

WPLYW SKALI MODELU JAZU NA ROZMYCIE MIEJSCOWE

Szczepan L. Dąbkowski, Piotr Siwicki, Janusz Urbański

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badania wpływu skali modelu jazu na kształtowanie się rozmycia dna w dolnym stanowisku w czasie. Badania przeprowadzono na modelach jazu z przepływem wody nad zamknięciem, z niecką do rozpraszania energii i strefą umocnień dna. Modele wykonano w dwóch skalach geometrycznych: 1 : 30 i 1 : 55. W doświadczeniach wykorzystano jeden materiał rozmywany – piasek

($d_{50} = 1,1\text{mm}$, $\sigma = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} = 1,77$). Wyznaczono wartość wykładnika potęgi skali i jej

zmienność w trakcie formowania się wyboju, na podstawie badań rozmyć na dwóch modelach. Przyjmując model większy, jako prototyp dla mniejszego, w modelowaniu przepływu według kryterium Froude'a (bez modelowania materiału rozmywanego), maksymalna głębokość rozmycia rozwija się wolniej na modelu niż na prototypie.

Słowa kluczowe: jaz, rozmycia miejscowe, modelowanie

WSTĘP

Badania wyboju powstającego w dolnym stanowisku budowli mają praktyczne zastosowanie w projektowaniu i ocenie bezpieczeństwa budowli. Na podstawie wyników wielu dotychczasowych badań znany jest ogólny mechanizm rozmycia oraz wpływ różnych czynników na ten proces. Złożoność zjawiska i duża liczba czynników wpływających na jego przebieg sprawiają, że powstała bogata literatura tego zagadnienia. W większości opracowania odnoszą się jedynie do określonych, modelowanych warunków, które odbiegają od obserwowanych w naturze. Jedną z przyczyn jest trudność modelowania materiału rozmywalnego, a niekiedy ze względów technicznych jest ono niemożliwe. Opracowano już wiele równań do opisu głębokości rozmycia. Dla przepływu nad przegrodą wzory na głębokość rozmycia podali: Schoklitsch – w 1932 r., Veronese – w 1937 r., Jaeger – w 1939 r., Eggenberger – w 1944, Hartung – w 1959 r. Opracowane przez nich wzory można sprowadzić do ogólnej postaci:

$$h_r + h_0 = AH^a q^b d_m^c \quad (1)$$

gdzie: h_r – maksymalna głębokość rozmycia dna,
 h_0 – głębokość strumienia wody,
 q – natężenie jednostkowe przepływu,
 H – spad na budowli, czyli różnica rzędnych wody górnej (WG) i dolnej (WD),
 d_m – średnica ziaren wraz z drobniejszymi stanowiących 90% masy próby.

Wartości liczbowe współczynnika A , wykładników potęg a , b i c dla d_{90} wyrażonej w mm, zebrane są w tabeli 1. Wzory wymienionych autorów odnoszą się do przypadków, gdy strumień spada na dno nieumocnione.

Tabela 1. Wartości stałych w wybranych wzorach typu (1)

Table 1. Constant values for equations type (1)

Wzór Equation	A	a	b	c	$d_m = d_{90}$ mm (d_{85})	Uwagi Note
Schoktische	4,75	0,20	0,57	-0,32	3-5	
Veronese	3,68	0,225	0,54	-0,42		
Jaegera	6,00	0,58	0,50	-0,33		
Eggenbergera	22,80*	0,50	0,60	-0,40	0,122, 0,35, 0,755	
Hartunga	12,40	0,36	0,64	-0,32	(2-3), (3-5), (5-7), (7-10), (10-15)	dla $h_0 < 1,8q^{2/3}$

*Wartość odpowiadająca przepływowi tylko nad przelewem.

Z porównania współczynników liczbowych w tabeli 1 wynika, że wzór Eggenbergera daje wyraźnie większe głębokości rozmyć. Może to być spowodowane użyciem w doświadczeniach znacznie drobniejszego materiału dennego oraz usuwania odsypiska, jakie w trakcie rozmycia na modelu formowało się za wybojem. Przytoczone wzory nie uwzględniają czasu trwania doświadczenia, gdyż autorzy założyli, że rozmycie osiągnęło swoje maksimum.

