

**Janusz URBAŃSKI**

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

## **Wpływ hydraulicznych warunków przepływu na modelu jazu na głębokość rozmycia lokalnego**

### **Influence of flow conditions in weir model on depth of local scour**

**Słowa kluczowe:** modelowanie fizyczne, budowla piętrząca, rozmycie miejscowe  
**Key words:** physical modeling, water structure, local scour

#### **Wprowadzenie**

Tworzenie się rozmyć koryt poniżej budowli piętrzących to jedno z trudniejszych zagadnień badawczych w hydrotechnice. Ma ono bardzo obszerną literaturę w związku z szerokimi badaniami prowadzonymi od niespełna stu lat, najczęściej w warunkach laboratoryjnych. Trudności w rozpoznaniu przebiegu procesu i jego mechanizmu wynikają ze złożoności zjawisk zachodzących w odsłoku hydraulicznym i na wypadzie budowli oraz zjawisk odspajania i przenoszenia przez wodę cząstek gruntu. Wyniki licznych doświadczeń laboratoryjnych z uwagi na różnorodność stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych budowli i warunków hydraulicznych trudno jest

porównywać w celu generalizowania wniosków.

Jednym z parametrów, charakteryzujących wielkość rozmycia koryta za budowlą, zwanego wybojem, jest jego maksymalna głębokość ( $h_{rmax}$ ), mierzona od początkowego, nierozmytego poziomu dna koryta do najniższej położonego punktu dna wyboju (Hoffmans i Verheij 1997). Umiejętność jej przewidywania umożliwia odpowiednie zaprojektowanie dolnego stanowiska budowli, zapewniające przede wszystkim jej bezpieczeństwo dzięki ograniczeniu rozmiarów rozmycia, a także ograniczenie kosztów budowy i późniejszej jej eksploatacji. Z tych powodów jest to ciągle aktualny problem badawczy i o dużym znaczeniu praktycznym. Rozmiary rozmycia i ich zmienność w czasie zależą od wielu czynników, spośród których najważniejsze to: wielkość natężenia przepływu, wysokość piętrzenia, warunki hydrauliczne w dolnym stanowisku budowli oraz rodzaj materiału rozmywanego.

W pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych rozmyć na modelu jazu z wypływem strumienia spod zasuwy, niecką do rozpraszania energii i płaskim, poziomym umocnieniem dna w dolnym stanowisku. Badania przeprowadzono dla trzech natężeń przepływu, a każdemu z nich odpowiadały trzy różne napełnienia koryta ( $h$ ) w stanowisku dolnym. Wykorzystano jeden rodzaj materiału rozmywanego. Każde doświadczenie, polegające na kształtowaniu rozmycia przez strumień wody o zadanych parametrach, trwało osiem godzin. W jego trakcie mierzono zmienność w czasie profilu podłużnego rozmycia w osiowej płaszczyźnie koryta oraz rozkłady prędkości w pionie na końcu umocnienia. Uzyskane wyniki umożliwiły rozpoznanie przebiegu rozmycia w czasie dla badanych warunków i ocenę wpływu hydraulicznych warunków przepływu, w tym stopnia zatopienia odskoku i charakterystyk turbulencji strumienia na głębokość wyboju.

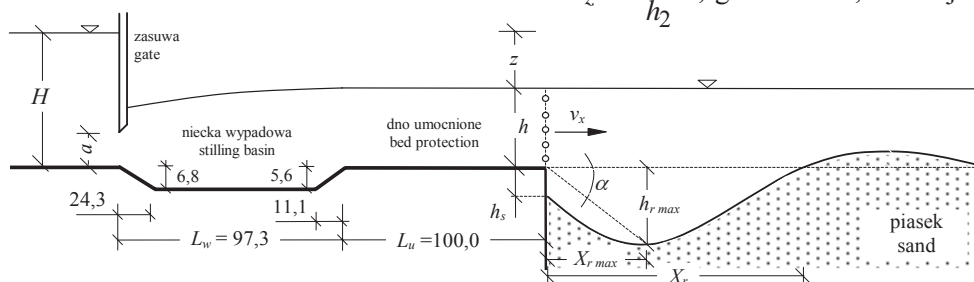
## Metodyka badań

Konstrukcję modelu jazu z zamknięciem zasuwowym, niecką wypadową i poziomym umocnieniem dna za wy-

