

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 1 (47), 2010: 34–42
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 1 (47), 2010)
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 1 (47), 2010: 34–42
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 1 (47), 2010)

Janusz URBAŃSKI

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

Rozkłady prędkości przepływu na długości rozmycia w dolnym stanowisku na modelu jazu

Distributions of flow velocities on the length of local scour in downstream on weir model

Słowa kluczowe: budowla piętrząca, rozmycie miejscowe, pomiary prędkości

Key words: water structure, local scour, velocity measurements

Wprowadzenie

Bezpośrednią przyczyną tworzenia się rozmycia poniżej jazu jest oddziaływanie strumienia o podwyższonej turbulencji na dno koryta ukształtowanego w gruncie. Złożona kinematyczna struktura przepływu za wypadem zależy od konstrukcji budowli, a szczególnie urządzeń do rozpraszania energii, sposobu przepuszczania wody przez budowlę, stopnia zatopienia odskoku hydraulicznego, długości i szorstkości umocnień dna. Najczęściej w dolnym stanowisku powstaje zatopiony odskok hydrauliczny, charakteryzujący się występowaniem maksymalnych prędkości na głębokości większej od połowy napelnienia koryta.

Spowodowane jest to przemieszczaniem się w tej strefie przepływu strumienia tranzytowego. Występują wówczas zwiększone prędkości przydenne i pulsacyjne, które powodują, że przepływ taki posiada dużą zdolność rozmywającą, szczególnie w odniesieniu do drobnych cząstek gruntów niespoistych. Ziarna gruntowego materiału dennego są poruszane, odspajane i przemieszczane wraz z przepływem strumienia, w wyniku czego zaczyna kształtować się wybój.

Intensywność procesu rozmywania w czasie trwania przepływu wiązana jest przez badaczy z kinematyczną strukturą strumienia w obrębie tworzącego się wyboju. Podejmowano liczne badania, zmierzające do rozpoznania turbulentnych charakterystyk przepływu nad rozmywanym dnem. Pomiary pulsacji prędkości w dole rozmycia są wyjątkowo trudne. Wymagają użycia odpowiednich, precyzyjnych przyrządów, rejestrujących

chwilową zmienność składowych prędkości. W trakcie procesu rozmywania odbywa się, szczególnie w strefie przydennej, ruch mieszaniny wody i gruntu, co ogranicza zastosowanie niektórych precyzyjnych przyrządów pomiarowych, wrażliwych na uderzenia ziaren. Poza tym podczas prowadzenia doświadczenia zmienia się głębokość i kształt wyboju, a więc i podstawowe parametry przepływu w strefie rozmycia. W zmieniających się w czasie warunkach hydraulicznych niemożliwe jest utrzymanie stacjonarności i ergodyczności pola prędkości. Tylko doświadczenia z utrwaleniem powierzchni dna w wybranej fazie rozwoju wyboju pozwalają na rozpoznanie kinematycznej struktury strumienia kształtującego rozmycie. Są to jednak badania kłopotliwe i pracochłonne, toteż w literaturze brak jest bogatego materiału na ten temat.

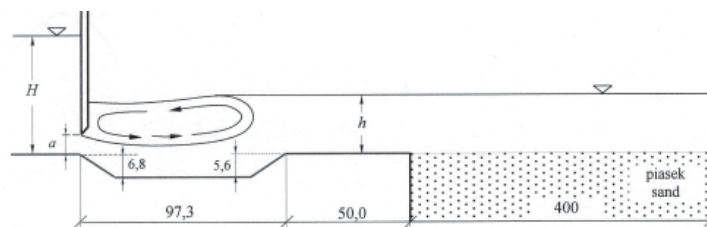
W pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych, których celem było rozpoznanie rozkładów prędkości przepływu nad rozmywanym w czasie dnem koryta na modelu typowego jazu piętrzącego – z płaskim zamknięciem, niecką wypadową i umocnieniem dna w dolnym stanowisku. Powierzchnię rozmytego w określonym czasie dna stabilizowano i wykonywano punktowe pomiary prędkości w pionach rozmiesz-

czonych w osiowej płaszczyźnie koryta na długości wyboju. Przeprowadzono analizę wyników pomiarów rozkładów prędkości przepływu strumienia, powodującego erozję dna poniżej jazu, pod kątem rozpoznania ich zmienności wraz z pogłębianiem się wyboju w czasie.

