

Janusz URBAŃSKI

Katedra Inżynierii Wodnej SGGW w Warszawie
Department of Hydraulic Engineering WULS – SGGW

Weryfikacja kryteriów doboru długości umocnień koryta w dolnym stanowisku jazu

Verification of criteria for determining the length of bed protection in downstream of the weir

Słowa kluczowe: jaz, stanowisko dolne, długość umocnień koryta

Key words: weir, downstream, length of bed protection

Wprowadzenie

Koryto w dolnym stanowisku jazu narażone jest na bardzo dużą zmienność przepływów – od skrajnie małych do przepływów miarodajnych bądź krytycznych. Następstwem tego jest rozmywanie dna i skarp przez wody płynące oraz rozmycie dna wodami infiltrującymi przez podłoże, co powodować może utratę stateczności skarp brzegowych, zmianę biegu rzeki, niszczenie siedlisk zwierząt, a nawet naruszenie stateczności konstrukcji. Tych szkodliwych zjawisk nie można całkowicie wyeliminować, ale w dużym stopniu ogranicza się ich wpływ poprzez stosowanie umocnień w dolnym stanowisku jazu (Żbikowski

i Żelazo 1993). Zgodnie z Rozporządzeniem... (2007): „...dolne stanowisko budowli piętrzącej oraz związane z nim tereny i urządzenia zabezpiecza się przed erozją, przewidując stabilizację dna kanału odpływowego lub rzeki przez budowę progu o stałym przelewie, budowę budowli piętrzącej położonej poniżej lub odpowiednie umocnienie koryta”.

Umocnienia w dolnym stanowisku jazu powinny być tak skonstruowane, aby zapewniały ochronę dna i skarp koryta przed rozmyciem przez wody płynące w tym korycie, a także przez wody filtrujące przez podłoże. Na etapie projektowania ważny jest dobór materiałów zapewniających odpowiednią szorstkość powierzchni umocnień oraz określenie całkowitej długości umocnionego odcinka koryta. Zbyt krótkie umocnienia nie spełniają w dostatecznym stopniu swej funkcji ochronnej, a nadmierne ich wydłużenie jest kosztowne i niepożąda-

ne w naturalnym środowisku (Urbański 2007b). Ustalenie ekonomicznego zasięgu umocnień dennych i brzegowych należy do najczęstszych zagadnień, jakie są badane podczas fizycznego modelowania przepływów przez budowle piętrzące (Polak i in. 2006).

W celu określenia optymalnych parametrów umocnień, gwarantujących w najwyższym możliwym stopniu zabezpieczenie budowli przed podmyciem, niezbędne są szczegółowe analizy wariantów rozwiązań oparte na wynikach badań modelowych, obliczeniach wybranymi wzorami empirycznymi i doświadczeniach długoletniej praktyki (Dąbkowski i in. 1982). Wszystkie trzy uzupełniające się elementy analizy są niezbędne, a wybrany na ich podstawie wariant rozwiązania podlega następnie weryfikacji techniczno-ekonomicznej, uwzględniającej między innymi prawdopodobieństwo i skutki uszkodzeń, koszty napraw i częstotliwość pomiarów kontrolnych. W praktyce inżynierskiej nie zawsze zachowana jest tak złożona procedura poszukiwania rozwiązania optymalnego, szczególnie przy projektowaniu umocnień poniżej budowli IV, najniższej klasy ważności. W tym celu wykorzystuje się praktyczne kryteria doboru długości umocnień, opisujące granice przedziałów bezpiecznych rozwiązań.

Według Kumina (za Żbikowskim 1962) jako długość umocnień (L_u) poniżej jazu powinna być przyjmowana wartość mniejsza z obliczonych wzorami (1) i (2):

$$L_u = 9(h_2 - h_1) \quad (1)$$

$$L_u = 6(h_2 - h_1) + 8h_{kr} \quad (2)$$

gdzie:

h_1 i h_2 – pierwsza i druga głębokość sprzężona,

h_{kr} – głębokość krytyczna.

Długość umocnień (L_u), według Dąbkowskiego i innych (1982), powinna spełniać następujące warunki:

$$15h_{kr} \leq L_u \leq 25h_{kr} \quad (3)$$

$$8h \leq L_u \leq 12h \quad (4)$$

$$L_w \leq L_u \leq 2L_w \quad (5)$$

gdzie:

L_w – długość wypadu,

h – głębokość wody w dolnym stanowisku.

W pracy podjęto próbę weryfikacji kryteriów doboru długości umocnień w dolnym stanowisku jazu. Wykorzystano wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzonych na modelu jazu piętrzącego, które polegały na pomiarach charakterystyk turbulencji w pionach zlokalizowanych na długości strumienia za niecką wypadową. Rozpoznanie zmienności badanych charakterystyk burzliwości przepływu za wypadem przyjęto jako podstawę weryfikacji i uściślenia kryteriów określania optymalnej długości (L_u) umocnień koryta.