Obszerny przegląd podobnych formuł dokonany m.in. w literaturze krajowej [Dąbkowski i in., 1982; Siwicki, 2002] wykazał, że ze względu na znaczne zróżnicowanie uziarnienia materiału rozmywalnego, geometrii wypadu (tzn. niecki wypadowej lub jej braku), długości umocnień odcinka koryta na wypadzie, różny sposób przeprowadzania wody, czasu trwania doświadczeń i wiele innych cech badanych przypadków, jest bardzo trudno prowadzić analizy porównawcze wyników doświadczeń. Nie ma jeszcze wystarczająco obszernych wyników doświadczeń, aby można analizować łącznie cały zbiór dotychczasowych danych w celu zgeneralizowania wniosków. Gromadzenie coraz to nowych doświadczeń i okresowe analizowanie wyników powoli poszerza znajomość pewnych prawidłowości w przebiegu procesu rozmycia na modelach. Jednym z zagadnień nadal wymagających głębszego rozpoznania jest wpływ wielkości modelu, uziarnienia materiału dennego i czasu trwania przepływu wody na rozmiary rozmycia, a także wpływ tych czynników na strukturę ruchu turbulентnego na wypadzie budowli. Niewątpliwym kryterium modelowania powinno być podobieństwo podatności cząstek materiału dennego na przemieszczenie przez strumień wody. Zastosowana po raz pierwszy przez Leviego [1967] metoda modelowania zakłada, że prędkość krytyczna (v_0), przy której rozpoczyna się ruch cząsteczek, i ich cecha hydrauliczna (w) powinny spełniać warunek podobieństwa prototypu i modelu:

$$\lambda_{v_0} = \lambda_w = \lambda_v = \lambda_{h_0}^{1/2} \quad (2)$$

w którym λ to skala wielkości występujących jako indeksy, przy czym h_0 – głębokość strumienia wody, a v – prędkość strumienia.

Hincu i Lupu [1961] stwierdzili, że forma wyboju nie zależy od natury materiału rozmywanego, lecz tylko od konstrukcji budowli i liczby Froude'a w wyboju wyrażonej

wzorem $Fr_0 = \frac{v_0^2}{gh_r}$. Podali też wzór na wartość mnożnika do obliczania maksymalnej

głębokości rozmycia w postaci:

$$\lambda_{h_r} = \lambda_l \left(\frac{\lambda_v}{\lambda_{v_0}} \right)^{0,5} \quad (3)$$

gdzie λ_l jest skalą geometryczną modelu.

Z warunku (2) wynika, że bez zachowania go nie można oczekiwać podobieństwa głębokości rozmyć na prototypie i jego modelu. Zatem materiał rozmywalny w obu przypadkach powinien być inny. Według wzoru (3), przeliczając głębokości rozmycia z modelu na prototyp, w przypadku użycia w doświadczeniach tego samego materiału rozmywalnego ($\lambda_{v_0} = 1$), skala dla głębokości to $\lambda_{h_r} = \lambda_l (\lambda_v)^{0,5}$, a jeśli uwzględnić, że

$\lambda_v = \lambda_l^{0,5}$, wtedy otrzymuje się:

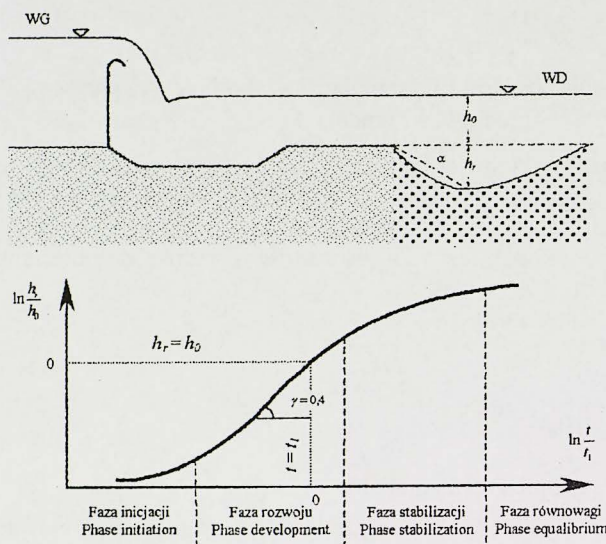
$$\lambda_{h_r} = \lambda_l \lambda_l^{0,25} = \lambda_l^{1,25} \quad (4)$$

W niektórych dotychczasowych doświadczeniach i wzorach przyjmowano, że głębokość po pewnym czasie przestaje wzrastać mimo dalszego oddziaływania wody na koryto. Na podstawie badań laboratoryjnych na modelach z przepływem strumienia o małej liczbie Froude'a, Breusers [1966], Dietz [1969] i Zanke [1978] wyróżnili cztery fazy rozwoju wyboju: początkową, intensywnego wzrostu, stabilizacji wyboju i fazę równowagi (rys. 1).

