

**Janusz URBAŃSKI**

Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW  
Department of Hydraulic Engineering and Environmental Recultivation WAU

## **Kształtowanie się rozmyć na modelu jazu ze zmienną wysokością piętrzenia**

### **Formation of scour on model of dam with changing of headwater**

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

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

#### **Wprowadzenie**

Zjawisko wzmożonej erozji koryt rzecznych poniżej budowli piętrzących jest przedmiotem badań prowadzonych od około stu lat. Wiedza o rozmiarach i kształcie tworzącego się wyboju ma duże znaczenia praktyczne. Nadmierny rozwój rozmycia zagrozić może stateczności budowli. Wysoki stopień złożoności zjawiska tworzenia się lokalnych rozmyć sprawia, że proces ten ciągle nie jest ostatecznie rozpoznany i nadal bardzo trudnym zagadnieniem w hydrotechnice jest prognozowanie rozmiarów i kształtu wyboju na etapie projektowania budowli. Jedną z najbardziej wiarygodnych metod sporządzania tego typu prognoz jest prowadzenie badań laboratoryjnych na fizycznych modelach budowli. Rozpoznanie kształ-

towania się rozmyć na modelu pozwala na opracowanie prognozy rozwoju erozji na obiekcie rzeczywistym.

Dotychczasowe wyniki doświadczeń laboratoryjnych, z uwagi na różnorodność warunków prowadzenia badań, zarówno pod względem geometrii, rozwiązań konstrukcyjnych i wielkości modeli badawczych, jak i hydraulicznych parametrów strumienia czy uziarnienia materiału rozmywanego, nie pozwalają prowadzić analiz porównawczych. Cały czas brakuje wystarczająco obszernego zbioru danych, aby można było analizować je łącznie w celu generalizowania wniosków. Uzasadnia to potrzebę prowadzenia tego typu badań.

W pracy przedstawiono wyniki doświadczeń przeprowadzonych na modelu jazu o typowej konstrukcji, których celem było rozpoznanie zmienności rozmiarów i kształtu wyboju w czasie trwania przepływu w różnych warunkach hydraulicznych. Podjęto także próbę określenia wpływu wysokości piętrzenia na wielkość rozmyć.

## Badania na modelu jazu

Przebieg rozmywania dna w czasie badano na modelu, którego schemat przyjęto za Żbikowskim (1970) i przedstawiono na rysunku 1. Jest to model jazu z zamknięciem zasuwowym, niecką wypadową i poziomym umocnieniem dna za wypadem. Model wykonany był w skali 1 : 30 w korycie prostokątnym o szerokości 1 m. Woda przepuszczana była pod zamknięciem podnoszonym na wysokość  $a$  podczas każdego doświadczenia.

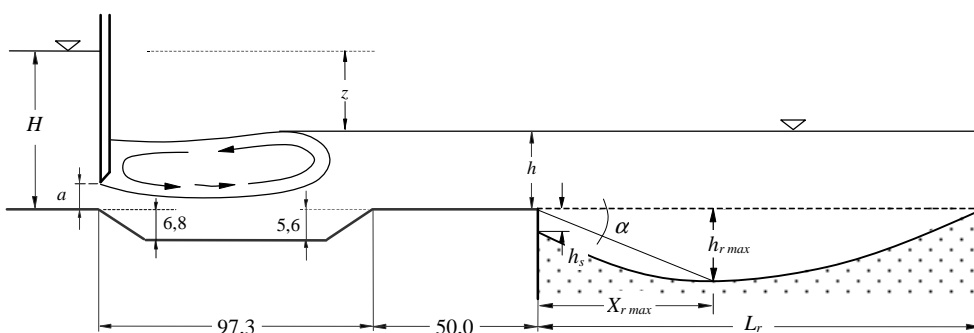
Doświadczenia polegały na formowaniu dołu rozmycia za umocnieniem w dnie wypełnionym gruntem przez strumień wody o określonych parametrach hydraulicznych (tab. 1). Czas trwania przepływu wynosił 480 minut. Podłużne profile erodowanego przez strumień dna mierzone w osiowej płaszczyźnie koryta po czasie: 60, 120, 240, 360 i 480 minut od początku doświadczenia.