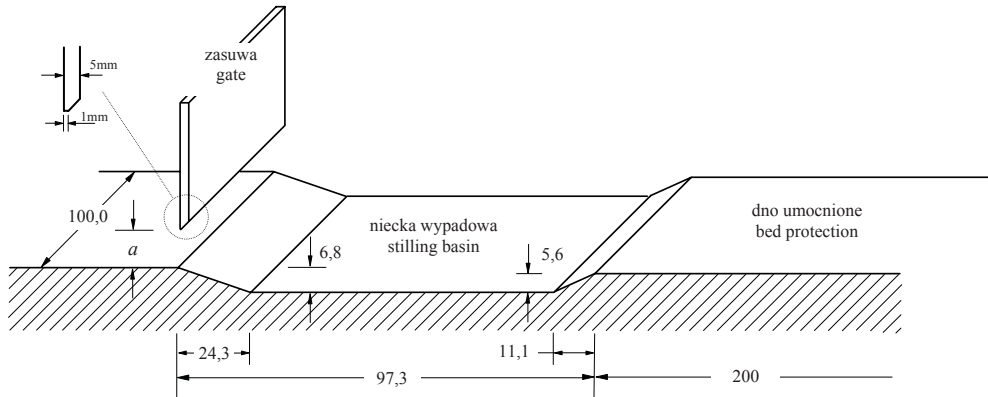
Stanowisko badawcze i metodyka pomiarów

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. Zasuwa piętrząca umożliwiały utrzymywanie określonego napętnienia (H) koryta w górnym stanowisku, a zastawki umieszczone na końcu koryta badawczego zapewniały stabilizację głębokości strumienia (h) w stanowisku dolnym. Strumień wody o jednostkowym natężeniu przepływu q wypływał spod zasuw podnoszonej na wysokość a . W niecce

powstawał zatopiony odskok hydrauliczny. Hydrauliczne warunki przepływu w doświadczeniach i parametry odskoku hydraulicznego zamieszczono w tabeli 1.

Pierwszą głębokość sprzężoną h_1 przyjmowano jako najmniejszą głębokość strumienia za zasuwą: $h_1 = \delta a$, gdzie δ jest współczynnikiem dławienia. Jego wartość zawarta w przedziale (0,615–0,69) uzależniona jest od stosunku a/H (Żukowski, za Kiselevem 1974). Drugą głębokość sprzężoną (h_2) obliczono z równania:



RYSUNEK 1. Schemat modelu jazu z podstawowymi wymiarami [cm]

FIGURE 1. Schema of investigated model and base dimensions [cm]

TABELA 1. Parametry hydrauliczne przepływu podczas doświadczeń

TABLE 1. Hydraulic parameters of flow during of experiments

Q $m^3 \cdot s^{-1}$	q $m^2 \cdot s^{-1}$	h m	H m	a m	δ –	h_1 m	h_2 m	σ_z –
0,049	0,049	0,133	0,345	0,037	0,616	0,023	0,136	1,40
			0,417	0,032	0,614	0,020	0,148	1,28
			0,491	0,029	0,612	0,018	0,157	1,21
0,073	0,073	0,165	0,310	0,067	0,621	0,042	0,142	1,53
			0,445	0,049	0,616	0,030	0,175	1,27
			0,528	0,043	0,614	0,026	0,190	1,18
0,097	0,097	0,193	0,378	0,080	0,621	0,050	0,173	1,42
			0,462	0,064	0,617	0,040	0,201	1,24
			0,485	0,060	0,616	0,037	0,210	1,20

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 \frac{q^2}{gh_1^3}} - 1 \right) \quad (6)$$

Jako współczynnik zatopienia odskoku hydraulicznego (σ_z), zgodnie z zaleceniami praktycznymi (Dąbkowski i in. 1982), przyjęto iloraz: $\sigma_z = \frac{h + d + \Delta z}{h_2}$,

w którym $d = 0,056$ m jest głębokością niecki, a wartość Δz , nazywaną spiętrzeniem strumienia na wypływie z niecki,

oblicza się jako: $\sigma_z = \frac{h + d + \Delta z}{h_2}$, gdzie:

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

Podczas doświadczeń wykonywano pomiary prędkości w pionach położonych w osiowej płaszczyźnie koryta w różnej odległości x od końca niecki wypadowej. W każdym pionie wykonano pomiar w pięciu punktach rozmieszczonych następująco: p_1 – w odległości 1 cm nad dnem, p_2 – na wysokości $0,2h$ nad dnem, p_3 – $0,5 h$, p_4 – $0,7h$, a p_5 na głębokości 2 cm pod zwierciadłem wody. Do pomiarów prędkości wykorzystano elektrosondę PEMS, rejestrującą z dokładnością $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ i częstotliwością 0,1 s wartości chwilowe składowych poziomych wektora prędkości v_x i v_y (podłużną i poprzeczną). Czas pomiaru prędkości w każdym punkcie wynosił 120 s. Rejestrowano zatem ciągi v_x i v_y o liczebności 1200 elementów dla każdego kierunku. Dla ciągów pomiarowych wartości v_x obliczono średnią wartość podłużnej składowej prędkości