Skalę czasu, jako ważny czynnik w badaniach na modelach fizycznych, rozważano na podstawie wyników doświadczeń przeprowadzonych dla bardzo zróżnicowanych skal geometrycznych, prędkości i materiału dennego oraz profilów prędkości i intensywności turbulencji [Breusers, 1966; van der Meulen i Vinjé, 1975; Błażejowski i Nowak, 1986; Hoffmans i Pilarczyk, 1995; Hoffmans i Verheij, 1997].

Stwierdzono, że przy interpretacji wyników badań niezbędne jest uwzględnianie skali czasu formowania się lokalnego rozmycia. Van der Meulen i Vinjé [1975], na podstawie badań zaproponowali wyrazić morfologiczną skalę czasu dla rozmyć zależnością: $\lambda_T = \lambda_{h_r}^{-0,15}$. Badania Błażejowskiego i Nowaka [1986], Siwickiego [2002],

Urbańskiego [2003] przeprowadzone na modelach w trzech skalach wykazały, że morfologiczna skala czasu dla rozmyć nie przyjmuje stałej wartości i zależna jest od fazy rozwoju wyboju. W badaniach tych natężenia przepływów modelowano według kryterium podobieństwa Froude'a, a materiał rozmywalny zgodnie ze skalą geometryczną.



Rys. 1. Głębokość rozmycia w zależności od czasu trwania doświadczenia [Hoffmans i Pilarczyk, 1995]: t_1 – czas, po którym maksymalna głębokość rozmycia jest równa początkowej głębokości strumienia (h_0)

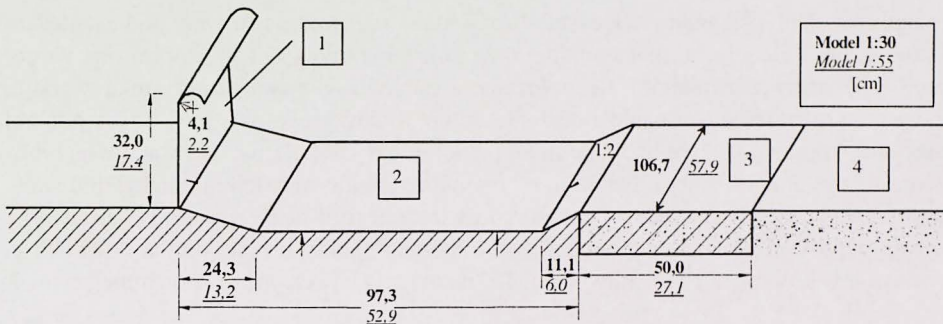
Fig. 1. Relationship between depth of scour and time of experiment [Hoffmans and Pilarczyk, 1995]: t_1 – time at which the maximum scour depth equals the initial flow depth (h_0)

Celem pracy jest analiza przebiegu w czasie rozmywania dna w dolnym stanowisku jazu odwzorowanego na modelu w dwóch skalach geometrycznych przy użyciu tego samego materiału rozmywalnego.

METODA BADAŃ

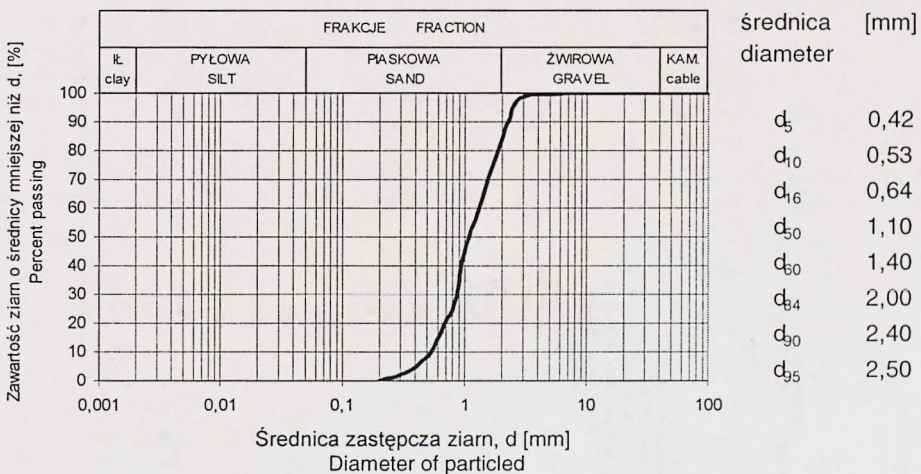
Przebieg rozmywania dna w czasie badano na modelach jazu wykonanych w dwóch skalach: 1 : 30 i 1 : 55. Schemat badanej budowli (rys. 2) przyjęto za Żbikowskim [1970]. Był to jaz z zamknięciem zasuwowym, z zaokrągloną krawędzią przelewową, niekąką wypadową i odcinkiem dna umocnionego. Woda przepuszczana była nad zamknięciem. Podstawowe wymiary obrysu budowli kształtującej przepływ, odpowiadające przyjętym skalom, przedstawiono na rysunku 2.