Natężenia przepływu ( $Q$ ) i odpowiadające im głębokości wody dolnej ( $h$  – tab. 1) modelowano na podstawie średnich przepływów na małych rze-

kach nizinnych według kryterium podobieństwa Froude’a. Dla każdego badania przepływu zmieniano kilkakrotnie wysokość podniesienia zasuwę ( $a$ ), a tym samym położenie zwierciadła wody górnej. Uzyskiwano w ten sposób zmienną wysokość piętrzenia ( $z$ ) na modelu, obliczaną jako różnicę rzędnych zwierciadła wody górnej i dolnej. Dla przepływu  $q = 0,073 \text{ m}^2/\text{s}$  wysokość piętrzenia zmieniano pięciokrotnie w zakresie  $z = (0,157 \div 0,375)$ , a dla pozostałych trzykrotnie: dla  $q = 0,049 \text{ m}^2/\text{s}$  w zakresie  $z = (0,224 \div 0,370)$  i dla  $q = 0,097 \text{ m}^2/\text{s}$  w zakresie  $z = (0,197 \div 0,304)$ .

Pierwszą głębokość sprzężoną ( $h_1$ ) obliczano jako najmniejszą głębokość strumienia za zasuwą nazywaną przez Čertousova głębokością zdławioną:  $h_1 = \varepsilon a$ , gdzie  $\varepsilon$  jest współczynnikiem dławienia. Jego wartość zawarta w przedziale  $(0,615 \div 0,69)$  uzależniona jest przez Żukowskiego (Kiselev 1974) od stosunku  $a/H$ . Drugą głębokość sprzężoną ( $h_2$ ) obliczono z równania:

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



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

TABELA 1. Parametry hydrauliczne przepływu podczas doświadczeń  
 TABLE 1. Hydraulic parameters of flow during of experiments

$Q$	$q$	$h$	$H$	$z$	$a$	$\varepsilon$	$h_1$	$h_2$	$\sigma_z$
[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	[m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]
0,049	0,049	0,133	0,345	0,224	0,037	0,616	0,023	0,136	1,40
			0,417	0,296	0,032	0,614	0,020	0,148	1,28
			0,491	0,370	0,029	0,612	0,018	0,157	1,21
0,073	0,073	0,165	0,310	0,157	0,067	0,621	0,042	0,142	1,53
			0,359	0,206	0,057	0,618	0,035	0,159	1,38
			0,445	0,292	0,049	0,616	0,030	0,175	1,27
			0,486	0,333	0,046	0,615	0,028	0,184	1,21
			0,528	0,375	0,043	0,614	0,026	0,190	1,18
0,097	0,097	0,193	0,378	0,197	0,080	0,621	0,050	0,173	1,42
			0,462	0,281	0,064	0,617	0,040	0,201	1,24
			0,485	0,304	0,060	0,616	0,037	0,210	1,20

Jako współczynnik zatopienia odskoku hydraulicznego ( $\sigma_z$ ), zgodnie z zaleceniami praktycznymi (Dąbkowski i in. 1982), przyjęto iloraz:

$$\sigma_z = \frac{h + d + \Delta z}{h_2},$$

w którym  $d$  jest głębokością niecki, a wartość  $\Delta z$ , nazywaną spiętrzeniem strumienia na wypływie z niecki, oblicza się jako:  $\Delta z = \frac{v_h^2 - v_2^2}{2g}$ ,

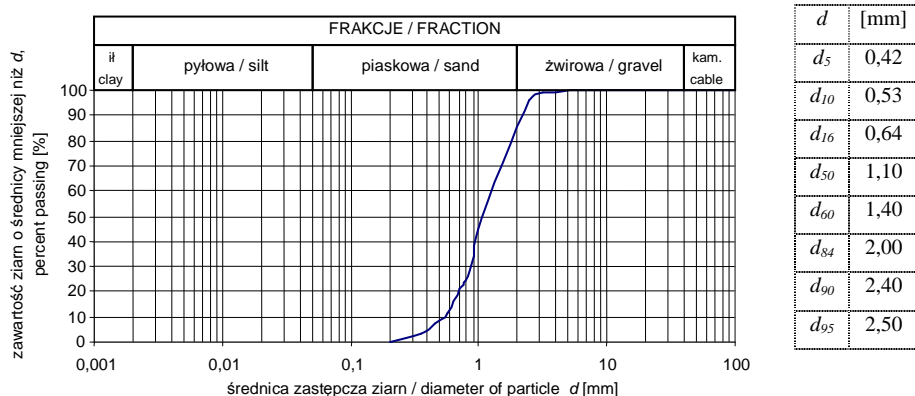
gdzie  $v_h$  i  $v_2$  są prędkościami w przekrojach strumienia o głębokościach odpowiednio  $h$  i  $h_2$ .

