

## ROZMYCIA NA MODELU JAZU PRZEPUSZCZAJĄCEGO WODĘ POD I NAD ZASUWĄ

Szczepan Ludwik Dąbkowski<sup>1)</sup>, Piotr Siwicki<sup>2)</sup>, Janusz Urbański<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Politechnika Świętokrzyska w Kielcach

<sup>2)</sup> Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Streszczenie.** W pracy omówiono wyniki doświadczeń przeprowadzonych na modelu jazu o określonej geometrii, mających na celu rozpoznanie i porównanie procesu kształtowania się rozmyć dna koryta poniżej budowli, gdy wodę przepuszcza się nad lub pod zasuwą. Doświadczenia wykonano dla czterech natężeń przepływu i jednego materiału rozmywalnego w dnie koryta za umocnieniami. W wyniku analiz stwierdzono, że dla badanego przypadku korzystniejszy dla bezpieczeństwa budowli jest sposób przepuszczania wody pod zasuwą. Wystąpiły wówczas mniejsze głębokości rozmycia. Odległość od końca umocnień do miejsca wystąpienia największej głębokości wyboju była większa dla przepływu wody nad zamknięciem.

**Słowa kluczowe:** budowla piętrząca, lokalne rozmycia, turbulencja strumienia

### WSTĘP

Na złożoność, a przez to trudności badań i analiz kształtowania się rozmyć miejscowych wpływają zjawiska zachodzące na wypadzie budowli piętrzącej oraz hydrologia, geologia i morfologia koryta rzeki. Hydraulika strumienia w dolnym stanowisku związana jest przede wszystkim z konstrukcją budowli. Kształtują ją też: sposób przepuszczania wody przez budowlę, umocnienie koryta, powstający na wypadzie odskok hydrauliczny o cechach zależnych od rodzaju i działania urządzenia do rozpraszania energii, głębokość wody w korycie rzeki za budowlą, rodzaj materiału tworzącego dno koryta oraz reżim hydrologiczny rzeki.

Podstawowym parametrem charakteryzującym lokalne rozmycie koryta za budowlą jest jego maksymalna głębokość i jej odległość od końca fundamentu budowli [Dietz 1969]. Umiejętność przewidywania tych charakterystyk rozmycia zapewniałaby większe

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: Szczepan Ludwik Dąbkowski, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Katedra Geotechniki i Inżynierii Wodnej, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, ldab@tu.kielce.pl  
Piotr Siwicki, Janusz Urbański, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska, Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: piotr\_siwicki@sggw.pl;  
janusz\_urbanski@sggw.pl

bezpieczeństwo i utrzymanie obiektu w należyтым stanie technicznym. Z tych powodów badania rozmiarów rozmyć koryt w dolnych stanowiskach różnych typów budowli piętrzących wodę mają już długą historię i są nadal prowadzone w wielu ośrodkach naukowych.

Obszernego przeglądu wzorów na głębokość lokalnego rozmycia dna za budowlami piętrzącymi dokonał Żbikowski [Dąbkowski i in. 1982], Schleiss i Whittaker [1984], Breusers i Raudkivi [1991]. Od lat stwierdza się, że mimo opracowania licznych wzorów projektanci mają trudności z wyborem do praktycznych zastosowań takich, które dają wiarygodne wyniki. Nadal zaleca się prognozowanie głębokości rozmycia na podstawie badań na modelach fizycznych. Niestety wyniki takich badań przeliczone na naturę często znacznie odbiegają od obserwowanych [Dąbkowski i in. 1992]. Różnorodność budowli sprawia, że wyniki badań modelowych można w zasadzie stosować tylko do obiektów o podobnej geometrii i sposobie przepuszczania wody.

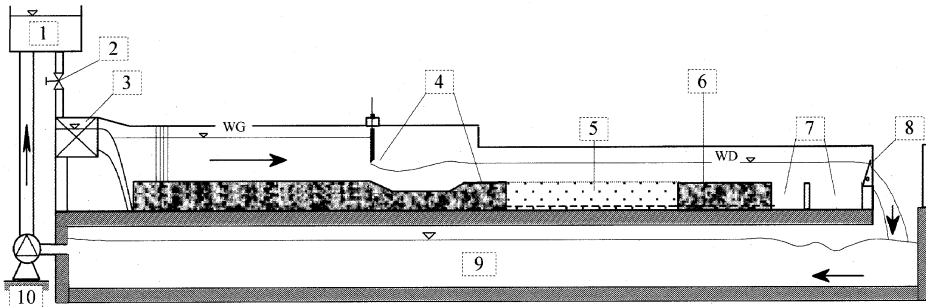
W ostatnich dziesięcioleciach podejmowano liczne próby opisu procesu formowania się rozmyć poniżej różnorodnych budowli wodnych. Można je podzielić na empiryczne, teoretyczne i pośrednie, czyli takie, w których wzory analityczne są uzupełniane o współczynniki empiryczne umożliwiające uwzględnienie czynników pomijanych w przyjmowanych schematach teoretycznych [Peiqing 2005]. Rozwój technik pomiarowych i badawczych umożliwia uwzględnianie coraz to nowych i coraz więcej czynników kształtujących proces erozji koryta, w tym coraz częściej charakterystyk struktury strumienia w odskoku hydraulicznym lub w samym wyboju [Long i in. 1991, Dargahi 2003], roli skali modelu w uzyskiwanych wynikach badań [Farhoudi i Smith 1982], turbulencji strumienia za odskokiem hydraulicznym i wpływu długości umocnień na głębokość rozmycia koryta [Rozanov i in. 1984, Long i in. 1990, 1991].

