głębokość rozmycia, turbulencja strumienia

Streszczenie

Bezpośrednią przyczyną kształtowania się rozmycia za jazem jest oddziaływanie strumienia o wzmożonej burzliwości na dno koryta. Wpływ stopnia turbulencji przepływu na rozmiary tworzącego się wyboju nie jest ostatecznie rozpoznany. Rzadko we wzorach na maksymalną głębokość dołu rozmycia występują charakterystyki turbulencji strumienia. W pracy przedstawiono wyniki laboratoryj-

nych badań rozmyć na modelach jazu zbudowanych w dwóch skalach: 1:30 i 1:55,25. W trakcie doświadczeń dokonywano pomiarów maksymalnej głębokości wyboju, ukształtowanej w osi modelu w określonym czasie trwania przepływu o zadanych parametrach i jednocześnie rejestrowano wartości chwilowe prędkości w osiowym pionie przekroju na końcu umocnień. W oparciu o wyniki przeprowadzonych doświadczeń i formuły zaczerpnięte z literatury opracowano propozycje równań opisujących związek maksymalnej głębokości wyboju z turbulentnymi charakterystykami strumienia na końcu wypadu.

RELATIONS BETWEEN STREAM FLOW TURBULENCE CHARACTERS AND THE DEPTH OF SCOURING BELOW THE DAM

Janusz Urbański

Department of Hydraulic Engineering and Environmental Recultivation,
Warsaw of Agricultural University, Warszawa

Key words: dam, depth of scour, turbulent of flow

Summary

Erosion behind dam results from the influence of stream with raised turbulence on the bed of channel. Direct influence of turbulent of flow on erosion process and dimension of scour is not recognized. The characteristics of stream turbulence is seldom include in the equation for maximum depth of scour. This paper presents the results of laboratory investigations of erosion below the dam with basin and horizontal protection. During the experiment measurements of maximum depth of scour were taken simultaneous registering of value of velocity on the end of bed protection were register. On basis of laboratory investigation and equations from literature proposals of equations describing relationship between maximum depth of scour and characteristic of turbulence of stream on end of bed protection were formulated.

Dr inż. Janusz **Urbański**
Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
ul. Nowoursynowska 159
02-776 WARSZAWA
e-mail: urbanski@alpha.sggw.waw.pl