W badaniach wykorzystano jeden materiał rozmywalny – piasek sortowany o krzywej uziarnienia i średnicach charakterystycznych ( $d$ ) przedstawionych na rysunku 2.

## Wyniki badań i ich analiza

Na rysunkach 3, 4 i 5 przedstawiono pomierzone w osiowej płaszczyźnie modelu podłużne profile rozmytego dna po różnym czasie trwania przepływu.

W czasie ośmiogodzinnego doświadczenia nie osiągnano stabilizacji dołu rozmycia, zarówno pod względem kształtu, jak i głębokości maksymalnej oraz położenia przekroju, w którym ona występuje. Nieznacznie zmieniało się położenie i nachylenie opadającego stoku wyboju. Położenie stoku wznoszącego się ulegało zmianom, przy czym odcinki tego stoku o największym nachyleniu do poziomu były w kolejnych odcinkach czasu w przybliżeniu równoległe do siebie. Za wybojem powstawało odsypisko materiału wyerodowanego.



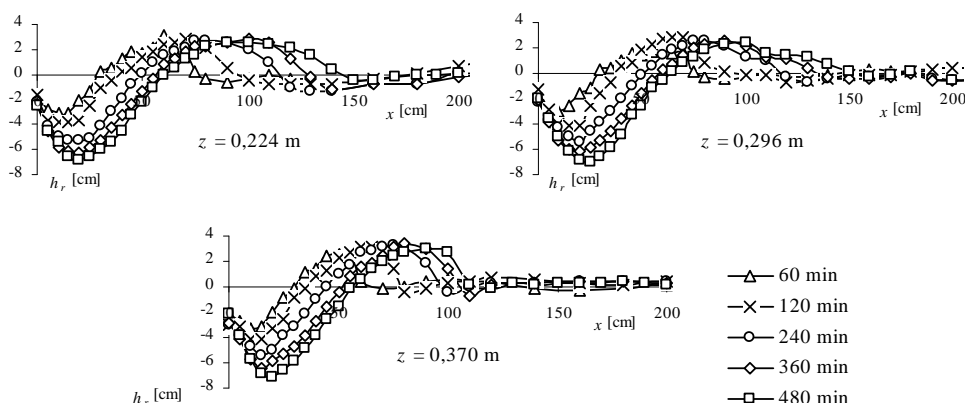
RYSUNEK 2. Krzywa uziarnienia i średnice charakterystyczne materiału rozmywalnego użytego na modelu

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

Przy przepływach  $q = 0,049 \text{ m}^2/\text{s}$  i  $q = 0,073 \text{ m}^2/\text{s}$  występowało ono przez cały czas trwania doświadczenia, a przy przepływie  $q = 0,097 \text{ m}^2/\text{s}$  zanikało po upływie czterech godzin.

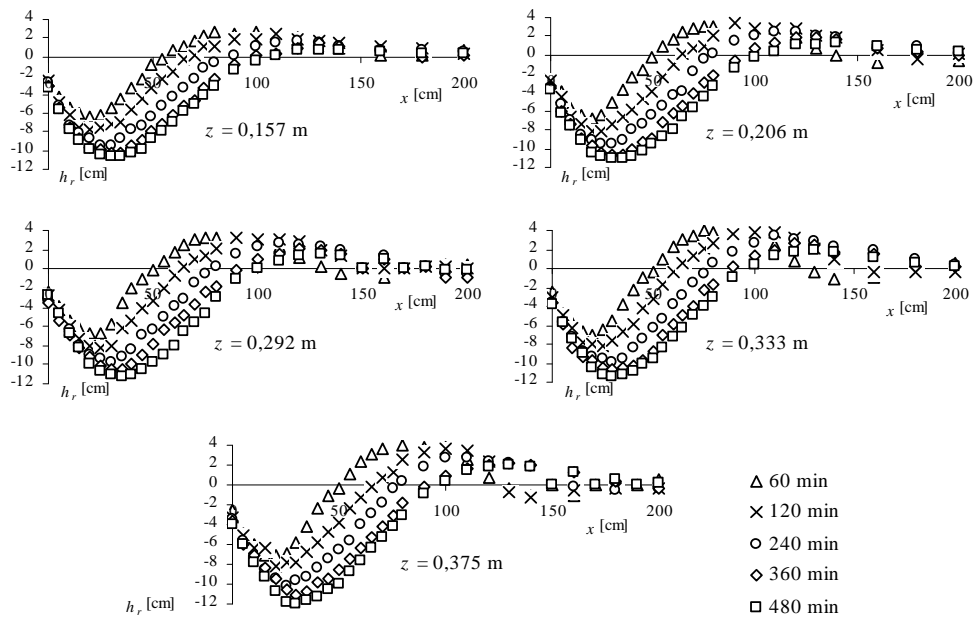
Wraz ze zmianą wysokości piętrenia ( $z$ ) na modelu nie zmienia się kształt wyboju, o czym świadczą profile rozmyć przedstawione na rysunku 6. Sporządzono je w układzie bezwymiarowym. Głębokość rozmycia ( $h_r$ ) na dłu-