W pracy przedstawiono wyniki analiz porównawczych rozmyć dna na modelu jazu o określonej geometrii, w przypadkach gdy woda przepuszczana jest nad i pod zasuwą. Badania rozmyć za jazem z przepływem nad zasuwą, z krawędzią przelewową zaokrągloną promieniem  $R = 0,041$  m prowadził Siwicki [2002], a badania z przepływem pod zasuwą z ostrą krawędzią – Urbański [2003]. Uzyskane wyniki obrazują w pewnym stopniu rozwój i głębokości rozmyć za tym samym jazem zasuwowym z niecką wypadową, gdy zmieni się sposób przepuszczania wody. Oba przypadki badań dotyczyły modelu jazu w skali geometrycznej 1 : 30.

## METODYKA BADAŃ

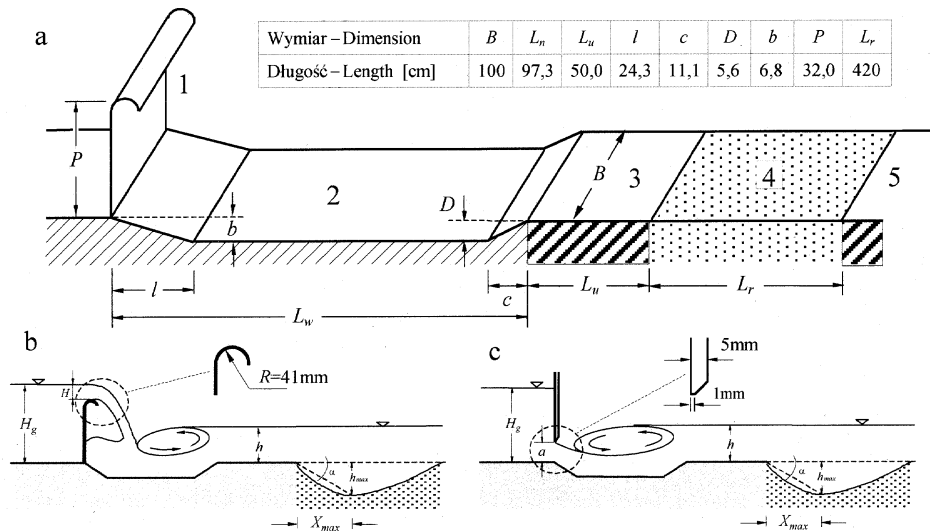
Doświadczenia na stanowisku badawczym przedstawionym schematycznie na rysunku 1 prowadzono w laboratorium hydraulicznym SGGW na modelu jazu, dla którego uprzednio badania rozmyć (w innej skali) prowadził Żbikowski [1970] w laboratorium hydraulicznym Politechniki Warszawskiej. Geometrię tego jazu, schematy hydrauliczne i parametry strumienia wody w obu analizowanych sposobach jej przepuszczania przedstawiają schematy na rysunku 2.

Rozmycie formowane było przez strumień wody czystej, tzn. bez przepływu materiału stałego z górnego do dolnego stanowiska budowli. Część rozmywalna dna koryta za umocnieniem miała długość 4,5 m i głębokość 0,8 m. Wypełniał ją piasek sortowany



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 – zbiornik górny, 2 – zawór regulacyjny, 3 – kołowy przewle pomiarowy, 4 – model zasuwki z niecką i umocnieniem, 5 – dno rozmywalne, 6 – dno nierozmywalne, 7 – osadniki, 8 – zastawki piętrzące, 9 – zbiornik dolny, 10 – pompa

Fig. 1. Schema of investigated station: 1 – upper reservoir, 2 – control valve, 3 – controlled spillway, 4 – model of gate with stilling pool and protection, 5 – eroded bed, 6 – noneroded bed, 7 – settler, 8 – storage locks, 9 – bottom reservoir, 10 – pump