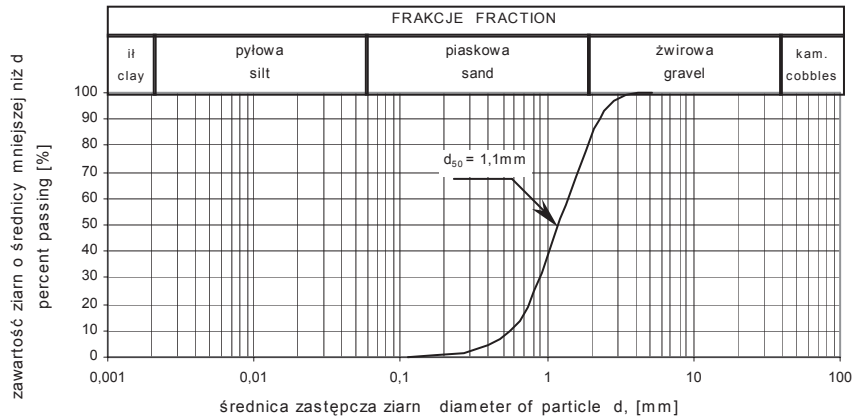
Stanowisko badawcze i metodyka pomiarów

Doświadczenia laboratoryjne przeprowadzono na modelu jazu, zbudowanym w korycie o przekroju prostokątnym, szerokości 1,0 m. Schemat badanej budowli przyjęto za Żbikowskim (1970) i wraz z podstawowymi wymiarami przedstawiono na rysunku 1.

Był to model jazu z płaskim zamknięciem zasuwowym, niecką wypadową i odcinkiem umocnionego dna za wypadem. Strumień wypływał spod zasuwki podnoszonej na wysokość a . W niecce powstawał zatopiony odskok hydrauliczny. Wybój tworzył się za umocnieniem, na rozmywalnym odcinku dna wypełnionym gruntem piaszczystym, którego krzywą uziarnienia przedstawiono na rysunku 2. Hydrauliczne warunki przepływu w doświadczeniach zamieszczono w tabeli 1.



RYSUNEK 1. Schemat modelu jazu z podstawowymi wymiarami
FIGURE 1. Schema of investigated model and base dimensions



RYSUNEK 2. Krzywa uziarnienia materiału rozmywalnego na modelu
 FIGURE 2. Granulations of sand used on the model

TABELA 1. Hydrauliczne warunki przepływu w doświadczeniach na modelu
 TABLE 1. Hydraulic parameters of flow during of experiments on the model