gości  $x$  odniesiono do maksymalnej głębokości wyboju ( $h_{r\max}$ ), a  $x$  do odległości występowania największego rozmycia  $X_{r\max}$  względem końca umocnień. Na kształt rozmycia wpływają hydrauliczne parametry strumienia. Długość wyboju ( $L_r$ ) uformowanego podczas doświadczeń z przepływem  $q = 0,073 \text{ m}^2/\text{s}$  wynosiła około  $L_r = (2,5 \div 3)X_{r\max}$ . Rozmycie ukształ-

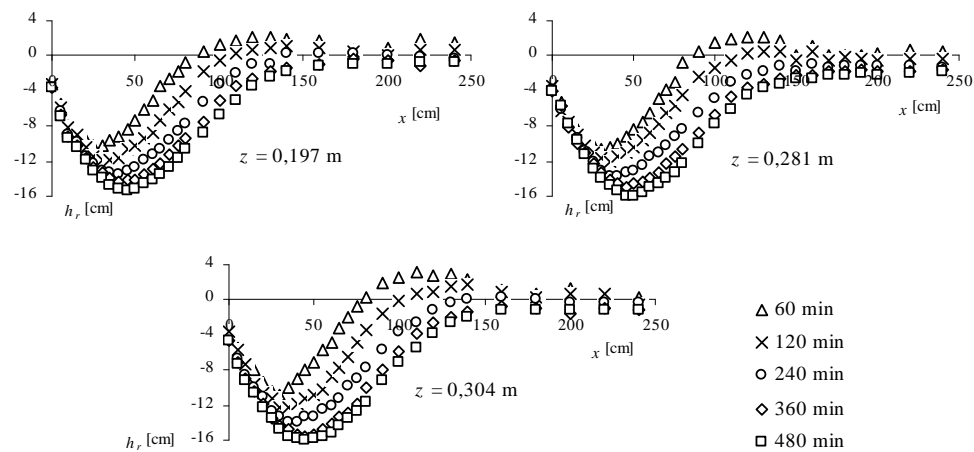


RYSUNEK 3. Profile rozmycia w czasie w doświadczeniach z przepływem  $q = 0,049 \text{ m}^2/\text{s}$