Rys. 2. Schemat jazu poddanego badaniom: a – geometria jazu i jej parametry, b i c – schematy hydrauliczne odpowiednio dla przepływu nad i pod zasuwą; 1 – zasuwka piętrząca, 2 – niecka, 3 – umocnienia dna, 4 – dno rozmywalne, 5 – dno nierozmywalne

Fig. 2. Schema of investigated dam with to case of outflow: a – geometry of dam, b and c – hydraulic schema for outflow over and above gate; 1 – storage gate, 2 – stilling pool, 3 – bed protection, 4 – eroded bed, 5 – noneroded bed

o uziarnieniu i charakterystykach przedstawionych w tabeli 1. Głównymi elementami modelu jazu były: ściana piętrząca – płaskie zamknięcie zasuwowe, niecka wypadowa, odcinek dna umocnionego oraz odcinek dna rozmywalnego.

Tabela 1. Charakterystyki uziarnienia piasku użytego na modelu

Table 1. Characteristics diameters of sand used on the model

Średnice charakterystyczne Characteristic diameters	$d_5$	$d_{10}$	$d_{16}$	$d_{50}$	$d_{60}$	$d_{84}$	$d_{90}$	$d_{95}$
Wartości – Values [mm]	0,42	0,53	0,64	1,10	1,40	2,00	2,40	2,50
Bezwymiarowe charakterystyki uziarnienia – Dimensionless characteristics of granulation								
$u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$	$d_m = \frac{\sum d_i p_i}{100}$		$c = \frac{d_{90} d_{10}}{d_{10}^2}$	$\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}$	$\frac{d_{95}}{d_5}$			
2,64	0,90		1,05	1,77		5,95		

Doświadczenia przeprowadzono dla czterech natężeń przepływu, którym odpowiadały określone napełnienia koryta w stanowisku górnym ( $H_g$ ) i dolnym ( $h$ ) – tabela 2. W doświadczeniach przyjęto, że wielkością decydującą, względem której analizowano głębokości rozmycia, jest położenie zwierciadła wody dolnej ( $WD$ ). Wynika ono bowiem z krzywej natężenia przepływu dla koryta w dolnym stanowisku jazu. W obu przypadkach doświadczenia prowadzono więc dla tych samych natężeń przepływu całkowitego ( $Q$ ) i przepływów jednostkowych ( $q = Q/B$ ) oraz przyporządkowanych im głębokości wody w stanowisku dolnym ( $h$ ). Położenie zwierciadła wody górnej ( $WG$ ) nad przelewem kształtowało się swobodnie w zależności od zadanego natężenia przepływu wody. W przypadku strumienia przelewającego się nad zasuwą poziom  $WD$  nie wpływał na poziom  $WG$ , bo przelew był niezatopiony. W przypadku modelu z wypływem spod zasuw ten sam poziom  $WG$  jak na przelewie osiągnano, regulując wysokość podniesienia zasuw ( $a$ ).

W doświadczeniach Siwickiego [2002] (schemat na rys. 2b) poziom krawędzi przelewu, czyli górnej krawędzi zasuw był stały, a więc położenie zwierciadła  $WG$  ustalało się zgodnie ze zmianą grubości warstwy przelewowej ( $H$ ), zależnej od natężenia przepływu. Energia strumienia nad dnem niecki wypadowej wyrażała się, zgodnie ze schematem na rysunku 2b, równaniem:

$$E = P + b + H + \frac{\alpha_o v_o^2}{2g} \quad (1)$$

gdzie:  $v_o$  – średnia prędkość wody dopływającej do przelewu,

$H$  – wysokość warstwy strumienia wody nad krawędzią przelewu,

$\alpha_o$  – współczynnik Saint Venanta w przekroju na dopływie,

$P, b$  – zgodnie z oznaczeniami na rysunku 2a,

$g$  – przyspieszenie ziemskie.

Prędkość strumienia dopływającego obliczano z ilorazu natężenia i pola przekroju poprzecznego, a wartość współczynnika  $\alpha$  w obu przypadkach przyjmowano równą 1.

Tabela 2. Parametry strumieni i odskoków hydraulicznych w badaniach  
 Table 2. Hydraulic parameters of flow and hydraulic jump during of investigation  
 a) z przepływem wody nad zamknięciem  
 outflow over gate

$Q$	$q$	$H_g$	$h$	$H$	$E$	$h_1$	$h_2$	$\sigma_z$
$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	m	m	m	m	m	m	–
0,024	0,024	0,384	0,092	0,064	0,452	0,013	0,090	1,63
0,049	0,049	0,417	0,133	0,097	0,486	0,024	0,132	1,43
0,073	0,073	0,445	0,165	0,125	0,515	0,034	0,161	1,37
0,122	0,122	0,479	0,215	0,159	0,551	0,048	0,227	1,20

b) z wypływem spod zamknięcia  
 outflow above gate

$Q$	$q$	$H_g$	$h$	$a$	$E$	$h_1$	$h_2$	$\sigma_z$
$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	m	m	m	m	m	m	–
0,024	0,024	0,384	0,092	0,016	0,452	0,010	0,109	1,36
0,049	0,049	0,417	0,133	0,033	0,486	0,020	0,157	1,22
0,073	0,073	0,445	0,165	0,049	0,515	0,030	0,190	1,18
0,122	0,122	0,479	0,215	0,084	0,551	0,052	0,242	1,14

