

## WPLYW WARUNKÓW PRZEPLYWU W STANOWISKU DOLNYM JAZU NA GŁĘBOKOŚĆ ROZMYĆ

Piotr Siwicki

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań kształtowania się lokalnego rozmycia dna w czasie trwania przepływu na modelu jazu. Model budowli z wypływem wody spod zasuw, z niecką do rozpraszania energii i płaskim umocnieniem wykonano w skali 1 : 55. Hydrauliczne parametry przepływów w doświadczeniach modelowano według kryterium podobieństwa Froude'a. Jako materiał rozmywalny na modelu wykorzystano piasek sortowany o  $d_{50} = 1,1$  mm. Celem badań było rozpoznanie zmienności rozmiarów wyboju w czasie trwania przepływu w różnych warunkach hydraulicznych. Badania wykazały wpływ głębokości strumienia w stanowisku dolnym na głębokość rozmycia oraz wpływ intensywności turbulencji strumienia na proces rozmycia.

**Słowa kluczowe:** fizyczne modelowanie, jaz, rozmycie lokalne

### WSTĘP

Kształtowanie się rozmiarów rozmyć koryt za budowlami wodnymi to jedno z trudniejszych zagadnień badawczych. Ma ono w hydrotechnice bardzo obszerną literaturę. Trudności w analizie wynikają ze złożoności zjawisk zachodzących w odskoku hydraulicznym i na wypadzie budowli oraz zjawisk odspajania i przenoszenia przez wodę cząstek gruntu. Dodatkowe trudności opisu tego zagadnienia wynikają z różnorodności stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych budowli wodnych. Jednym z parametrów, charakteryzujących lokalne rozmycie koryta za budowlą, nazywane też wybojami lub dołami rozmycia, jest jego maksymalna głębokość ( $h_{\max}$ ) mierzona od pierwotnego poziomu dna koryta do najniższej położonego punktu dna wyboju [Hoffmans i Verheij 1997]. Możliwość jej przewidywania umożliwia zaprojektowanie dolnego stanowiska budowli, zapewniającego jej bezpieczeństwo dzięki ograniczeniu rozmiarów rozmycia, oraz ograniczenie kosztów budowy i późniejszej jej eksploatacji. Z tych powodów jest to ciągle aktualny

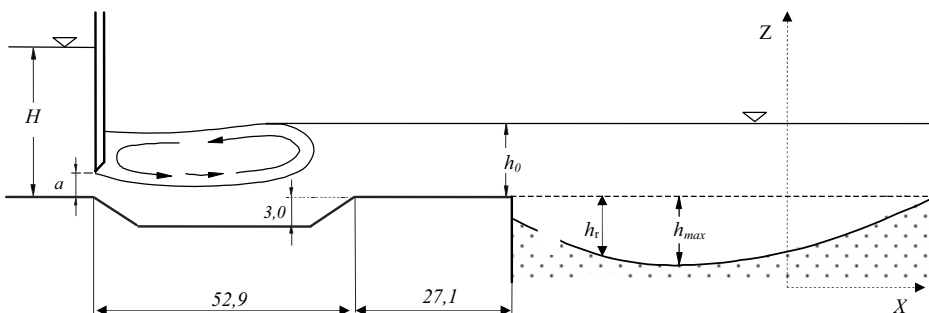
problem badawczy, o dużym znaczeniu praktycznym. Wielkość rozmycia zależy od wielu czynników, jednak głównymi parametrami są: wielkość natężenia przepływu, warunki hydrauliczne na odpływie z budowli oraz rodzaj materiału rozmywanego.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych na modelu jazu z wypływem spod zasuwę z nieką do rozpraszania energii, strefą umocnień i odcinkiem dna rozmywanego. Badania przeprowadzono dla 3 natężeń przepływu i jednego rodzaju materiału rozmywanego. Każdemu z natężeń przepływu odpowiadały trzy różne napełnienia w stanowisku dolnym ( $h_0$ ). Doświadczenia dla jednej serii pomiarowej trwały 8 godzin, po tym czasie trwania przepływu wybój osiągnął fazę stabilizacji, a przyrosty głębokości rozmycia były niewielkie. W trakcie trwania przepływu mierzono zmienność profilu rozmycia w czasie i rozkłady prędkości na długości dołu rozmycia.