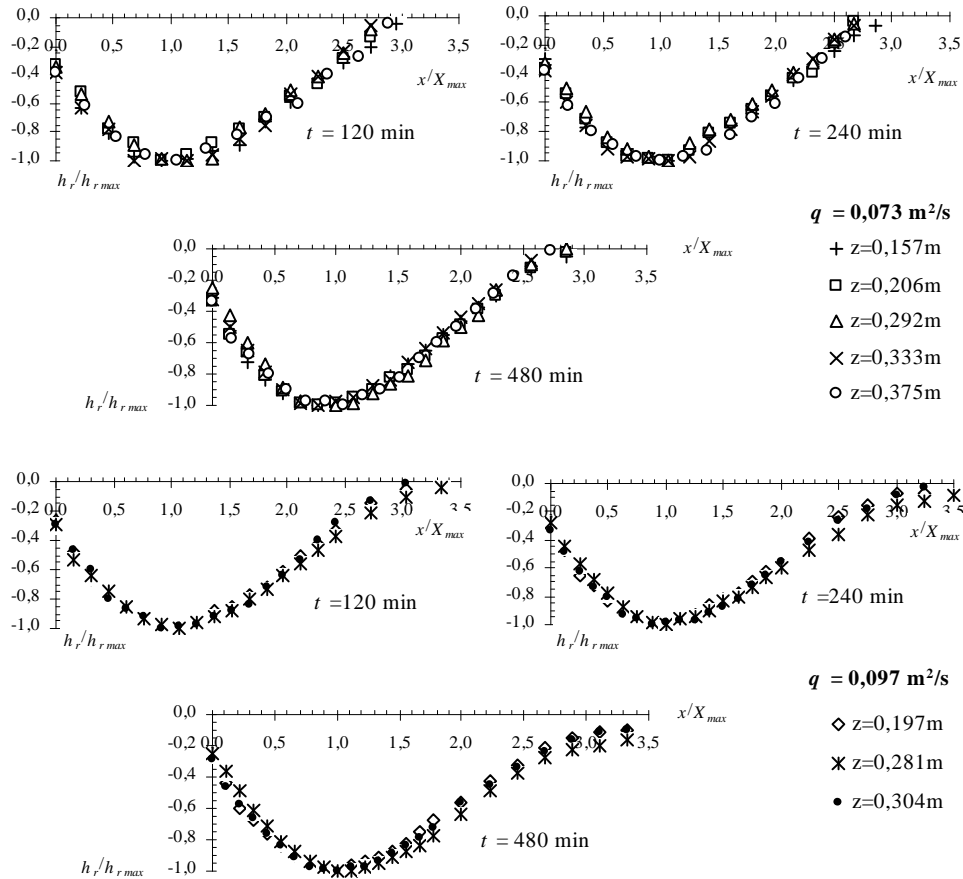
FIGURE 3. Profiles of erosion during investigation in experiences for discharge  $q = 0,049 \text{ m}^2/\text{s}$



RYSUNEK 4. Profile rozmycia w czasie w doświadczeniach z przepływem  $q = 0,073 \text{ m}^2/\text{s}$   
 FIGURE 4. Profiles of erosion during investigation in experiences for discharge  $q = 0.073 \text{ m}^2/\text{s}$



RYSUNEK 5. Profile rozmycia w czasie w doświadczeniach z przepływem  $q = 0,097 \text{ m}^2/\text{s}$   
 FIGURE 5. Profiles of erosion during investigation in experiences for discharge  $q = 0.097 \text{ m}^2/\text{s}$

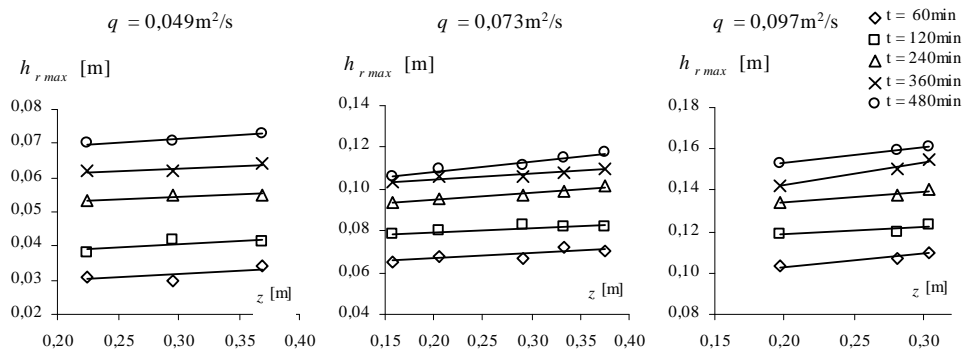


RYSUNEK 6. Profile rozmyć na modelu w układzie współrzędnych bezwymiarowych  
 FIGURE 6. Profiles of erosion on model in dimensionless coordinate system

towane przy przepływie  $q = 0,097 \text{ m}^2/\text{s}$  w czasie nieprzekraczającym czterech godzin miało długość  $L_r = (3 \div 3,5)X_{r,max}$ , a następnie  $L_r$  przekraczała odcinek dna na modelu wypełniony piaskiem i pomiar jej był niemożliwy.