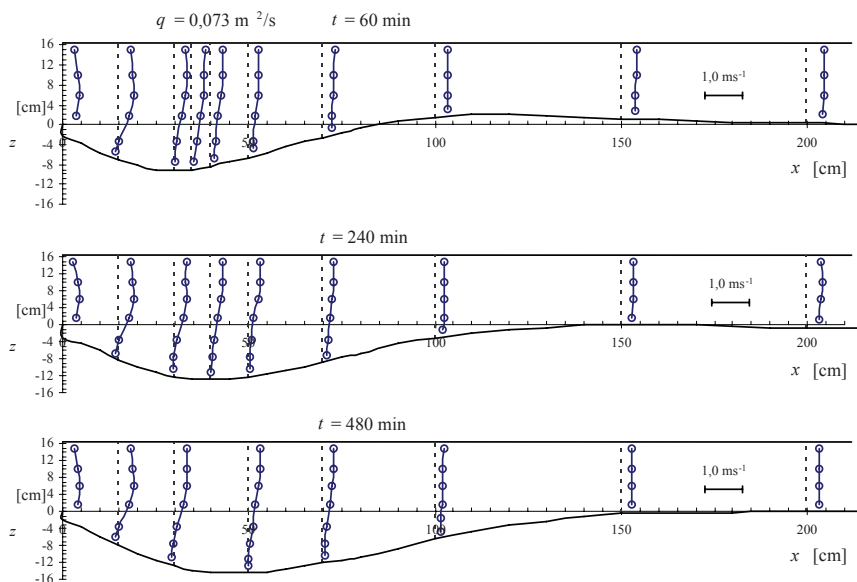
q	a	H	h
$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	m	m	m
0,073	0,049	0,445	0,165
0,097	0,065	0,462	0,193

Każdy z wykonanych eksperymentów przebiegał w dwóch etapach. W pierwszym etapie wybój był formowany przez strumień wody o ustalonych parametrach hydraulicznych. Czas formowania wyboju (t) wynosił 60, 120, 240, 360 i 480 minut, po czym proces rozmywania dna zatrzymywano i dokonano pomiaru geometrii ukształtowanego dołu rozmycia. Następnie uformowaną powierzchnię rozmytego dna stabilizowano poprzez kilkakrotne lakierowanie w celu uzyskania niezmiennych warunków przepływu w drugim etapie doświadczenia, który obejmował pomiary prędkości na długości rozmytego dna w pionach osiowej płaszczyzny modelu (Urbański 2003).

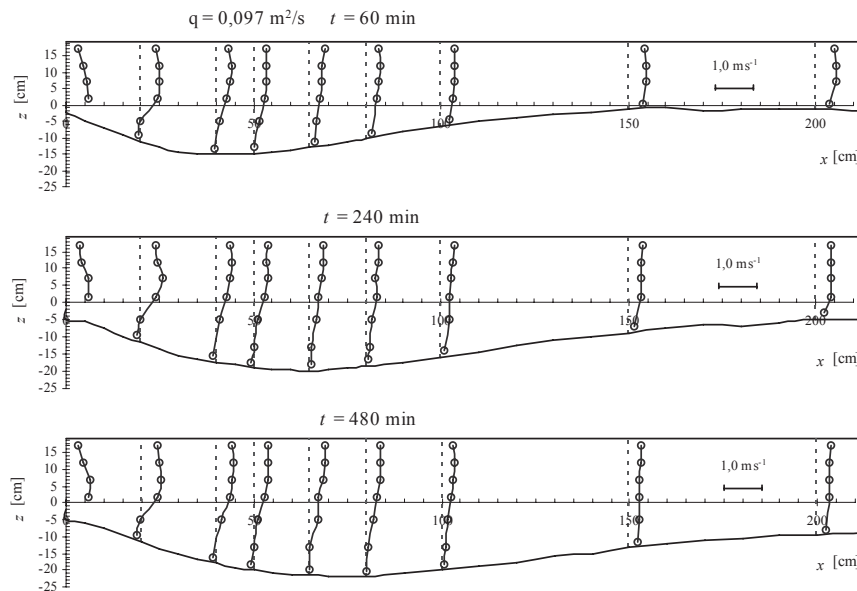
Wyniki doświadczeń

Rozkłady prędkości w pionach, pomierzone nad rozmytym w czasie 60, 240 i 480 minut dnem podczas doświadczeń z przepływem $q = 0,073 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, przedstawiono na rysunku 3, a w doświadczeniach z $q = 0,097 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ – na rysunku 4. Kształt uzyskanych rozkładów podobny jest do opisanych w literaturze (Popova 1970, Rozanov i in. 1984, Karim i Ali 2000). Nad opadającą skarpą wyboju prędkość przy dnie miała wartość ujemną. W miejscu występowania maksymalnej głębokości wyboju (h_{max}) i na dalszym odcinku strumienia kształt rozkładów zbliżony był do tachoidy typowej dla strumienia w naturalnym korycie rzeczonym. Kształty rozkładów zmieniały się wraz z pogłębianiem się wyboju.