Na podstawie badań przeanalizowano przebieg rozmycia w czasie dla badanych warunków, wpływ stopnia zatopienia odsokoku na głębokości rozmyć, jak również rozkłady prędkości w wyboju dla badanych przypadków oraz zmienność intensywności turbulencji i jej wpływ na ostateczną głębokość wyboju.

## METODYKA BADAŃ

Przebieg rozmywania dna w czasie badano na modelu, którego schemat przyjęto za Żbikowskim [1970], przedstawiono na rysunku 1. Jest to model jazu z zamknięciem zasuwowym, nieką wypadową i poziomym umocnieniem dna za wypadem (rys. 1). Model wykonany był w skali 1 : 55 w korycie prostokątnym o szerokości 0,58 m. Woda przepuszczana była pod zamknięciem podnoszonym na wysokość  $a$  podczas każdego doświadczenia. Doświadczenia przeprowadzono dla odpowiadających sobie natężeń przepływów, modelowanych według kryterium podobieństwa Froude'a. Każdemu badalnemu przepływowi odpowiadały trzy różne napełnienia w stanowisku dolnym ( $h_0$ ). Parametry hydrauliczne przepływu podano w tabeli 1. Na modelu użyto materiał rozmywalny o krzywej uziarnienia przedstawionej na rysunku 2.

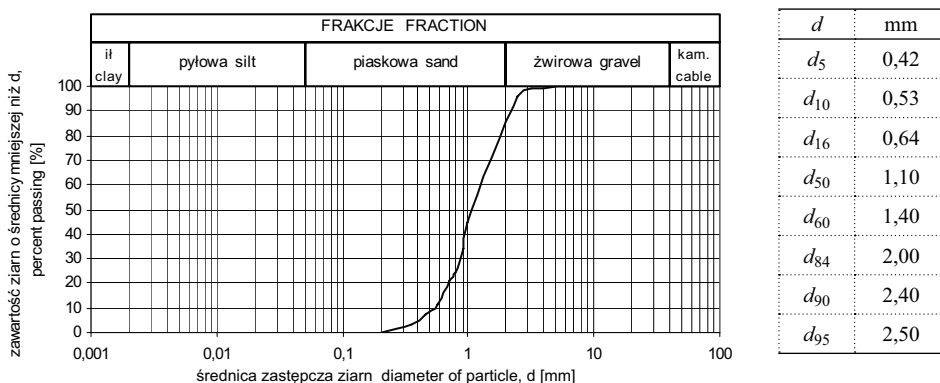


Rys. 1. Schemat modelu badawczego z oznaczeniami analizowanych parametrów rozmyć

Fig. 1. Schema of investigated model with marks of analyzed parameters of scour

Tabela 1. Parametry hydrauliczne przepływu podczas doświadczeń  
Table 1. Hydraulic parameters of flow during of experiments

$q$ [m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	$h_0$ [m]	$a$ [m]	$H$ [m]	$n$ [-]
0,019	0,070	0,018	0,202	1,17
	0,080		0,209	1,27
	0,090		0,210	1,39
0,028	0,090	0,026	0,194	1,17
	0,104		0,207	1,29
	0,116		0,230	1,36
0,037	0,112	0,031	0,258	1,13
	0,130		0,279	1,25
	0,145		0,290	1,35

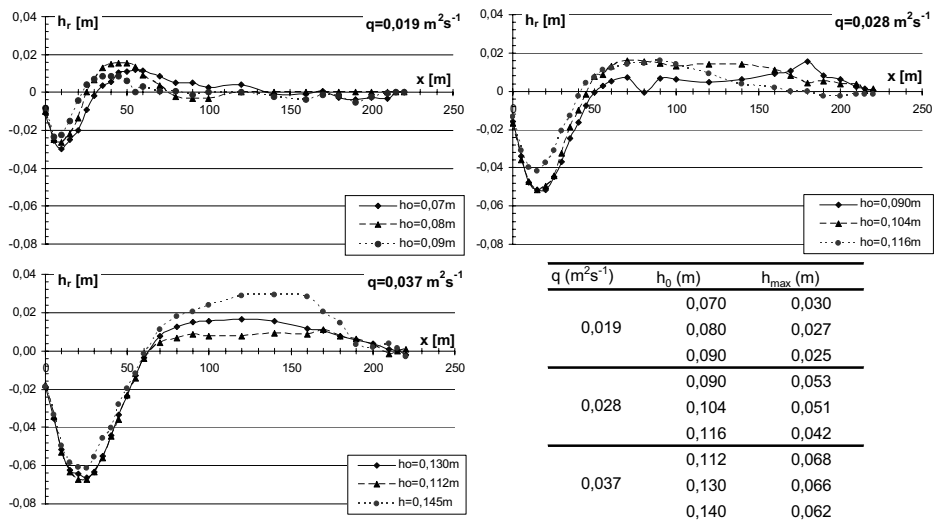


Rys. 2. Krzywa uziarnienia i średnice charakterystyczne materiału rozmywalnego użytego na modelu  
Fig. 2. Granulation and characteristic diameters of sand used on the model