padem przyjęto za Żbikowskim (1970) i schematycznie przedstawiono na rysunku 1. Model wykonany był w korycie o przekroju prostokątnym i szerokości 1,06 m. Strumień wody wypływał spod zamknięcia podnoszonego na wysokość  $a$  podczas każdego doświadczenia. Hydrauliczne parametry przepływów podano w tabeli 1. Każdemu badaniu przepływowi odpowiadały trzy różne napełnienia koryta ( $h$ ) w stanowisku dolnym. Na modelu wykorzystano jeden materiał rozmywalny o krzywej uziarnienia przedstawionej na rysunku 2.

Doświadczenia polegały na formowaniu rozmycia za umocnieniem w dniu wypełnionym gruntem przez strumień wody o określonych parametrach hydraulicznych (tab. 1). Czas trwania przepływu wynosił 480 min. Podłużne profile erodowanego dna mierzono w osiowej płaszczyźnie koryta po czasie: 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360 i 480 min od początku doświadczenia. Dla każdego badanego przepływu zmieniano trzykrotnie napełnienie koryta ( $h$ ) w stanowisku dolnym przy niezmiennym położeniu zasuwy piętrzącej względem dna w górnym stanowisku ( $a$ ). Jako współczynnik zatopienia odskoku hydraulicznego ( $n_z$ )

– Dąbkowski i inni (1982), przyjęto iloraz:  $n_z = \frac{h+d}{h_2}$ , gdzie  $d = 0,056$  m jest

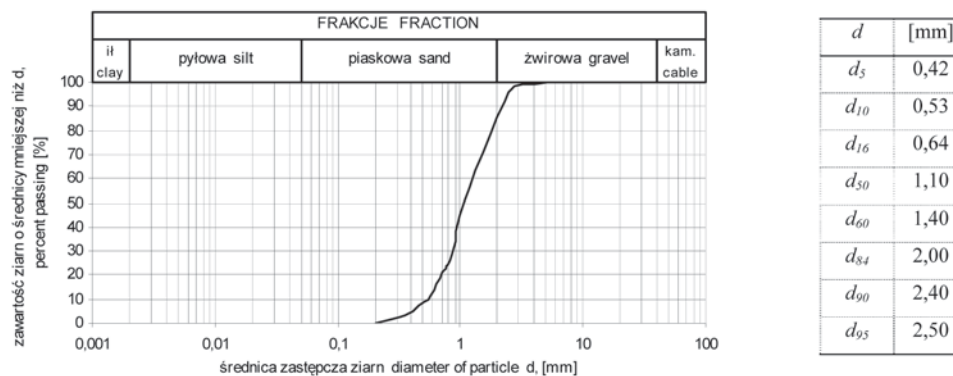


RYSUNEK 1. Schemat modelu badawczego i analizowane parametry rozmyć  
FIGURE 1. Schema of investigated model and analyzed parameters of scour

TABELA 1. Parametry hydrauliczne przepływu podczas doświadczeń

TABLE 1. Hydraulic parameters of flow during of experiments

$q$	$h$	$H$	$z$	$a$	$E$	$h_1$	$h_2$	$Fr_1$	$n_z$
$m^2 \cdot s^{-1}$	m	m	m	m	m	m	m	–	–
0,049	0,133	0,417	0,296	0,027	0,486	0,0161	0,166	7,63	1,14
	0,148	0,425	0,289		0,494	0,0160	0,167	7,73	1,22
	0,166	0,451	0,297		0,520	0,0156	0,170	8,04	1,31
0,073	0,165	0,445	0,292	0,038	0,514	0,0235	0,203	6,46	1,09
	0,192	0,473	0,293		0,542	0,0229	0,207	6,74	1,20
	0,212	0,499	0,299		0,568	0,0223	0,210	7,00	1,28
0,097	0,193	0,462	0,281	0,052	0,532	0,0309	0,234	5,69	1,06
	0,22	0,489	0,281		0,559	0,0301	0,238	5,93	1,16
	0,24	0,513	0,285		0,583	0,0294	0,241	6,13	1,23