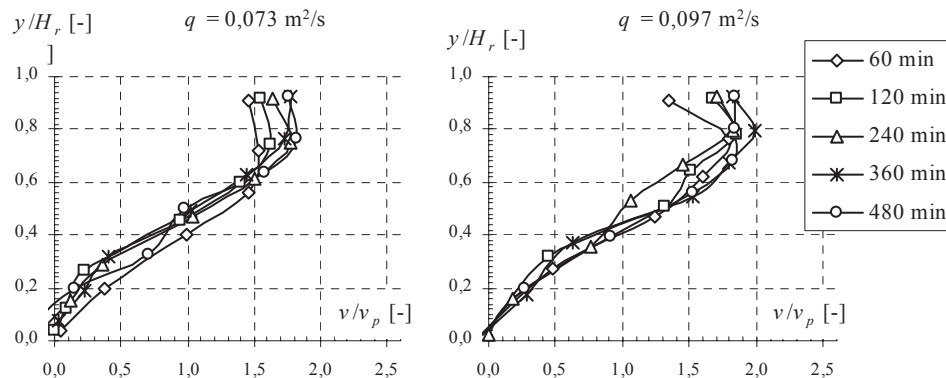
Analizie poddano kształt rozkładów prędkości w pionie nad miejscem występowania maksymalnej głębokości rozmycia (rys. 5). Zanurzenie punktów pomiarowych (v) odniesiono do maksymalnej głębokości strumienia (H_r), a uśrednione w punktach prędkości (v) do średniej w pionie (v_p).



RYSUNEK 3. Rozkłady prędkości w pogłębiającym się wyboju w doświadczeniach z przepływem $q = 0,073 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
 FIGURE 3. Velocity profiles in developing of local scour holes in experiments for unit discharge $q = 0,073 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$



RYSUNEK 4. Rozkłady prędkości w rozwijającym się wyboju w doświadczeniach z przepływem $q = 0,097 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
 FIGURE 4. Velocity profiles in developing of local scour holes in experiments for unit discharge $q = 0,097 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

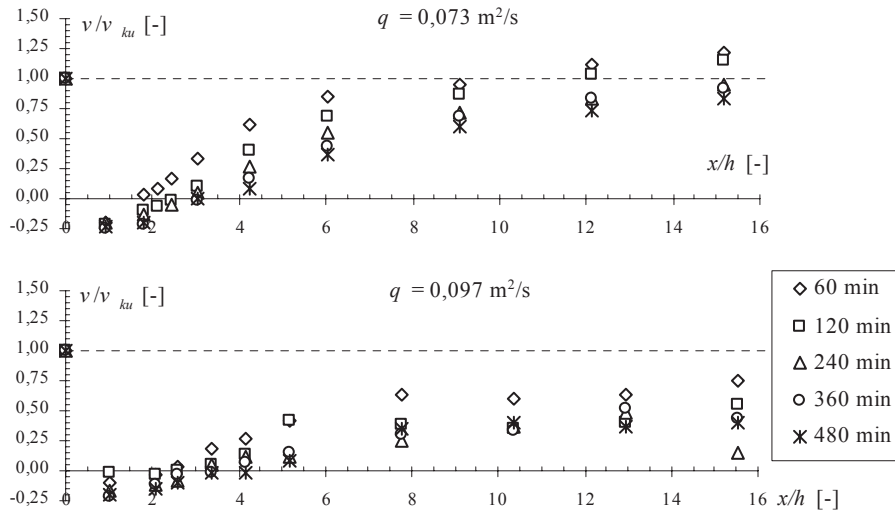


RYSUNEK 5. Rozkłady prędkości w pionie nad miejscem rozmycia o maksymalnej głębokości
 FIGURE 5. Measured velocity profiles in vertical location of maximum depth of local scour