W doświadczeniach obserwowano formowanie się dołu rozmycia, za umocnieniem w dnie wypełnionym gruntem, przez strumień wody o określonych parametrach hydraulicznych (tab. 1). Czas trwania przepływu wynosił 480 minut. Podłużne profile erodowanego przez strumień dna mierzono w osiowej płaszczyźnie koryta ( $h_r$ ) po czasie 30, 90, 210, 300 i 480 minut od początku doświadczenia. Dla każdego badanego przepływu zmieniano trzykrotnie napełnienie w stanowisku dolnym ( $h_0$ ) przy stałym stopniu otwarcia zasuw ( $a$ ) dla każdego z przepływów. Napełnienia w stanowisku dolnym dobierano tak, aby uzyskać zbliżone wartości współczynnika zatopienia odskoku ( $n$ ) przy różnych wartościach przepływu. Jako współczynnik zatopienia odskoku hydraulicznego (Dąbkowski i in. 1982), przyjęto iloraz:  $n = \frac{h_0 + d}{h_2}$ , gdzie  $d$  jest głębokością niecki,  $h_2$  – drugą głębokością sprzężoną. Przed przystąpieniem do badań z dnem rozmywanym dokonano utwardzenia dna i dla warunków ustalonych, przy nieziennej głębokości wyboju w czasie dla poziomego dna pomierzono rozkłady prędkości na długości strefy rozmywanej. W badaniach z dnem nieutwardzonym prowadzono pomiary rozkładu prędkości po 480 minutach trwania doświadczenia w miejscu wystąpienia maksymalnego rozmycia ( $h_{max}$ )

## WYNIKI I Dyskusja

W wyniku przeprowadzonych doświadczeń dla badanych warunków uzyskano profile rozmyć i określono maksymalne głębokości wyboju ( $h_{\max}$  – rys. 3). Dla największych natężeń przepływu uzyskano najgłębsze doły rozmycia. Przy przepływie najmniejszym  $q = 0,019 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  profil wyboju jest najbardziej zwarty. Dla wszystkich trzech przepływów największe głębokości rozmyć powstają przy najmniejszych głębokościach wody w stanowisku dolnym ( $h_0$ ), dla napętnień największych wyboje są najmniejsze, a powstające za wybojem odsypisko jest największe. Odsypisko podpiętrzając strumień, opóźnia erozję wznoszącego się stoku dołu rozmycia. Zmniejsza przekrój przepływu nad nim, co powoduje wzrost prędkości w przekroju jego występowania. Odsypisko materiału dennego, powstające za wybojem, zmienia w pewnym stopniu rozkład prędkości na długości rozmytego dna, a więc wpływa na przebieg rozwoju rozmycia w czasie.

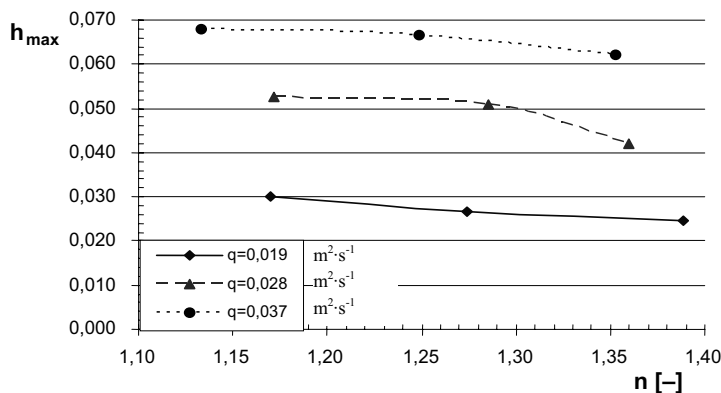


Rys. 3. Profile rozmyć dla badanych natężeń przepływu ( $q$ ) i odpowiadającym im napętnieniom ( $h_0$ ) po 8 godzinach trwania doświadczenia