Na podstawie wyników badań podjęto próbę określenia wpływu wysokości piętrzenia na modelu na rozmiary rozmycia. Na rysunku 7 przedstawiono pomierzone po czasie trwania przepływu ( $t$ ) wartości maksymalnej głębokości

wyboju ( $h_{r,max}$ ) w zależności od wysokości piętrzenia ( $z$ ). Linie na wykresach wskazują, że wraz ze wzrostem wysokości piętrzenia zwiększa się maksymalna głębokość wyboju. Ośmiogodzinne doświadczenia z przepływem  $q = 0,073 \text{ m}^2/\text{s}$  wykazały, że przy 2,4-krotnym wzroście  $z$  maksymalna głębokość rozmycia wzrosła około 11%, natomiast przy  $q = 0,097 \text{ m}^2/\text{s}$  1,5-krotne zwiększenie  $z$  spowodowało wzrost  $h_{r,max}$  o 5%. Wpływ na to może mieć wartość współczynnika zatopienia



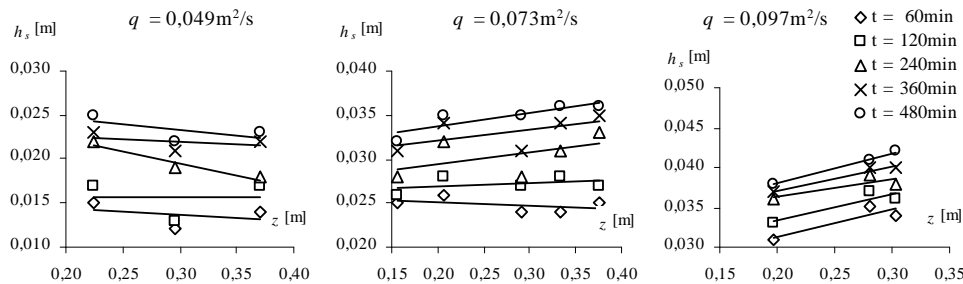
RYSUNEK 7. Zmienność maksymalnej głębokości rozmycia wraz z wysokością piętrzenia na modelu dla badanych przepływów  
 FIGURE 7. Variability of maximum depth of scour with headwater on the model for investigated discharges

odskoku ( $\sigma_z$ ), która maleje wraz ze wzrostem wysokości piętrzenia. 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.

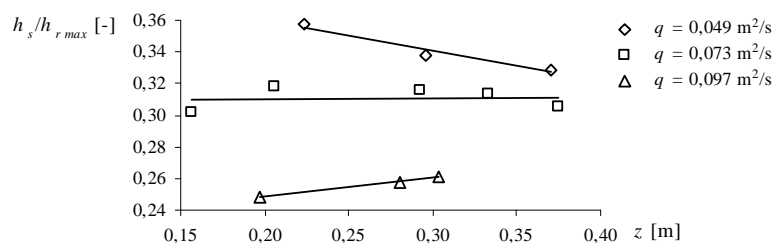
Rozmycie krawędziowe, nazywane głębokością odsłonięcia umocnień ( $h_s$ ), które występowało na modelu podczas wszystkich doświadczeń, również zwiększa się wraz ze wzrostem wysokości piętrzenia ( $z$ ). Wskazują na to wykresy przedstawione na rysunku 8. Tylko wyniki pomiarów  $h_s$  przy najmniejszym badanym przepływie, tzn. przy  $q = 0,049 \text{ m}^2/\text{s}$ , nie pozwoliły jednoznacznie określić tej zależności. Na rysunku 9 przedstawiono zmienność ilorazu  $h_s/h_{r\max}$  wraz ze wzrostem piętrzenia. Wartości  $h_s/h_{r\max}$  obliczono na podstawie wyników pomiarów tych wielkości po 480 minutach trwania przepływu. Badania wykazały, że rozmycie krawędziowe na modelu stanowi

(24÷36)% maksymalnej głębokości wyboju (rys. 9), a przeciętnie  $h_s = 0,3h_{r\max}$ .