Kształt rozkładów w niewielkim stopniu zmieniał się wraz z pogłębianiem się rozmycia. Wartość prędkości w pobliżu dna była bliska zeru, jednak w wyniku znacznych pulsacji prędkości i gwałtownych zmian kierunku przepływu leżące na dnie ziarna były podnoszone, nieustannie poruszane w różnych kierunkach i przez to podatne na wynoszenie nawet przy prędkościach średnich mniejszych od prędkości nierozmywającej (Urbański 2004). Maksymalna wartość prędkości w pionie wraz z pogłębianiem się wyboju nieznacznie przesuwała się w kierunku zwierciadła wody i występowała najczęściej w odległości około $(0,75-0,8)H_r$ od dna. Wartość maksymalna stanowiła około $1,5-1,6$ wartości prędkości średniej w pionie (v_p) w przypadku pomiaru w wyboju ukształtowanym w czasie 60–120 minut i $(1,8-2)v_p$ w wyboju po 480 minutach trwania przepływu.

Bezpośredni wpływ na kształtowanie się rozmyć mają wartości prędkości przy dnie oraz ich zmienność podczas przebiegu procesu. Na rysunku 6 przedstawiono wartości prędkości (v_d), pomierzone na długości rozmycia w punktach

położonych w odległości 1 cm nad dnem, po różnym czasie trwania przepływu. Obliczono bezwymiarowe ilorazy v_d/v_{ku} , odnosząc prędkości w poszczególnych punktach do wartości średniej prędkości (v_{ku}), pomierzonej w osiowym pionie przekroju na końcu umocnień. Prędkość (v_d) zmieniała się na długości rozmytego dna, a wartość jej zależała od głębokości i kształtu dołu rozmycia. Najmniejszą wartość (ujemną) osiągała prędkość przydenna w pionie położonym w odległości około $(0,7-1)h$ od końca umocnień, zlokalizowanym w każdym przypadku nad opadającą skarpą wyboju. W bezpośrednim sąsiedztwie miejsca występowania maksymalnej głębokości rozmycia prędkość przy dnie była w przybliżeniu zerowa, na dalszym odcinku strumienia wartość jej rosła i zależała od głębokości strumienia. W doświadczeniach z przepływem $q = 0,073 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ w początkowej fazie rozwoju rozmycia za wybojem formowało się odsypisko rumowiska, więc głębokości były tam mniejsze od początkowej (h), a prędkość przy dnie większa od wartości na końcu umocnień. Iloraz v_d/v_{ku} jest tym większy, im grubsza była warstwa odkładu rumowiska. Maksy-