Dla schematu jazu z wypływem strumienia spod zasuw (Urbański 2003) mamy:

$$E = b + H_g + \frac{\alpha_o v_o^2}{2g} \quad (2)$$

gdzie  $H_g$  – głębokość wody w górnym stanowisku jazu (rys. 2c) zależna od wysokości podniesienia zasuw ( $a$ ), natężenia przepływu ( $Q$ ), współczynnika wydatku otworu ( $\mu$ ) oraz od stopnia zatopienia otworu wodą dolną.

Ze względu na różne w obu przypadkach straty energii strumienia wody na drodze przepływu od górnego do dolnego stanowiska jazu oczekiwać należy różnych wartości głębokości sprzężonych  $h_1$  i  $h_2$  oraz stopnia zatopienia odskoku, obliczanego tak jak najczęściej w praktyce [CBSiPWM, 1970], ze wzoru:

$$\sigma_z = \frac{h + D + \Delta z}{h_2} \quad (3)$$

gdzie  $\Delta z$  – spiętrzenie strumienia na wypływie z niecki, obliczane jako:  $\Delta z = \frac{v_h^2 - v_2^2}{2g}$ ,  
 gdzie  $v_h$  i  $v_2$  – prędkości w przekrojach strumienia o głębokościach odpowiednio  $h$  i  $h_2$ .

Dla przepływu pod zasuwą głębokości sprzężone obliczano w sposób omówiony szczegółowo w pracy Dąbkowskiego i Urbańskiego [2005]. Za pierwszą głębokość sprzężoną ( $h_1$ ) przyjęto najmniejszą głębokość strumienia za zasuwą, nazywaną przez

Čertousova [1962] głębokością zdławioną, i obliczaną jako  $h_1 = \varepsilon a$ , gdzie  $\varepsilon$  jest współczynnikiem dławienia. Jego wartość zawarta w przedziale (0,615–0,69) uzależniona jest przez Żukowskiego [Kiselev 1974] od stosunku  $a/H$ . Drugą głębokość sprzężoną ( $h_2$ ) obliczono z równania:

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left( \sqrt{1 + 8 \frac{q^2}{gh_1^3}} - 1 \right) \quad (4)$$

Dla przepływu nad zasuwą pierwszą głębokość sprzężoną ( $h_1$ ) obliczano z wysokości energii w przekroju jej wystąpienia, wyrażonej wzorem:

$$E_o = h_1 + \frac{\alpha m^2}{\varphi^2} \frac{H_o^3}{h_1^2} \quad (5)$$

gdzie:  $E_o$  – energia strumienia powyżej przelewu,  
 $m$  – współczynnik wydatku przelewu,  
 $\varphi$  – współczynnik prędkości.

Współczynnik  $m$  obliczono dla każdego doświadczenia z równania (6) [Obliczenia... 1986], natomiast wartość współczynnika  $\varphi$  przyjęto równą 1,0:

$$m = \frac{2}{3} \left[ 0,54525 + 0,20494 \left( \frac{H}{R} \right) - 0,062301 \left( \frac{H}{R} \right)^2 + 0,0059519 \left( \frac{H}{R} \right)^3 \right] \quad (6)$$

Eksperymenty na obu modelach przebiegały w następujących etapach:

I – przygotowanie modelu, polegające na zagęszczeniu piasku i wyrównaniu powierzchni oraz powolnym nawodnieniu i zalaniu modelu wodą,

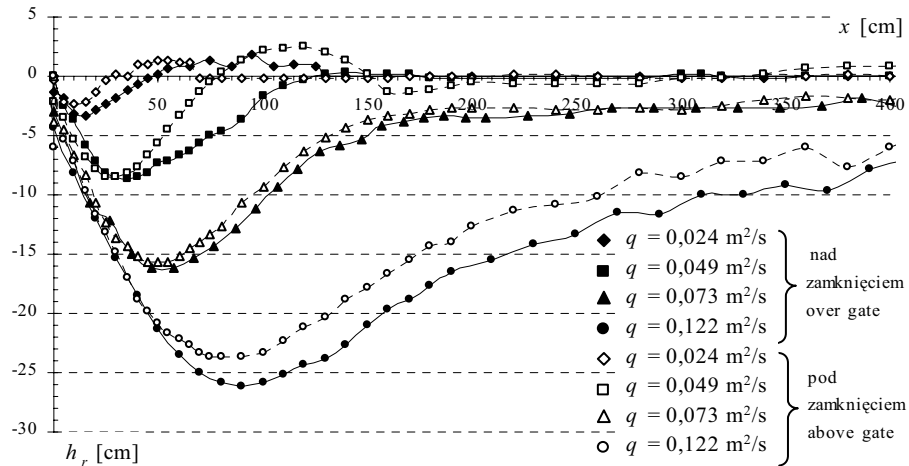
II – formowanie rozmycia przez strumień wody, trwające w obu przypadkach 480 minut,