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

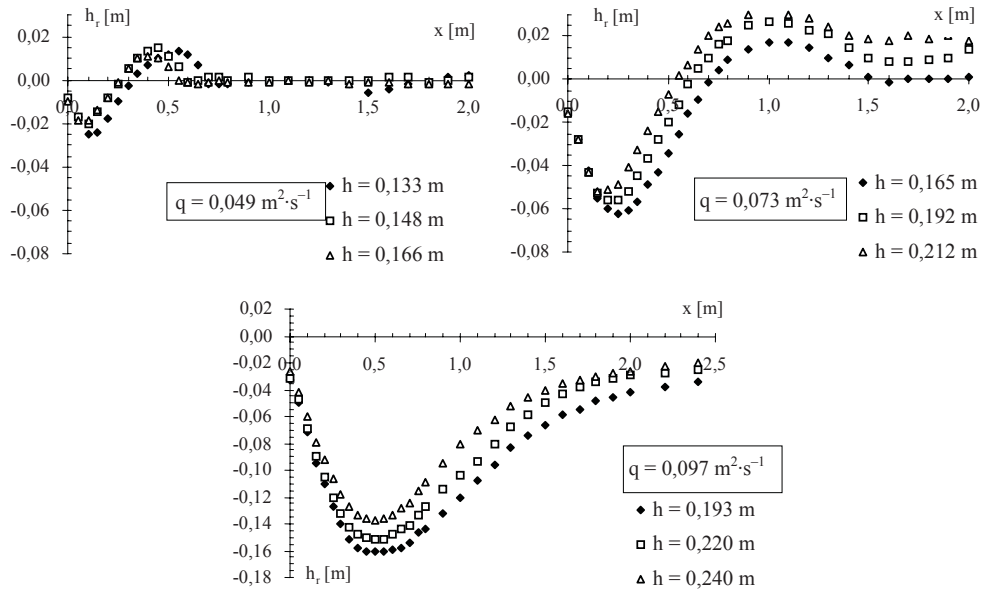
głębokością niecki, a  $h_2$  – drugą głębokością sprzężoną.

W trakcie doświadczeń wykonywano także pomiary poziomych składowych wektora prędkości  $v_x$  i  $v_y$  (podłużnej i poprzecznej) w pionie wyznaczonym w osi koryta na końcu umocnień (rys. 1). Wykorzystano elektrosondę PEMS, rejestrującą wyniki z częstotliwością 0,1 s. Pomiar wykonano w pięciu punktach rozmieszczonych następująco:  $p_1$  – w odległości 1 cm nad dnem,  $p_2$  – na wysokości 0,2 h nad dnem,  $p_3$  – 0,5 h,  $p_4$  – 0,7 h, a  $p_5$  – na głębokości 2 cm pod

zwierciadłem wody. Czas pomiaru prędkości w każdym punkcie wynosił 120 s. Rejestrowano ciągi  $v_x$  i  $v_y$  o liczebności 1200 elementów dla każdego kierunku. Na podstawie ciągów  $v_x$  obliczono w każdym punkcie uśrednioną wartość prędkości  $v_{sr}$  i sporządzono jej rozkłady w pionie.