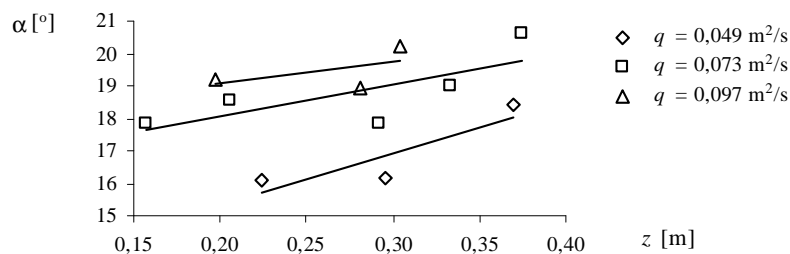
Analizie poddano zmienność kąta  $\alpha$ , jaki tworzy z poziomem odcinek łączący koniec umocnień z miejscem największego rozmycia w osiowej płaszczyźnie koryta. Kąt ten związany jest z nachyleniem stoku wyboju od strony budowli i jest parametrem rozmycia uwzględnianym przy ocenie bezpieczeństwa budowli. Wyznaczono średnie wartości  $\alpha$  dla rozmyć kształtujących się w czasie 480 minut trwania przepływu i wyniki przedstawiono na rysunku 10. Uzyskane wartości kąta, zawarte w przedziale  $\alpha \in (16 \div 21)^\circ$ , są podobne do spotykanych w literaturze dla rozmycia ukształtowanego przez strumień o podwyższonej turbulencji – według Popovej (1970)  $\alpha \in (14 \div 18)^\circ$ , a według Šterenlichta (1984)  $\alpha \in (17 \div 30)^\circ$ . Wraz ze wzrostem natężenia przepływu i wysokości piętrzenia na modelu zwiększa się kąt  $\alpha$  (rys. 10).



RYSUNEK 8. Zmienność  $h_s$  wraz z wysokością piętrzenia ( $z$ ) dla badanych przepływów  
 FIGURE 8. Variability of  $h_s$  with headwater on the model for investigated discharges



RYSUNEK 9. Zmienność ilorazu  $h_s/h_{rmax}$  wraz z wysokością piętrzenia ( $z$ ) dla badanych przepływów  
 FIGURE 9. Variability of relation  $h_s/h_{rmax}$  with headwater on the model for investigated discharges



RYSUNEK 10. Zmienność kąta  $\alpha$  wraz z wysokością piętrzenia ( $z$ ) na modelu  
 FIGURE 10. Variability of angle  $\alpha$  with headwater on the model

## Podsumowanie

W czasie 480 minut trwania przepływu zwiększały się rozmiary wyboju, a jego kształt nie zmieniał się. Nie osiągnięto stabilizacji dołu rozmycia. Na wartości podstawowych parametrów wyboju, decydujących o zachowaniu stateczności budowli, takich jak maksymalna głębokość rozmycia i kąt  $\alpha$ ,

największy wpływ mają hydrauliczne charakterystyki strumienia, tzn. natężenie przepływu i głębokość wody dolnej w przekroju końca umocnień.

Wysokość piętrzenia jest istotnym parametrem wpływającym na rozmiary rozmycia. Pomimo iż konstrukcja modelu pozwalała na stosunkowo niewielkie zmiany wysokości piętrzenia, to wraz z jej wzrostem zwiększała się



maksymalna głębokość wyboju, rozmycie krawędziowe i kąt  $\alpha$ , a nie zmieniał się kształt dołu rozmycia.

## Literatura

- DĄBKOWSKI Sz. L., SKIBIŃSKI J., ŻBIKOWSKI A. 1982: Hydrauliczne podstawy projektów wodnomelioracyjnych. PWRiL, Warszawa.
- KISELEV P.G. 1974: Spravočnik po gidravličeskim rasčeta. Energja, Moskva.
- POPOVA K.S. 1970: Issledowanie kinematičeskoj struktury potoka na risbermie i v jame razmyva za vodoslivnymi plotinami na niesviaznyh gruntach. Izvestia VNIIG. T. 94.
- ŠTERENLICHT D.V. 1984: Gidravlika. Energoatomizdat, Moskva.
- URBAŃSKI J. 2003: Mechanizm tworzenia się rozmyć za jazem w świetle eksperymentalnych badań modelowych. Rozprawa doktorska, Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji 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.

## Summary

**Formation of scour on model of dam with changing of headwater.** Paper presented analysis results of investigations of model on formation of scour in time. Investigations were conducted on model taired constructions with the over of water under the closure, bottom of water basins and washing-out area. Model were made in scale 1 : 30. In investigations were used as eroded material – sand ( $d_{50} = 1,1$  mm). For modelling hydraulic parameters of flow on model were used to Froude's criterion. Purpose of investigations was recognition of variability of sizes and of shape of scour during of flow in different hydraulic parameters of flow and at variable headwater on the model. Investigations showed that with increase of headwater on the model is observed increase of dimensions of scour.

### Author's address:

Janusz Urbański  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska  
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa  
Poland