III – pomiar geometrii uformowanego wyboju.

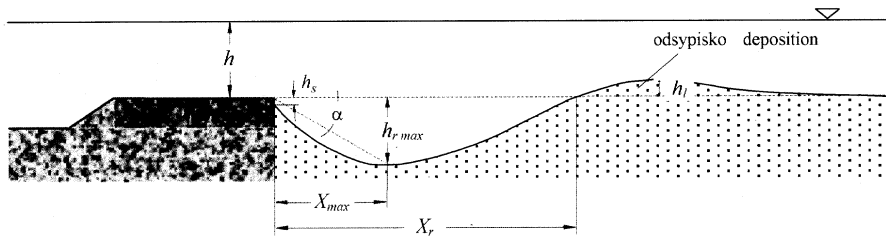
## WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Analizie poddano profile rozmyć pomierzone w osi koryta (rys. 3) oraz wartości podstawowych charakterystyk wyboju, oznaczonych na ogólnym schemacie profilu rozmycia dna (rys. 4) i zestawione w tabeli 3.

Profil wyboju jest charakteryzowany jego głębokością maksymalną ( $h_{max}$ ) i jej odległością od krawędzi płyty umocnienia ( $X_{max}$ ), odległością od krawędzi umocnienia do punktu przecięcia profilu wyboju z linią dna pierwotnego (zerowa głębokość rozmycia –  $X_r$ ), uskokiem dna wyboju w pionowej płaszczyźnie krawędzi umocnienia ( $h_s$ ), kątem  $\alpha$  nachylenia do poziomu prostej łączącej krawędź umocnienia z najniższym punktem dna wyboju. Wartości wymienionych wielkości ukształtowały się po czasie 480 min trwania przepływu, jednakowym dla wszystkich doświadczeń. Dla odsypiska za wybojem, któ-



Rys. 3. Profile podłużne rozmycia dla dwóch sposobów przepuszczania wody  
 Fig. 3. Compare of longitudinal sections of scour for two case of outflow



Rys. 4. Schemat i wielkości charakteryzujące profil dna w końcu doświadczenia  
 Fig. 4. Schema and values characterized bed profile at the end of investigation

re powstało w doświadczeniach z dwoma mniejszymi przepływami wody, a dla dwóch większych natężeń przepływu nie wystąpiło, przyjęto następujące charakterystyki: objaśniona już odległość ( $X_r$ ), największa wysokość odsypiska mierzona od poziomu dna pierwotnego ( $h_l$ ) i całkowita długość odsypiska ( $X$ ). Brak w tabeli 3 charakterystyk odsypiska oznacza, że nie wystąpiło ono w danym doświadczeniu.

Ogólna analiza uzyskanych wyników doświadczeń prowadzi do stwierdzenia, że:

1. We wszystkich doświadczeniach większe rozmycia powstały w przypadku przepuszczania wody nad zamknięciem. Były one zarówno głębsze, jak i bardziej rozległe.
2. Maksymalna głębokość wyboju była we wszystkich doświadczeniach większa dla przepływu nad zamknięciem, przy czym różnica zmniejszała się wraz ze wzrostem natężenia przepływu wody. Dla dwóch przepływów mniejszych wynosiła 30 i 29,6%, a dla dwóch większych – odpowiednio 4 i 3,4%.
3. Maksymalna wysokość odsypiska materiału wyerodowanego, tworzącego się za wybojem w doświadczeniach z mniejszymi przepływami, była mniejsza i było ono bardziej wydłużone.