## Wyniki

Podłużne profile rozmyć, pomierzone w osiowej płaszczyźnie koryta po ośmiu godzinach trwania przepływu,



RYSUNEK 3. Profile rozmyć po 8 godzinach trwania doświadczenia  
 FIGURE 3. Profiles of scour after 8 h of experiment

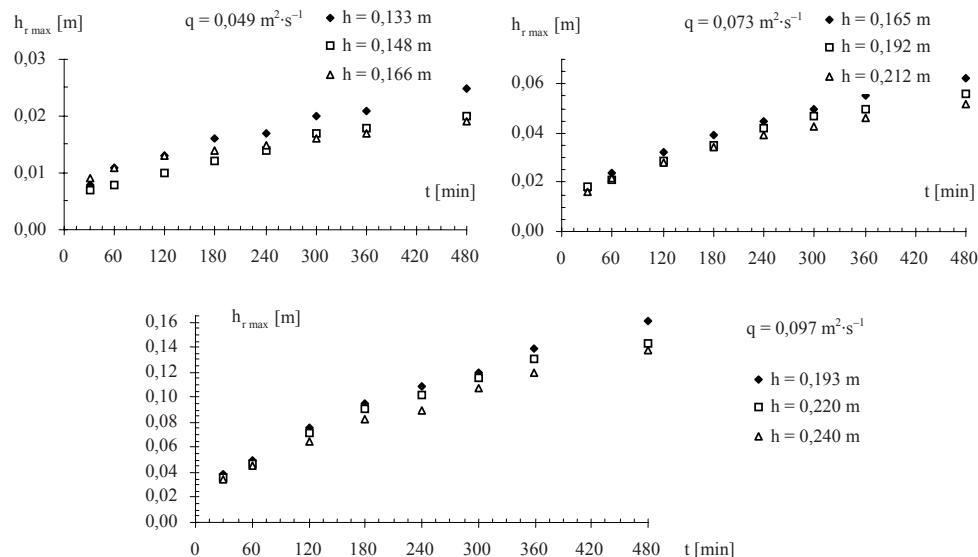
przedstawiono na rysunku 3. Największe rozmiary rozmycia uzyskano w doświadczeniach z przepływem  $q = 0,097 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , a najmniejsze przy  $q = 0,049 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Dla wszystkich badanych przepływów rozmycia o największych rozmiarach ukształtowane zostały przy najmniejszych głębokościach wody ( $h$ ) w stanowisku dolnym, a dla napełnień największych wyboje były najmniejsze. W doświadczeniach z przepływami  $q = 0,049 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  i  $q = 0,073 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  za dołem rozmycia formowało się odsypisko materiału wyerodowanego. Podpiętrza ono strumień i opóźnia erozję wznoszącego się stoku wyboju. Nad odsypiskiem zmniejszony jest przekrój przepływu, 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 (Urbański 2003, Siwicki 2006).

Ważnym czynnikiem wpływającym na rozmiary rozmycia w badaniach na modelach fizycznych jest czas trwania przepływu. Wpływ tego czynnika w przeszłości oceniano na podstawie wyników badań przeprowadzonych dla bardzo zróżnicowanych głębokości strumienia i uziarnienia materiału dennego oraz rozkładów prędkości i intensywności turbulencji (Breusers 1966, Żbikowski 1970, Buchko i in. 1987, Błażejewski i Zawadzki 2001). Zmienność maksymalnej głębokości rozmycia  $h_{rmax}$  w czasie trwania przepływu na modelu przedstawiono na rysunku 4.

Wyniki badań wykazały, że największy przyrost głębokości rozmycia następuje na początku doświadczenia, a następnie proces rozmywania przebiega zgodnie z wyróżnionymi fazami rozwo-



RYSUNEK 4. Zmienność maksymalnej głębokości rozmycia ( $h_{r,max}$ ) w czasie trwania przepływu  
 FIGURE 4. Variability of maximum depth scour ( $h_{r,max}$ ) during the experiments

ju (Hoffmans i Pilarczyk 1995). W czasie ośmiu godzin trwania doświadczenia nie osiągnięto stabilizacji dołu rozmycia. Wzajemne położenie punktów na wykresach (rys. 4) wskazuje, że największe przyrosty maksymalnej głębokości wyboju dla wszystkich badanych przepływów występowały w doświadczeniach z najmniejszymi napełnieniami koryta ( $h$ ) w dolnym stanowisku. Zwiększanie głębokości wody w dolnym stanowisku powodowało opóźnienie rozwoju rozmycia w czasie.