Fig. 3. Profiles of scour for investigate discharges ( $q$ ) and corresponding down stream ( $h_0$ ) after 8 h of experiment

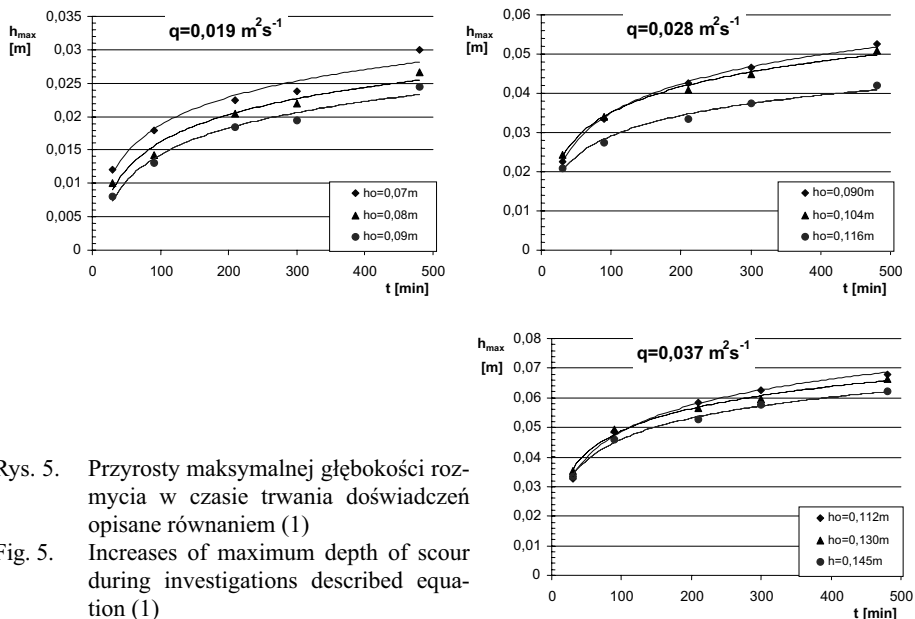
Przy malejącym współczynniku zatopienia wydłuża się tzw. przejściowy odcinek strumienia za odskokiem hydraulicznym, na którego długości strumień charakteryzuje się podwyższoną burzliwością [Urbański 2003], a turbulencja strumienia nasila proces erozji dna, wynikiem czego jest uzyskiwanie większych głębokości rozmyć dla mniejszych wartości  $n$  (rys. 4).

Wpływ czasu na rozmiary rozmycia, jako ważnego czynnika w badaniach na modelach fizycznych, w przeszłości rozważano na podstawie wyników badań przeprowadzonych dla bardzo zróżnicowanych głębokości strumienia i materiału dennego oraz profilów prędkości i intensywności turbulencji [Breusers 1966, Żbikowski 1970, Buchkoi in. 1987, Błażejowski i



Rys. 4. Zależność maksymalnej głębokości rozmycia ( $h_{max}$ ) od współczynnika zatopienia odskoku ( $n$ )  
 Fig. 4. Relationship between maximum depth of scour ( $h_{max}$ ) and coefficient of hydraulic jump ( $n$ )

Zawadzki 2001]. Sam opis fizyki zjawiska wymaga znajomości procesów zachodzących na dnie w czasie formowania się rozmycia, które kształtowane są przez takie parametry przepływu, jak: prędkość, naprężenia styczne i ich wartości w strumieniu o dużej turbulencji, oraz wpływ tych wielkości na cząstki materiału dennego. Wyniki badań własnych wykazały, że największy przyrost głębokości rozmycia następuje w pierwszych godzinach trwania doświadczenia (rys. 5), a dalej proces rozmycia przebiega zgodnie z fazami rozwoju podanymi przez Hoffmansa i Pilarczyka [1995]. W badanych przypadkach po 8 h trwania doświadczenia osiągnięto stabilizację dołu rozmycia.