Tabela 3. Parametry rozmyć w doświadczeniach na modelach  
Table 3. Scour parameters of investigations on models

$q$ $m^2 \cdot s^{-1}$	$h_{max}$ m	$X_{max}$ m	$tg \alpha$ -	$h_s$ m	$h_s/h_{max}$ -	$X_r$ m	$k_r$ -	$h_l$ m	$X_l$ m	$k_l$ -	$V_r$ $m^3$	$V_l$ $m^3$	$V_l/V_r$ -
Przepływ nad zamknięciem – Outflow over gate													
0,024	0,033	0,13	0,254	0,014	0,42	0,47	14,2	0,015	0,39	26	0,0161	0,0142	0,88
0,049	0,086	0,35	0,246	0,025	0,29	1,28	14,9	0,025	0,75	30	0,0950	0,0189	0,20
0,073	0,161	0,52	0,310	0,030	0,19						0,2810		
0,122	0,262	0,91	0,288	0,043	0,16						0,6411		
Średnie – Mean													
			<b>0,274</b>										
Wyływ spod zamknięcia – Outflow above gate													
0,024	0,024	0,10	0,240	0,006	0,25	0,30	12,5	0,019	0,83	44	0,0122	0,0117	0,96
0,049	0,085	0,27	0,315	0,021	0,25	0,77	9,1	0,004	0,45	113	0,0638	0,0192	0,30
0,073	0,156	0,50	0,312	0,038	0,24						0,2159		
0,122	0,237	0,88	0,269	0,060	0,25						0,5379		
Średnie – Mean													
			<b>0,284</b>										

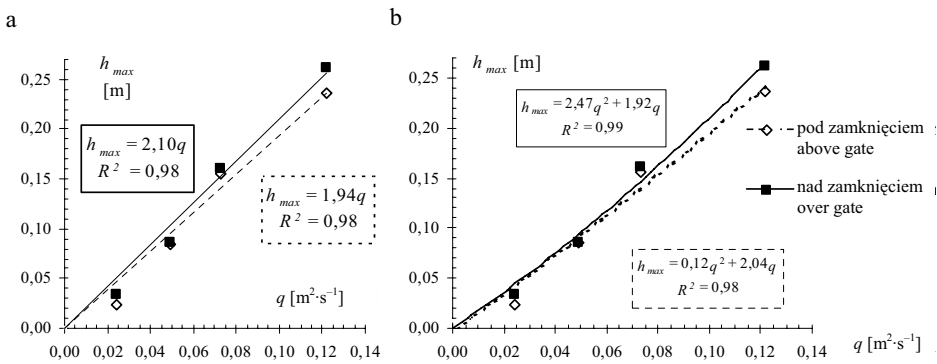
Objaśnienia symboli niewystępujących na rysunkach:  $k_r = X_r/h_{max}$ ,  $k_l = X_l/h_l$ ,  $V_r$  – objętość materiału wyerodowanego z wyboju,  $V_l$  – objętość odsypiska.  
Explanations of symbols not define on the sketch:  $k_r = X_r/h_{max}$ ,  $k_l = X_l/h_l$ ,  $V_r$  – volume of eroded material,  $V_l$  – volume of deposition.



4. Dla obu sposobów przepuszczania wody i dla wszystkich badanych przepływów powstałe rozmycia charakteryzowały się podobnym ukształtowaniem obniżającego się stoku wyboju od strony umocnień. Wznoszący się stok był łagodniej, korzystniej dla płyty nachylony w przypadku przepuszczania wody nad zamknięciem.

5. W doświadczeniach z wypływem wody spod zasuw wyboje ukształtowane przez mniejsze przepływy miały bardziej zwarty kształt, o czym świadczą wartości współczynnika  $k_r = X_r/h_{max}$ .

6. Dla obu sposobów przepuszczania wody maksymalna głębokość rozmycia ( $h_{max}$ ) rosła wraz ze wzrostem natężenia przepływu (rys. 5).



Rys. 5. Maksymalne głębokości rozmyc w funkcji  $q$ : a – wyrównane prostą, b – wyrównane parabolą drugiego stopnia

Fig. 5. Maximum depth of scour in investigations: a – linear regression, b – parabolic regression

Wyniki pomiarów największych głębokości wyboju w funkcji natężenia przepływu jednostkowego wody ( $q$ ) wyrównano:

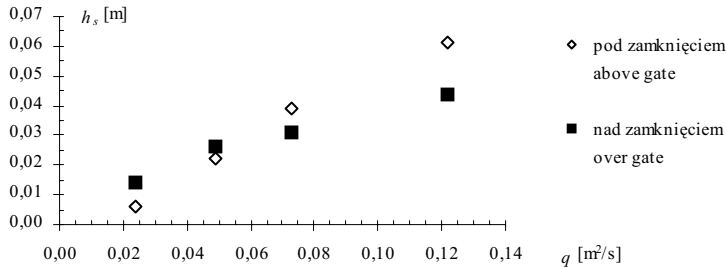
– liniami prostymi, uzyskując dla przedziału  $q$  w doświadczeniach równania podane na rysunku 5a o dużych wartościach współczynników korelacji ( $R^2 = 0,98$ ); układ prostych regresji wskazuje, że większe głębokości rozmyc kształtowały się w doświadczeniach z przepływem wody nad zamknięciem,

– krzywą paraboliczną drugiego stopnia, uzyskując równania podane na rysunku 5b o wartościach  $R^2 = 0,98-0,99$ .