Przy malejącym współczynniku zatopienia odskoku hydraulicznego ( $n_z$ ) wydłuża się tzw. przejściowy odcinek strumienia za odskokiem, na którego długości strumień charakteryzuje się podwyższoną burzliwością (Urbański 2007). Wzmoczona turbulencja strumienia nasila proces erozji dna, wynikiem czego jest uzyskiwanie większych głębokości rozmyć dla mniejszych wartości

współczynnika zatopienia odskoku ( $n_z$ ) – rysunek 5.

Wyniki pomiarów maksymalnej głębokości wyboju ( $h_{r,max}$ ), ukształtowanego w czasie ośmiu godzin trwania przepływu, opisano równaniem (1), wiążącym rozmiary rozmycia z hydraulicznymi parametrami przepływu na modelu:

$$\frac{h_{r,max}}{h} = 0,63 \left( \frac{0,1q}{av_h^{2,55} n_z^{2,9}} \right)^{-2,71} \quad (1)$$

gdzie:

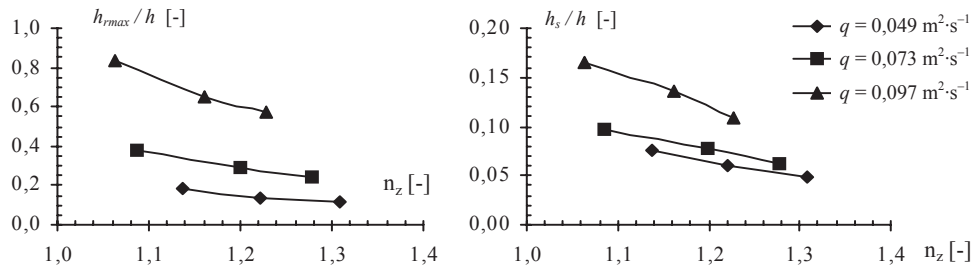
$h$  – napełnienie koryta w dolnym stanowisku [m],

$q$  – jednostkowe natężenie przepływu [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ],

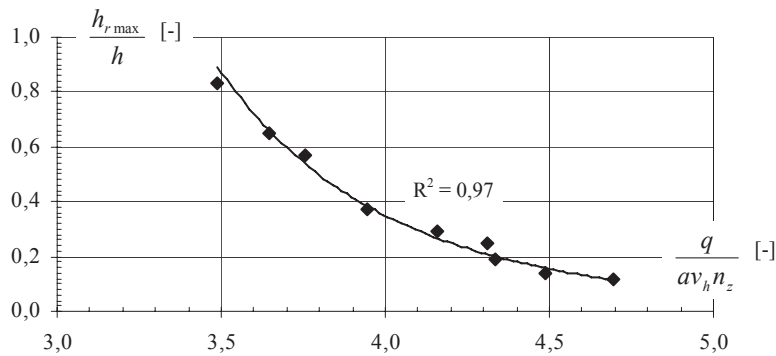
$a$  – wysokość podniesienia zasuwy [m],

$v_h$  – średnia prędkość strumienia w dolnym stanowisku,  $v_h = q/h$  [ $m \cdot s^{-1}$ ],

$n_z$  – współczynnik zatopienia odskoku hydraulicznego [–].