Rys. 5. Przyrosty maksymalnej głębokości rozmycia w czasie trwania doświadczeń opisane równaniem (1)  
 Fig. 5. Increases of maximum depth of scour during investigations described equation (1)

Uzyskane wyniki przyrostu maksymalnej głębokości rozmycia w czasie trwania doświadczenia opisano równaniem (1) w funkcji zmiennych parametrów hydraulicznych i geometrycznych badanych na modelu, uzyskując zależność:

$$\frac{h_{\max}}{h_0} = \frac{v^{*1,54} t^{0,29}}{a^{-0,15}} \quad (1)$$

gdzie:  $v^*$  – prędkość średnia w polu przy napełnieniu  $h_0$ ;  $v^* = \frac{q}{h_0}$ ,  
 $t$  – czas trwania przepływu [min],  
 $a$  – stopień otwarcia zasowy (rys. 1) [m].

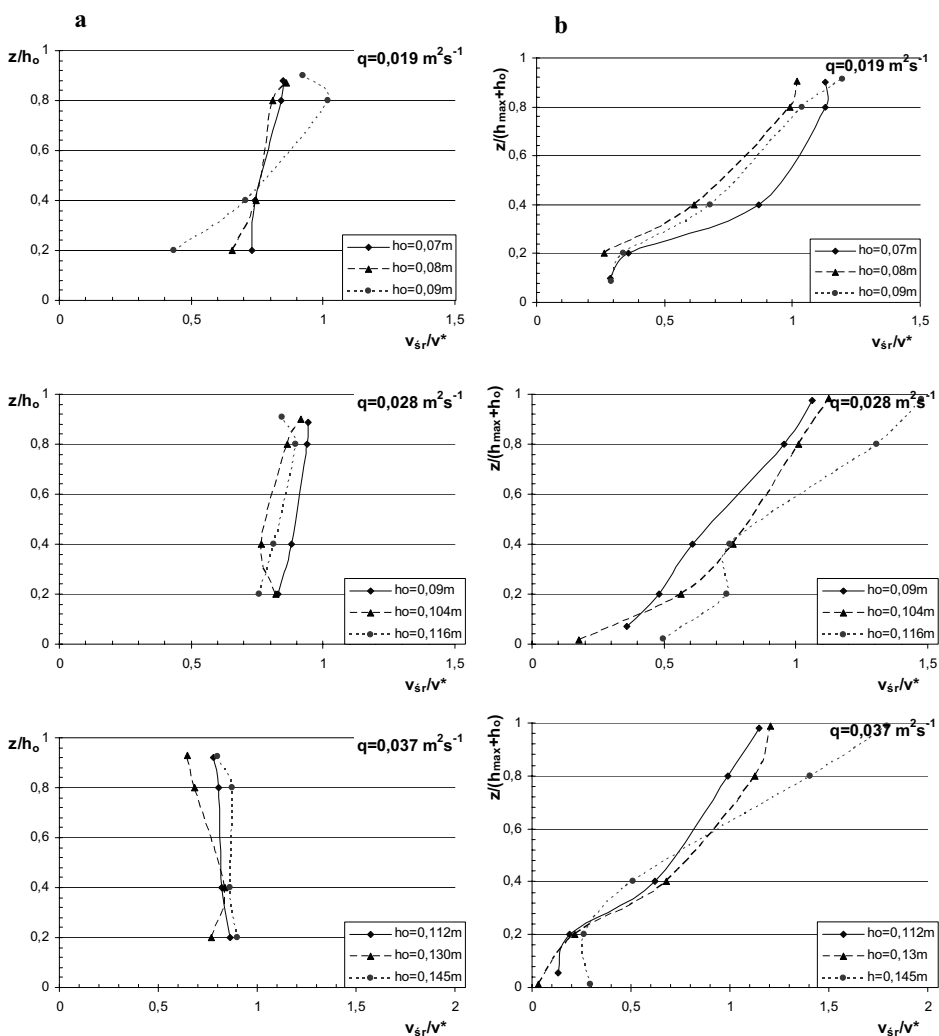
Równanie to dobrze opisuje rozwój wyboju w czasie dla badanych przypadków; uzyskano współczynnik korelacji  $R = 94,32\%$ . Wyrównanie wyników otrzymanych w laboratorium równaniem (1) przedstawiono na rysunku 5.