Obliczono średnie wartości tangensa kąta  $\alpha$ , zawartego między linią początkowego, poziomego dna koryta a odcinkiem łączącym krawędź końca umocnień z miejscem występowania maksymalnej głębokości wyboju ( $h_{max}$  – rys. 4) i wartości zamieszczono w tabeli 3. W doświadczeniach z przepływem wody nad przelewem średnia wartość  $\tan \alpha$  była równa 0,274, a wartości skrajne wynosiły 0,246 i 0,310. Dla wypływu spod zasuw średnia wartość  $\tan \alpha$  wynosiła 0,284, a skrajnie 0,240 i 0,315. Wynika z tego, że większy kąt nachylenia skarpy dołu rozmycia od strony umocnień występuje w przypadku przepuszczania wody pod zamknięciem.

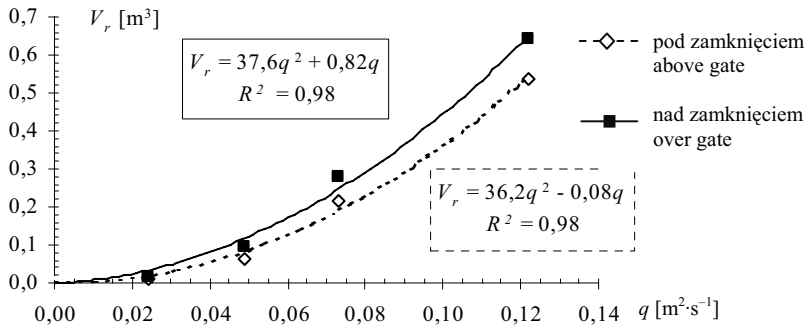
We wszystkich doświadczeniach w obu wariantach przepuszczania wody tworzyło się rozmycie krawędziowe ( $h_s$ ). Na rysunku 6 przedstawiono wielkości tego rozmycia, tzn. głębokości odsłonięcia umocnień w zależności od jednostkowego przepływu ( $q$ ). Wraz

ze wzrostem przepływu rozmycie krawędziowe intensywniej rozwijało się na modelu z wypływem spod zasuw, na co wskazuje wzajemne położenie punktów. Średnie wartości ilorazów  $h_s/h_{\max}$  wynoszą w przypadku przepuszczania wody nad zamknięciem 0,27, a dla wypływu spod zasuw 0,25 (tab. 3).



Rys. 6. Głębokość rozmycia przy krawędzi umocnień dla badanych przepływów  
Fig. 6. Depth of scour at the end of protection for investigated discharge

Porównano również objętości ( $V_r$ ) materiału wyerodowanego z wyboju w obu przypadkach (rys. 7). Zauważyć można, że nieznacznie większe kubatury dołów rozmycia po jednakowym czasie wystąpiły w doświadczeniach z przepływem wody nad zamknięciem.



Rys. 7. Objętości materiału wyerodowanego z wybojów w doświadczeniach  
Fig. 7. Capacity of eroded material from undermining in investigation

W doświadczeniach z przepływami  $q = 0,024 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  i  $q = 0,049 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  na obu modelach za wybojem kształtowały się odsypiska materiału wyerodowanego. Były one mniejsze, gdy woda przepływała nad zamknięciem. Oznacza to, że w tym przypadku na dnie wyboju występowały większe prędkości, o czym może świadczyć też głębsze rozmycie dna. Wiąże się to bez wątpienia z hydrauliką strumienia wody w niecce wypadowej i na płycie umocnienia, zależną od sposobu przepuszczania wody przez jaz.

Obliczono objętość rumowiska wyniesionego przez strumień poza dół rozmycia ( $V_l$ ) (tab. 3) oraz stosunek  $V_l/V_r$ , którego wartość dla przepływu  $q = 0,024 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  wynosi około 0,88–0,96, a dla  $q = 0,049 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  – 0,20–0,30. Zmniejszanie się objętości odsypi-

ska wraz ze wzrostem przepływu wynika z tego, że towarzyszący temu wzrost prędkości przyspiesza erozję odsypiska. Tym też można tłumaczyć istnienie odsypiska po tym samym czasie doświadczenia dla mniejszych przepływów i jego brak (bo już zostało rozmyte) dla przepływów większych. Oznacza to zarazem, że czas trwania doświadczeń był zbyt krótki, by zdążyły uformować się ostateczne rozmiary wybojów. Tym niemniej doświadczenia wykazały, że tempo procesu rozmycia w obu badanych przypadkach jest inne – szybsze, gdy woda przepływała nad zamknięciem.