Doświadczenia przeprowadzono dla odpowiadających sobie natężeń przepływów modelowanych według kryterium podobieństwa Froude'a: $Q_{30} = 0,073 \text{ m}^3/\text{s}$ na modelu w skali 1 : 30 i $Q_{55} = 0,018 \text{ m}^3/\text{s}$ na modelu w skali 1 : 55. W skali 1 : 1 natężenie przepływu wynosiłoby $Q = 360 \text{ m}^3/\text{s}$. Przepływy jednostkowe $q = Q/B$ wynosiłyby odpowiednio: $q_{30} = 0,069 \text{ m}^2/\text{s}$, $q_{55} = 0,031 \text{ m}^2/\text{s}$ oraz $q = 12 \text{ m}^2/\text{s}$ w skali 1 : 1. Odpowiadające tym przepływowi głębokości wody (h_0) w dolnych stanowiskach modeli jazu wynosiły odpowiednio: 0,165 m i 0,090 m, a w naturze 4,95 m.



Rys. 2. Schemat i wymiary badanej budowli piętrzącej: 1 – ściana przelewu, 2 – dno niecki, 3 – umocnienie dna koryta, 4 – rozmywalny odcinek dna
 Fig. 2. Schema and dimensions of investigated taird construction. 1 – spillway, 2 – bottom of water basins, 3 – bed protection, 4 – washing-out area

Na obu modelach wykorzystano ten sam materiał rozmywalny – piasek sortowany o krzywej uziarnienia i średnicach charakterystycznych przedstawionych na rysunku 3. Czas trwania przepływu na obu modelach wynosił 48 godzin. Profile rozmyć mierzono w osi koryta po czasie: 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 16, 20, 26, 32, 38 i 48 godzin.



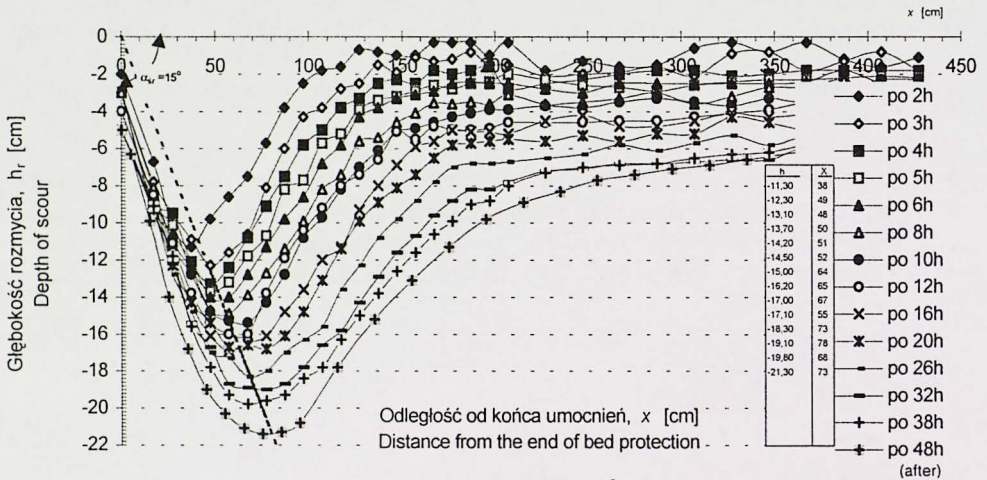
Rys. 3. Krzywa uziarnienia i średnice charakterystyczne materiału rozmywalnego użytego w doświadczeniach

Fig. 3. Granulation and characteristic diameters of sand used on the models

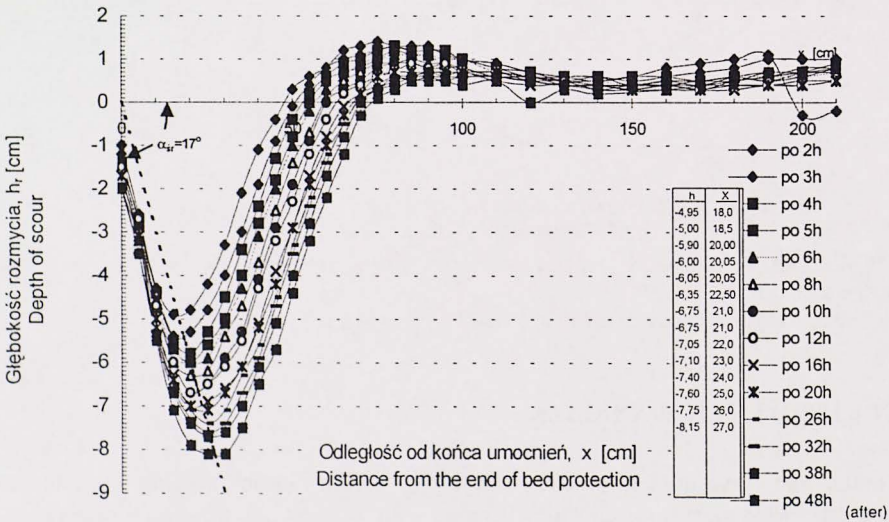
WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Pomierzone w osi modelu profile rozmyć po różnych czasach trwania doświadczenia przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Wynika z nich, że na obu modelach profile wyboju zmieniały się w ciągu 48 godzin trwania doświadczenia ze stałym natężeniem