Na proces kształtowania się rozmyć na modelu duży wpływ, poza podstawowymi parametrami hydraulicznymi i konstrukcyjnymi, mają chwilowe wartości prędkości i struktura strumienia charakteryzowana często intensywnością turbulencji  $\sigma = \sigma/v_{\text{sr}}$  (gdzie:  $\sigma$  – odchylenie standardowe od prędkości średniej,  $v_{\text{sr}}$  – średnia prędkość przepływu) [Popova 1970]. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów prędkości na dnie nierozmywalnym (głębokość strumienia w stanowisku dolnym,  $h_0$ ), a następnie w powstałym dole rozmycia (głębokość strumienia w stanowisku dolnym,  $h_0 + h_{\max}$ ) przeanalizowano zmienność rozkładu prędkości w miejscu występowania  $h_{\max}$  (rys. 6). W przypadku dna nierozmytego zauważyć można równomierny rozkład prędkości na głębokości strumienia. W wykształconym wyboju po 8 godzinach trwania przepływu ulegają zmianie (rys. 7). Prędkość maleje w strefie wyboju, przyjmując wartości najmniejsze przy dnie i znacznie większe na głębokości  $h_0$ . Powstały dół pełni rolę stabilizatora, gdzie prędkości są znacznie mniejsze.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów obliczono intensywność turbulencji strumienia ( $\sigma$ ) w punktach pomiarowych. Uzyskano rozkłady intensywności turbulencji na dnie nierozmywalnym w miejscu występowania maksymalnego rozmycia i rozkłady w wykształconym wyboju po 8 h doświadczenia (rys. 7). W przypadku dna nierozmywalnego największa intensywność turbulencji występuje przy dnie, gdzie prędkości są najmniejsze. Po wykształceniu się dołu rozmycia największa intensywność turbulencji widoczna jest w dole rozmycia, a w szczególności przy dnie, gdzie wzrasta ona w stosunku do dna nierozmywalnego przeszło dwukrotnie. Należy sądzić, że dalszy przyrost wyboju pomimo małych prędkości przy dnie (mniejszych od nierozmywalnych), jest wynikiem znacznego wzrostu intensywności turbulencji.

## PODSUMOWANIE

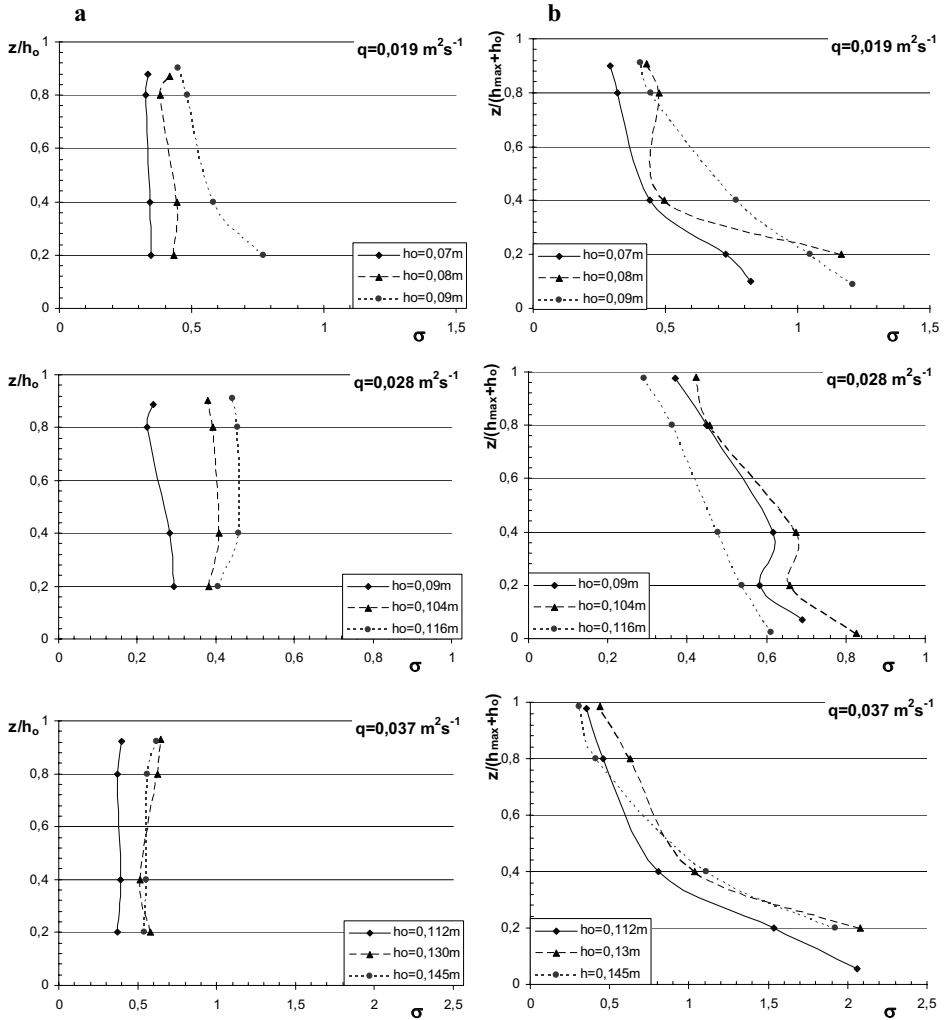
W wyniku przeprowadzonych badań można stwierdzić, że głębokość strumienia w stanowisku dolnym ma wpływ na kształt i głębokość rozmycia. Zwiększając napełnienie ( $h_0$ ) na odpływie z budowli, zwiększamy współczynnik zatopienia odskoku ( $n$ ) i uzyskujemy mniejsze głębokości rozmyć (rys. 4), a kształt powstałego wyboju jest bardziej zwarty (rys. 3). Przy większych napełnieniach obserwowana jest większa intensywność