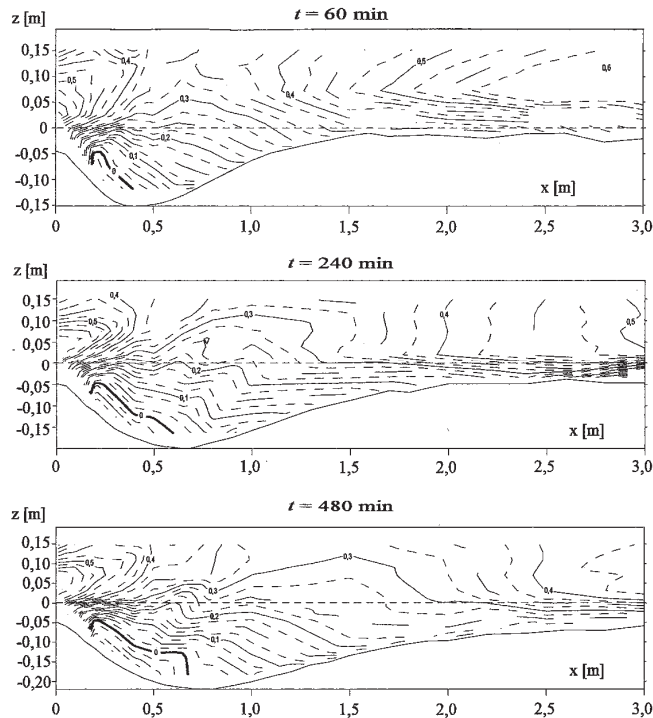


RYSUNEK 6. Wartości v_d/v_{ku} na długości rozmycia po różnym czasie trwania doświadczenia
 FIGURE 6. The values of v_d/v_{ku} on the length of the local scour for various times during the experiment

malna prędkość przydenna występowała w pobliżu wierzchołka odsypiska za dołem rozmycia. Odsypisko zatem do pewnego stopnia determinuje rozkłady prędkości w przekroju jego występowania i w bezpośrednim sąsiedztwie. Powoduje ono częściowe podpiętrzanie strumienia powyżej, tzn. nad wznoszącym się stokiem dołu rozmycia. W obszarze spiętrzenia strumienia występują zmniejszone prędkości. Skutkować to może opóźnieniem erozji wznoszącego się stoku wyboju.

W doświadczeniach z przepływem $q = 0,097 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ proces rozmycia przebiegał bardzo intensywnie już w trakcie pierwszej godziny trwania doświadczenia. Nie formowało się odsypisko rumowiska, głębokości w korycie na długości rozmywanego dna były większe od głębokości początkowej (h) i prędkość przy dnie już po pierwszej godzinie trwania przepływu była mniejsza od wartości na końcu umocnień (rys. 6).

Nad opadającą skarpą wyboju w pobliżu dna tworzył się obszar wstecznego przepływu, który powiększał się wraz z pogłębianiem się dołu rozmycia. Zasięg tego obszaru zaznaczono grubszą linią na rysunku 7, gdzie przedstawiono wybrane rozkłady uśrednionych prędkości w osiowej płaszczyźnie strumienia nad rozmytym dnem w postaci izolinii. Pod strumieniem tranzytowym rozwijał się walec wodny, charakterystyczny dla przepływu strumienia w wyboju. Wir o poziomej osi powstawał za końcem umocnienia i kończył się blisko przekroju występowania maksymalnego rozmycia. Rozmiary walca wodnego zwiększały się wraz z pogłębianiem się rozmycia i zależały od parametrów przepływu. Największe jego rozmiary uzyskano podczas doświadczeń z przepływem $q = 0,097 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Kształt walca zmieniał się wraz z rozwojem rozmycia – wir wydłużał się wraz z pogłębianiem się wyboju. Obrazuje to wykres zamieszczony na



RYSUNEK 7 Izolinie uśrednionych prędkości w osiowej płaszczyźnie obszaru rozmytego dna
 FIGURE 7. Velocity contours in centreline of local scour holes on time evolution

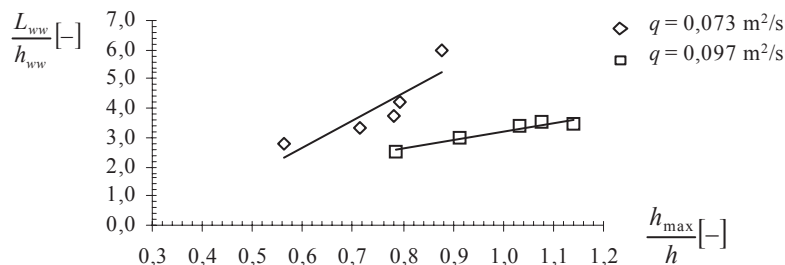
rysunku 8, przedstawiający zmienność stosunku długości walca (L_w) do jego wysokości (h_w) w pogłębiającym się dole rozmycia. Średnie wartości stosunku L_{ww}/h_{ww} zawarte są w przedziale od 2,5 do 6,0. Są to charakterystyczne wartości dla walca kształtującego się w wyboju w strumieniu o podwyższonej turbulencji. Podobne zależności zidentyfikowała Popova (1970), określając zmienność ilorazu L_{ww}/h_{ww} w granicach 3–6 dla wyboju kształtowanego przez strumień o podwyższonej turbulencji.