przepływu. Nie osiągnięto więc stabilizacji dołu rozmycia, zarówno pod względem kształtu, jak i głębokości maksymalnej oraz położenia przekroju, w którym ona występuje. Nieznacznie zmieniło się położenie i nachylenie opadającego stoku wyboju, a wyraźnym zmianom ulegało położenie stoku wznoszącego się, przy czym odcinki tego stoku o największym nachyleniu do poziomu były w kolejnych czasach w przybliżeniu równoległe do siebie. Na odcinku rozmytego dna o niewielkim nachyleniu stoku występowały fałdy tworzące się z materiału wlezonego. Kąt α (rys. 4 i 5), jaki tworzy prosta poprowadzona z końca umocnienia i łącząca punkty o maksymalnej głębokości rozmycia w kolejnych czasach, wynosił 15° na modelu większym i 17° na mniejszym.



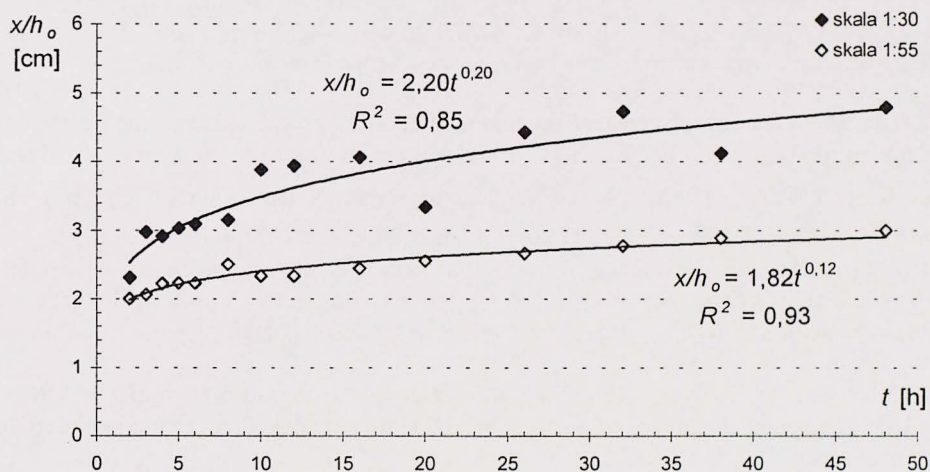
Rys. 4. Profile rozmycia w czasie dla przepływu $Q = 0,073 \text{ m}^3/\text{s}$ na modelu w skali 1 : 30
 Fig. 4. Profiles of erosion during investigation for discharge $Q = 0,073 \text{ m}^3/\text{s}$ on skale model 1 : 30



Rys. 5. Profile rozmycia w czasie dla przepływu $Q = 0,018 \text{ m}^3/\text{s}$ na modelu w skali 1 : 55
 Fig. 5. Profiles of erosion during investigation for discharge $Q = 0,018 \text{ m}^3/\text{s}$ on skale model 1 : 55

Charakterystyczną różnicą w profilach rozmyć na obu modelach jest odsypisko formujące się za dołem rozmycia na modelu mniejszym i jego brak na modelu większym. Tłumaczyć to można mniejszymi prędkościami przepływu przy takich samych prędkościach granicznych, a więc potrzebą dłuższego czasu przepływu na mniejszym modelu na przetransportowanie materiału.

Względne odległości x/h_0 od końca umocnień do miejsca występowania maksymalnej głębokości rozmycia $h_{r \max}$ kształtowały się inaczej na każdym z modeli. Na modelu większym głębokość maksymalna oddalała się szybciej od przekroju końca umocnień (rys. 6). W obu przypadkach wartości x/h_0 ciągle wzrastały, a więc proces rozmycia nie uległ jeszcze zakończeniu. Ich przesunięcie w czasie w doświadczeniach na modelu w skali 1 : 30 były bardziej zróżnicowane, o czym świadczy rozrzut punktów na rysunku 6.