Rys. 6. Profile prędkości w przekroju występowania maksymalnej głębokości wyboju dla badanych warunków przepływu: a – dno nierozmyte, b – dno rozmyte

Fig. 6. Profiles of velocities in cross section occurrence of maximum depth of scour for investigated flow conditions: a – non eroded ground, b – eroded ground

turbulencji strumienia. W wykształconym dole rozmycia intensywność turbulencji wzrasta ponad dwukrotnie w stosunku do warunków początkowych (dno nierozmyte) i staje się parametrem w większym stopniu decydującym o dalszym przyroście maksymalnej głębokości rozmycia i kształcie wyboju niż prędkość przepływu (rys. 6 i 7).



Rys. 7. Intensywność turbulencji w przekroju występowania maksymalnej głębokości wyboju dla badanych warunków przepływu: a – dno nierozmyte, b – dno rozmyte

Fig. 7. Intensity of turbulence in cross section occurrence of maximum depth of scour for investigated flow conditions: a – non eroded ground, b – eroded ground

## PIŚMIENICTWO

- Błażejowski R., Zawadzki P., 2001. Local scour in non-uniform bed material below a horizontal solid apron. Arch. of Hydro-Engin. and Environmental Mech. 48, 1, 3–17.
- 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.
- Buchko M., Kolman P., Pilarczyk K., 1987. Investigation of local in cohesionless sediments using a tunnel. Proc. 22nd IAHR-Congr., Lausanne, Switzerland, 233–239.



- Dąbkowski Sz.L., Skibiński J., Żbikowski A., 1982. Hydrauliczne podstawy projektów wodnome-  
lioracyjnych. PWRiL, Warszawa.
- Hoffmans G.J.C.M., Pilarczyk K.W., 1995. Local scour downstream of hydraulic structures. Jour-  
nal of Hydraulic Engineering 121, 4, 326–340.
- Hoffmans G.J.C.M., Verheij H.J., 1997. Scour manual. A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield.
- Popova K.S., 1970. Issledowanie kinematičeskoj struktury potoka na risbermie i v jame razmyva za  
vodoslivnymi plotinami na niesviaznyh gruntach. Izvestia VNIIG, 94.
- Urbański J., 2003. Mechanizm tworzenia się rozmyć za jazem w świetle eksperymentalnych badań  
modelowych. Rozprawa doktorska. Katedra Inżynierii Wodnej i Rekułtywacji Środowiska  
SGGW, Warszawa.
- Żbikowski A., 1970. Badania laboratoryjne zależności głębokości rozmycia poniżej przelewu od  
długości umocnień i czasu trwania doświadczenia. Rozprawa doktorska. Politechnika  
Warszawska, Warszawa.

## INFLUENCE OF FLOW CONDITIONS IN DOWN STREAM OF THE DAM ON DEPTH OF SCOUR

**Abstract.** Paper presented results of investigation of formation local scour on the model of dam. Investigations were conducted on model with overflow under closure, bottom of water basins and washing-out area in scale 1 : 55. Hydraulic parameters according to Froude's criterion were modeling. As eroded material on model sorted sand was used with  $d_{50} = 1,1$  mm. Purpose of investigation were recognition variability dimension of scour during of discharge for different flow condition. Investigations showed influence depth of down stream on depth of scour, influence intensity of turbulence of stream on eroded process.

**Key words:** physical modeling, dam, local scour

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 30.10.2006