RYSUNEK 5. Zależność bezwymiarowych głębokości rozmycia  $h_{rmax}/h$  i  $h_s/h$  od współczynnika zaptopienia odskoku ( $n_z$ )  
 FIGURE 5. Relationship between dimensionless depth of scour  $h_{rmax}/h$  and  $h_s/h$  and coefficient of submerged hydraulic jump ( $n_z$ )



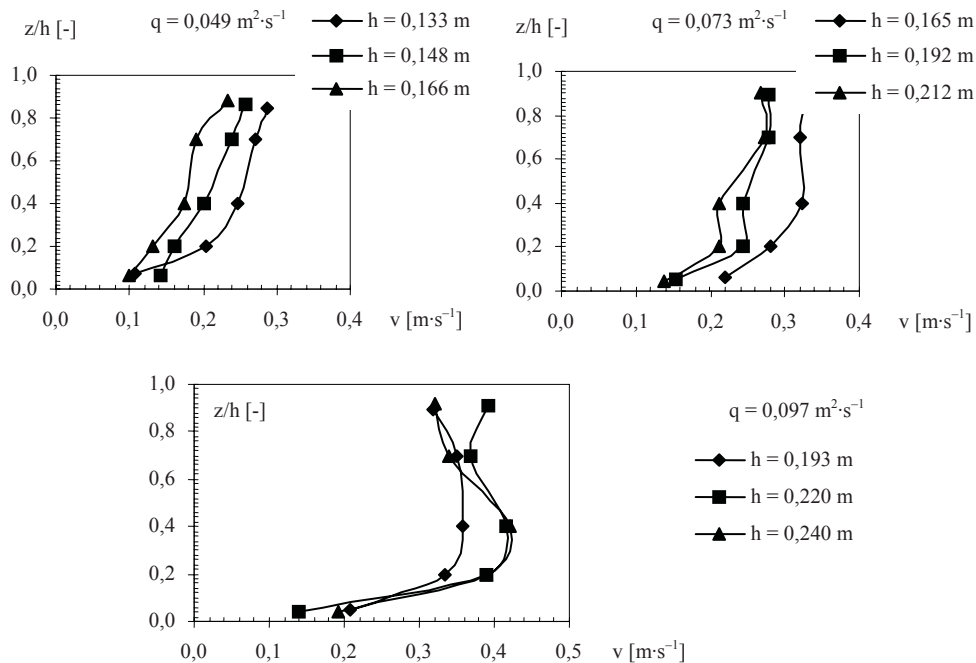
RYSUNEK 6. Zależność bezwymiarowej głębokości rozmycia  $h_{rmax}/h$  od parametru  $\frac{q}{av_h n_z}$

FIGURE 6. Relationship between dimensionless depth of scour  $h_{rmax}/h$  and parameter  $\frac{q}{av_h n_z}$

Zależność  $h_{rmax}/h$  od bezwymiarowego parametru przedstawiono na rysunku 6. Uzyskano wartość współczynnika  $R^2 = 0,97$ , co wskazuje na istnienie ścisłego związku głębokości wyboju z hydraulicznymi parametrami strumienia.

Na przebieg procesu kształtowania się rozmyć na modelu duży wpływ, poza podstawowymi parametrami hydraulicznymi, mają chwilowe wartości prędkości i rozkład prędkości na głębokości

strumienia. Na podstawie wyników pomiarów prędkości w osiowym pionie na końcu umocnień (rys. 7) przeanalizowano zmienność rozkładu prędkości ( $v_x$ ) w zależności od warunków hydraulicznych przepływu, pod kątem oceny jego wpływu na rozmiary rozmycia. Kształt tachoid zmieniał się wraz ze zmianą napełnienia koryta ( $h$ ) w dolnym stanowisku. W doświadczeniach z przepływami  $q = 0,049 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  i  $q = 0,073 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  maksymalna wartość prędkości w pionie wy-



RYSUNEK 7. Rozkłady prędkości w osiowym pionie na końcu umocnień  
 FIGURE 7. Profiles of velocity in vertical axis on the end of the bed protection

stępowała w pobliżu zwierciadła wody, natomiast przy największym badanym przepływie, tzn.  $q = 0,097 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , na wysokości około  $0,4 h$  nad dnem. Tu najwyraźniej zaznaczył się wpływ strumienia tranzytowego za odskokiem hydraulicznym, przemieszczającego się w pobliżu dna koryta (Urbański 2007) i mającego dużą zdolność erodującą. Należy sądzić, że największe rozmiary rozmycia i najbardziej intensywny przebieg rozwoju rozmycia w czasie przy tym przepływie jest także skutkiem oddziaływania niekorzystnego rozkładu prędkości na głębokości strumienia. Zwiększone wartości prędkości przy dnie ułatwiają odspajanie ziaren gruntu i ich przemiesz-

czanie, szczególnie w początkowej fazie intensywnego rozwoju rozmycia.