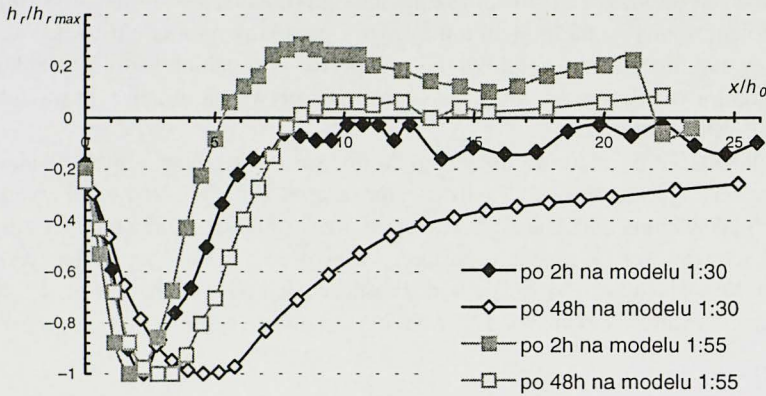


Rys. 6. Zmiana odległości przekroju występowania maksymalnej głębokości wyboju od końca umocnień w trakcie trwania przepływu na obu modelach

Fig. 6. Change of distance of cross section occurrence of maximum depth of scour from the end of bed protection during investigation on two models

Na rysunku 7 przedstawiono w układzie współrzędnych bezwymiarowych ($h_r/h_{r \max}$; x/h_0) profile rozmyć na obu modelach na początku (po 2 godzinach) i na końcu doświadczenia (po 48 godzinach). Maksymalne głębokości występowały dalej od końca umocnień na modelu większym. Kształt wyboju był bardziej zwarty na modelu mniejszym, co wyraźnie widać z profilu po 48 godzinach.

Odsypisko, podpiętrzając strumień, opóźnia erozję wznoszącego się stoku dołu rozmycia. Odsypisko zmniejsza przekrój przepływu nad nim, co powoduje wzrost prędkości w przekroju jego występowania i podpiętrzanie strumienia powyżej, a tam prawdopodobnie zmniejsza prędkość. Różnica przebiegu rozmyć na obu modelach spowodowana jest tym, że rzeczywiste prędkości i naprężenia styczne na obu modelach były inne, a materiał rozmywalny ten sam.



Rys. 7. Profile rozmycia po 2 i 48 godzinach trwania doświadczenia na obu modelach
 Fig. 7. Shapes of erosion after 2 and 48 hours of experience on two models

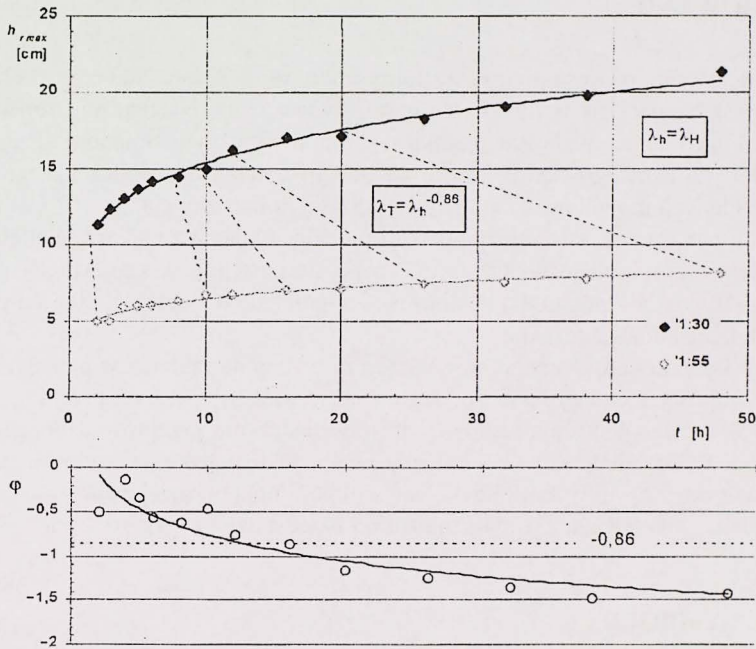
Dla takich warunków przeanalizowano morfologiczną skalę czasu wyrażoną równaniem zaproponowanym przez Dietza [1969] i przyjmowanym m.in. w pracach Błażejewskiego i Nowaka [1986]: $\lambda_T = \lambda_h^\phi$. Głębokości rozmyć na modelu mniejszym przeliczono na odpowiadające im głębokości na modelu większym, uwzględniając przyjęte skale geometryczne. Otrzymano, że wykładnik potęgi ϕ nie przyjmuje wartości stałej, a zmienia się w czasie od wartości $-0,5$ na początku do $-1,4$ na końcu doświadczenia. Wartość średnia ϕ wynosi $-0,86$. Zmienność wykładnika potęgi ϕ przedstawiono na rysunku 8.