## WNIOSKI

Wnioski z analizy wyników doświadczeń prowadzonych w czasie 480 min na modelu jazu o takiej samej geometrii, zbudowanym w korycie o takim samym materiale rozmywalnym dna, bez przepływu rumowiska rzecznego z górnego do dolnego stanowiska sformułowano w poniższych punktach:

1. Na obu modelach głębokość maksymalnego rozmycia rosła wraz ze wzrostem natężenia przepływu, przy czym większe głębokości i rozleglejsze rozmycia formowały się na modelu z przepływem wody nad zasuwą.

2. W doświadczeniach z mniejszymi natężeniami przepływu tworzyły się na modelu odsypiska materiału wyerodowanego. Zmieniały one pola prędkości i postęp erozji dna. Doświadczenia trwały zbyt krótko, aby można było prześledzić dalszy rozwój procesu rozmywania odsypiska, co niewątpliwie występuje po dłuższym czasie i wpływa na warunki hydrauliczne w dole rozmycia.

3. Głębokość odsłonięcia ( $h_s$ ) krańca umocnień w wyniku rozmycia dna koryta również wzrastała wraz ze wzrostem natężenia przepływu. Nie następowało to jednak równomiernie w czasie, lecz na początku skokowo. Przy większych przepływach odsłonięcia były większe.

4. Odległość największej głębokości rozmycia od krańca umocnień była większa (dla większych przepływów) w przypadku przepuszczania wody nad zamknięciem.

## PIŚMIENNICTWO

- Breusers H.N.C., Raudkivi A.J., 1991. Scouring: Design Manual 2, IAHR, Balkema.
- CBSiPWM, 1970. Wytyczne instruktażowe projektowania budowli wodno-melioracyjnych – jazy. Warszawa.
- Čertousov M.D., 1962. Gidravlika – specjalny kurs. Gosudarstvennoje Energetičeskoje Izdatelstwo, Moskwa, Leningrad.
- Dargahi B., 2003. Scour development down stream of a spillway. *J. of Hydr. Res.* 41, 4, 417–426.
- Dąbkowski Sz.L., Urbański J., 2005. Długość odskoku hydraulicznego na dwóch modelach jazu. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej im. H. Kołłątaja w Krakowie* 420, *Inżynieria Środowiska* 26, 529–539.
- Dąbkowski Sz.L., Skibiński J., Żbikowski A., 1982. Hydrauliczne podstawy projektów wodnomelioracyjnych. PWRiL, Warszawa.
- Dąbkowski Sz.L., Bajkowski S., Hajkiewicz J., 1992. Rozmycia dna koryta Narwi poniżej jazów. *Gospodarka Wodna* 8, 188–191.

- Dietz J.W., 1969. Kolkbildung in feinen oder leichten Sohlmaterialien bei strömen dem Abfluß. Mitteilungen des Theodor Rehbock Flußbaulaboratorium, Universität Fridericiana Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, Heft 155.
- Farhoudi J., Smith K.V.H., 1982. Time scale for scour downstream of hydraulic jump. Proceedings ASCE Journal of Hydraulic Engineering, HY, 10, 108, 1147–1162.
- Kiselev P.G., 1974. Spravočnik po gidravličeskim rasčeta. Energia, Moskva.
- Long D. i in., 1990. LDA study of flow structure in submerged hydraulic jump. J. of Hydr. Res., 28, 4, 437–460.
- Long D. i in., 1991. Structure of flow in hydraulic jumps. J. of Hydr. Res. 29, 2, 207–218.
- Obliczenia hydrauliczne przelewów wodno-melioracyjnych, 1986. PWRiL, Biblioteczki Wiadomości IMUZ, Warszawa.
- Peiqing L., 2005. A new method for calculating depth of scour pit caused by overflow water jets. J. of Hydr. Res. 43, 6, 696–702.
- Rozanov N.P. i in., 1984. Ustrojstva nižnego b'efa vodosbrosov. KOŁOS, Moskva.
- Schleiss A., Whittaker J.G., 1984. Scour related to energy dissipators for high head structures. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Zürich.
- 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.
- Żbikowski A., 1970. Badania laboratoryjne zależności głębokości rozmycia poniżej przelewu od długości umocnień i czasu trwania doświadczenia. Rozprawa doktorska, maszynopis. Politechnika Warszawska, Warszawa.

## LOCAL SCOUR ON DAM MODELS WITH OUTFLOW OVER AND ABOVE GATE

**Abstract.** The paper describes a results of investigation carried out on model of dam in order to recognize and compare process of scouring below of the tired construction with outflow over and above gate. Investigations were conducted for four intensity of flow and used one kind of sand in eroded area in downstream. In results of analyses show that depths of scour are smaller for outflow above gate. Distance of occurrence maximum depth of scour from end of protection was larger for outflow over gate.

**Key words:** storage structure, local scour, turbulence of stream

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 30.07.2007