## Wnioski

Analiza wyników doświadczeń przeprowadzonych na modelu jazu z wpływem wody spod zasuwy, niekiedy do rozpraszania energii i umocnieniem dna w dolnym stanowisku, których celem było rozpoznanie kształtowania się rozmyć miejscowych w różnych warunkach hydraulicznych, pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

1. Bezpośredni wpływ na intensywność procesu rozmywania dna



- w czasie i ostateczne rozmiary rozmycia ma natężenie przepływu na modelu. Przy dwukrotnym wzroście jednostkowego natężenia przepływu na modelu (od  $q = 0,049 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  do  $q = 0,097 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) uzyskano około ośmiokrotny przyrost maksymalnej głębokości wyboju ( $h_{r\max}$ ) po ośmiu godzinach trwania doświadczenia.
2. Głębokość strumienia w stanowisku dolnym ma wpływ na ostateczny kształt i maksymalną głębokość rozmycia. Zwiększanie napęlenia ( $h$ ) na odpływie z budowli powoduje wzrost współczynnika zatopienia odskoku ( $n_z$ ), a następstwem tego jest opóźnienie rozwoju rozmycia w czasie i ograniczenie głębokości wyboju.
  3. Pomierzone na modelu rozkłady prędkości w końcowym przekroju umocnień wykazały przemieszczenie się strumienia tranzytowego przy dnie. Zwiększone wartości prędkości przy dnie nasilają proces rozmycia w początkowej fazie rozwoju.

## Literatura

- BŁAŻEJEWSKI R., ZAWADZKI P. 2001: Local scour in non-uniform bed material below a horizontal solid apron. *Arch. Hydro-Eng. and Environ. 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.
- 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 wodnomelioracyjnych. PWRiL, Warszawa.
- HOFFMANS G.J.C.M., PILARCZYK K.W. 1995: Local scour downstream of hydraulic structures. *Journal of Hydraulic Engineering.* 121, 4: 326–340.
- HOFFMANS G.J.C.M., VERHEIJ H.J. 1997: Scour manual. A.A., Balkema – Rotterdam – Brokfield.
- SIWICKI P. 2006: Lokalne rozmycia w stanowisku dolnym jazu. W: Problemy hydrotechniki. Modelowanie i hydroinformatyka oraz wybrane zagadnienia ochrony przeciwpodziowej. Red. S. Kostecki. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław: 299–306.
- URBAŃSKI J. 2003: Mechanizm tworzenia się rozmyć za jazem w świetle eksperymentalnych badań modelowych. Rozprawa doktorska. Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW, Warszawa.
- URBAŃSKI J. 2007: Długość odcinka strumienia o podwyższonej turbulencji za odskokiem hydraulicznym. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 519, Inżynieria i Kształtowanie Środowiska Obszarów Niezurbanizowanych – Woda w Inżynierii Krajobrazu: 329–338.
- ŻBIKOWSKI A. 1970: Badania laboratoryjne zależności głębokości rozmycia poniżej przelewu od długości umocnień i czasu trwania doświadczenia. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa.

## Summary

**Influence of flow conditions in weir model on depth of local scour.** Paper presented results of investigation of formation local scour on the model of weir. Investigations were conducted on model with overflow under closure, bottom of water basins, horizontal bed protection in down-



stream and washing-out area. 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 downstream on depth of scour, influence velocity of stream on eroded process.

**Author's address:**

Janusz Urbański  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji  
Środowiska  
ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa  
Poland  
e-mail: janusz\_urbanski@sggw.pl