Intensywność rozwoju wyboju w czasie zależy od rozkładu prędkości i makroturbulencji na końcu umocnień i w wyboju oraz od hydraulicznej charakterystyki materiału rozmywalnego.

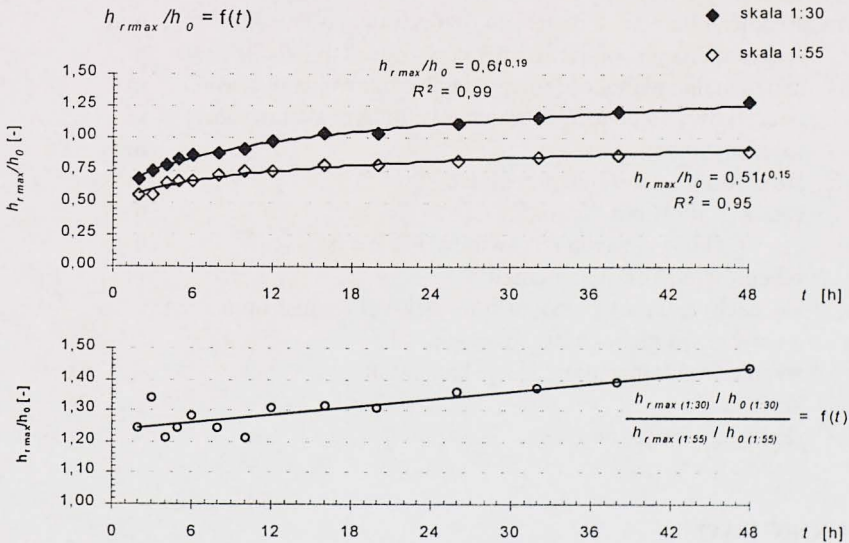
Z uzyskanej zmienności skali czasu widać, że wybój szybciej rozwijał się na modelu większym. Nachylenia skarp wyboju od strony umocnień były podobne na obu modelach, natomiast kąty nachylenia wznoszących się stoków dołów rozmycia znacznie się od siebie różniły. Bezpośredni wpływ na to miało odsypisko powstające na modelu mniejszym. Jego obecność i powolne rozmywanie w czasie przepływu z pewnością powoduje powolniejszy rozwój rozmycia, a więc wydłuża czas ostatecznego zakończenia procesu.

O intensywniejszym rozwoju rozmycia na modelu większym świadczy również wykres na rysunku 9. Przedstawia on przyrosty względnej maksymalnej głębokości wyboju ($h_{r,max}/h_0$) na obu modelach w czasie trwania przepływu. W trakcie całego doświadczenia większa jest względna głębokość rozmycia na modelu w skali 1 : 30. Im dłuższy czas trwania doświadczenia, tym większa różnica względnej głębokości wyboju między dwoma modelami, na co wskazuje rosnąca w czasie wartość ilorazu

$$\frac{h_{r,max(1:30)} / h_{0(1:30)}}{h_{r,max(1:55)} / h_{0(1:55)}} \quad (\text{rys. 9}).$$



Rys. 8. Zmienność wykładnika potęgi φ morfologicznej skali czasu dla dwóch modeli jazu
 Fig. 8. Change of φ parameter for morphological time scale between two models of the dam



Rys. 9. Zmienność względnej maksymalnej głębokości rozmycia $h_{r \max}/h_0$ podczas doświadczeń na obu modelach
 Fig. 9. Change of relative maximum depth of scour $h_{r \max}/h_0$ during investigation on two models

PODSUMOWANIE

W modelowaniu procesu rozmycia istotny jest czynnik czasu. Na obu modelach profile wyboju zmieniały się w trakcie trwania doświadczenia. Nieznacznie zmieniało się położenie i nachylenie opadającego stoku wyboju, a wyraźnym zmianom ulegało położenie stoku wznoszącego się. W czasie 48 godzin trwania doświadczenia na żadnym z dwóch badanych modeli nie osiągnięto stabilizacji dołu rozmycia.

Rozwój wyboju w czasie zależy od skali modelu. Badania z wykorzystaniem jednego materiału rozmywanego wykazały, że rozmycie postępuje intensywniej na modelu większym. Wykładnik potęgi dla skali czasu zmieniał się od wartości $-0,5$ na początku do $-1,4$ na końcu doświadczenia.