Wnioski

Analiza wyników pomiarów rozkładów prędkości przepływu strumienia

powodującego erozję dna na różnych etapach rozwoju lokalnego rozmycia na modelu jazu pozwoliła sformułować następujące wnioski:

1. Rozkłady prędkości na długości rozmytego dna mają zróżnicowany kształt, który związany jest z miejscem położenia pionu pomiarowego w obrębie wyboju. Największą zmiennością charakteryzują się rozkłady pomierzone nad obniżającym się stokiem rozmycia za umocnieniem. Rozwijający się w tym miejscu walec wodny o poziomej osi, w dużym stopniu determinuje rozkład prędkości w tworzącym się wyboju.
2. Kształt rozkładów pomierzonych w pionie zlokalizowanym nad miej-



RYSUNEK 8 Wydłużanie się walca wodnego w rozwijającym się wyboju
 FIGURE 8. Change the length of roller in the developing local scour holes

scem występowania maksymalnej głębokości wyboju nieznacznie zmieniał się wraz z pogłębianiem się wyboju. Wartość prędkości maksymalnej w pionie występowała w odległości około $(0,75-0,8)H_r$ od dna, a bezpośrednio przy dnie bliska była zeru. Pogłębianie się wyboju jest wynikiem występowania znacznych pulsacji prędkości i gwałtownych zmian kierunku przepływu.

- Odsypisko, tworzące się za wybojem, zmniejsza przekrój przepływu nad nim, co powoduje wzrost prędkości w przekroju jego występowania i podpiętrzanie strumienia powyżej, tzn. nad wznoszącym się stokiem dołu rozmycia. W obszarze spiętrzenia strumienia występują zmniejszone prędkości. Skutkować to może opóźnieniem erozji wznoszącego się stoku wyboju.

Literatura

- KARIM O.A., ALI K.H.M. 2000: Prediction of flow patterns in local scour holes caused by turbulent water jets. *Journal of Hydraulic Research* 38, 4: 279–289.
- POPOVA K.S. 1970: Issledowanie kinematicheskoj struktury potoka na risbermie i v jame razmy-

va za vodoslivnymi plotinami na niesviaznych gruntach. *Izv. VNIIG*, 94: 96–109.

ROZANOV N.P. i in. 1984: Ustrojstva nižnego b'efa vodosbrosov. KOŁOS, 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.

URBAŃSKI J. 2004: Ocena warunków rozwoju rozmyć poniżej jazu w świetle pomiarów i obliczeń prędkości dopuszczalnych. *Przeгляд Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 1 (28): 24–31.

ŻBIKOWSKI A. 1970: Badania laboratoryjne zależności głębokości rozmycia poniżej przelewu od długości umocnień i czasu trwania doświadczenia. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska, Warszawa.

Summary

Distributions of flow velocities on the length of local scour in downstream on weir model. The paper presents results of laboratory tests, purpose was to recognize distributions of flow velocity in the local scour. Investigations were conducted on model of weir with overflow under closure, bottom of water basins, horizontal bed protection in downstream and scouring area. As eroded material on model sorted sand was used with $d_{50} = 1.1 \text{ mm}$. Results analysis was conducted in order to establish changing of velocity profiles during increase of scour depth. Di-

stributions of velocity have different shape. Profiles of velocity depend on the location of measuring place in the local scour. Below the bed protection the roller with horizontal axis is formed. It has a decisive influence on the velocity distribution in the local scour.

Author's address:

Janusz Urbański
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
Poland
e-mail: janusz_urbanski@sggw.pl