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. Wskazują na to wyniki doświadczenia przeprowadzonego na modelu w skali $1 : 55$, gdzie za wybojem formowało się odsypisko wyerodowanego materiału, w związku z czym wybój rozwijał się wolniej i miał bardziej zwarty kształt niż na modelu większym – świadczą o tym zależności przedstawione na rysunkach 7, 8 i 9.

WYKAZ SYMBOLI

Symbol	Znaczenie	Jednostka
B	szerokość koryta	m
d_{50}	średnica miarodajna materiału rozmywalnego	mm
h_r	maksymalna głębokość rozmycia w fazie stabilizacji	m
$h_{r \max}$	maksymalna głębokość rozmycia ukształtowana w czasie t	m
h_0	początkowa głębokość strumienia w dolnym stanowisku	m
Q	natężenie przepływu	m^3/s
$Q = Q/B$	jednostkowe natężenie przepływu	m^2/s
T	czas kształtowania się rozmycia	h
t_1	czas, po którym zachodzi równość: $h_{r \max} = h_0$	h
x	odległość od końca umocnień	m
α	kąt nachylenia do poziomu linii łączącej koniec umocnień z największą głębokością rozmycia	°
φ	współczynnik morfologicznej skali czasu	–
λ_T	skala czasu	–
λ_t	skala geometryczna	–

PIŚMIENNICTWO

- Błażejowski R., Nowak J., 1986. Some scale effects in modelling two-dimensional local scour. Proc. of IAHR Symposium on Scale Effects in Modelling Sediment Transport Phenomena, Toronto, Canada.

- 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.
- Dargahi B., 2003. Scour development downstream of a spillway. J. of Hydr. Res., 41, 4: 417–426.
- Dąbkowski L., Skibiński J., Żbikowski A., 1982. Hydrauliczne podstawy projektów wodno-melioracyjnych. PWRiL, Warszawa.
- Dietz J.W., 1969. Kolkbildung in feiner oder leichten Sohlmaterialien bei strömen dem Abfluß. Mitteilungen des Theodor Rehbock Flußbaulaboratorium. Universität Fridericiana Karlsruhe, Karlsruhe, Germany.
- Farhoudi J., Smith K.V.H., 1982. Time scale for scour downstream of hydraulic jump. J. of Hydr. Div. ASCE, HY 10: 1147–1161.
- Hincu S., Lupu L., 1961. Sur la similitude des affouillements locaux dans la zone des constructions hydrotechniques. X Congress AIRH, Dubrovnik.
- 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, Brookfield.
- Levi I.I., 1967. Modelirovanie gidravliczeskich javlenii. Wydawnictwo „Energia”.
- Siwicki P., 2002. Analiza wpływu skali modelu i uziarnienia materiału dennego na kształtowanie się w warunkach laboratoryjnych rozmyć koryta poniżej jazu. Rozprawa doktorska (maszynopis). Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW, Warszawa.
- Urbański J., 2003. Mechanizm tworzenia się rozmyć za jazem w świetle eksperymentalnych badań modelowych. Rozprawa doktorska (maszynopis). Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW, Warszawa.
- van der Meulen T., Vinje J.J., 1975. Three-dimensional local scour in non-cohesive sediments. Proc. 16th IAHR-Congr., Sao Paulo, Brazil.
- Zanke U., 1978. Zusammenhänge zwischen Strömung und Sedimenttransport. Teil 2. Berechnung des Sedimenttransportes hinter befestigten Sohlenstrecken, Sonderfall zweidimensionaler Kolk, Mittlungen des Franzius-Instituts der TU Hannover, Helf 48, Germany.
- Żbikowski A., 1970. Badania laboratoryjne zależności głębokości rozmycia poniżej przelewu od długości umocnień i czasu trwania doświadczenia. Rozprawa doktorska (maszynopis). Politechnika Warszawska.

INFLUENCE OF SCALE MODELS OF THE DAM ON LOCAL SCOUR

Abstract. Paper presented analysis results of investigations of influence scale model on formation of scour in time. Investigations were conducted on two model this same taired constructions with the over of water above the closure, bottom of water basins and washing-out area. Models were made in two skales 1 : 30 and 1 : 55. In investigations were

used this same eroded material on two models – sand ($d_{50} = 1,1\text{mm}$, $\sigma = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} = 1,77$).

Estimated change of parameter for morfological time scale between two models of the dam. In Froudian models with a nonlinearly scaled size of sand grains the maximum depth of local scour develop slower than their linear counterparts in prototypes, except for the initial stage of scour.

Key words: local scour, time scale, modeling

Sz.L. Dąbkowski, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Inżynierii Wodnej, al. 1000-lecia Państwa Polskiego 1, 25-314 Kielce

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