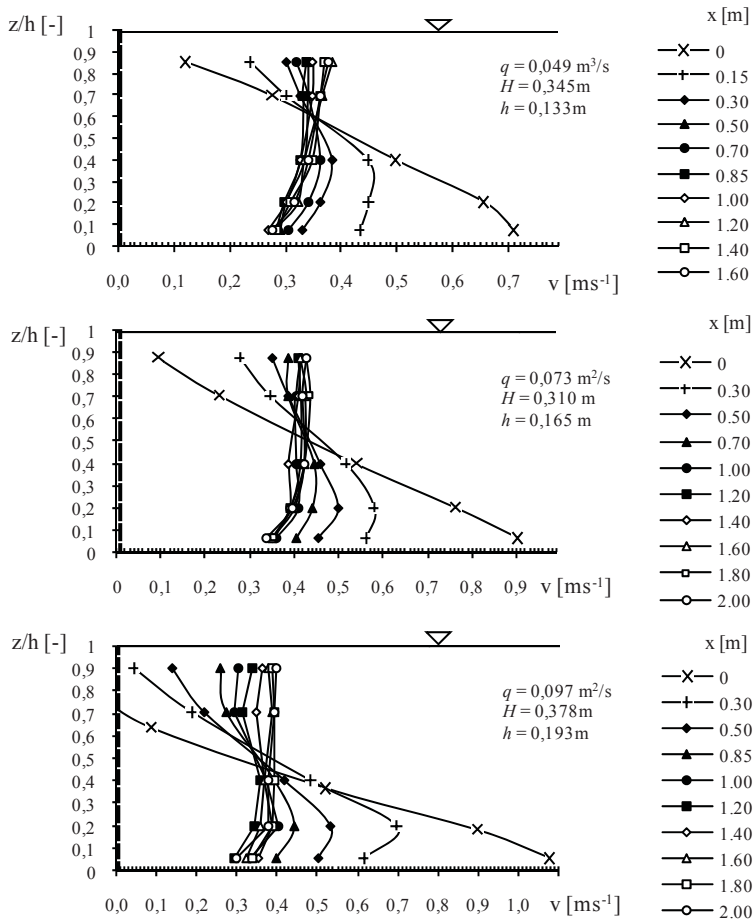
v jako: $v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i$, gdzie v_i jest prędkością chwilową, uzyskiwaną z pomiaru,

a następnie względną intensywność turbulencji $\varepsilon = \frac{\sigma}{v}$, gdzie σ jest odchyleniem standardowym od średniej wartości prędkości v w punkcie.

Wyniki doświadczeń

Na rysunku 2 przedstawiono rozkłady prędkości w pionach pomierzone na modelu dla wybranych przepływów. Kształt rozkładów zmieniał się wraz z odległością x pionu od końca niecki wypadowej. W pionach pomiarowych położonych bezpośrednio za niecką ($x = 0$) prędkość maksymalna występowała w punktach położonych w odległości 1 cm nad dnem. Jest to związane z przemieszczaniem się strumienia tranzytowego przy dnie za odskokiem hydraulicznym. Strumień ten stopniowo rozszerzał się na całą głębokość i wpływ jego zanikał, na co wskazują kształty kolejnych tachoid. Wraz ze wzrostem odległości od końca odskoku maksymalna prędkość w pionach przesuwiała się w kierunku zwierciadła wody, co typowe jest dla przejściowego odcinka przepływu za odskokiem hydraulicznym (Wu i Rajaratnam 1996, Urbański 2007a).

Analiza zmienności kształtu rozkładów prędkości wraz ze wzrostem odległości od końca niecki wypadowej pozwoliła w przybliżeniu określić położenie pionu, w którym kształt tachoidy wskazywał na wyrównanie wartości prędkości na głębokości strumienia. Na dalszym odcinku strumienia kształt kolejnych tachoid zmieniał się już nieznamacnie. Odległość od końca niecki wypadowej do miejsca występowania tego charakterystycznego pionu przyjęto jako



RYSUNEK 2. Rozkłady prędkości w pionach za nieką wypadową
 FIGURE 2. Velocity profiles in verticals below the water basin

minimalną długość odcinka umocnień (L_1) w dolnym stanowisku. W tabeli 2 dokonano zestawienia wyznaczonej w ten sposób minimalnej długości umocnień na podstawie wyników wszystkich przeprowadzonych doświadczeń.

Dokonano także analizy zmienności wartości podstawowych charakterystyk turbulencji na długości strumienia za nieką wypadową. Wyniki przedstawiono na rysunkach 3, 4 i 5. Analizie poddano wartości prędkości średniej

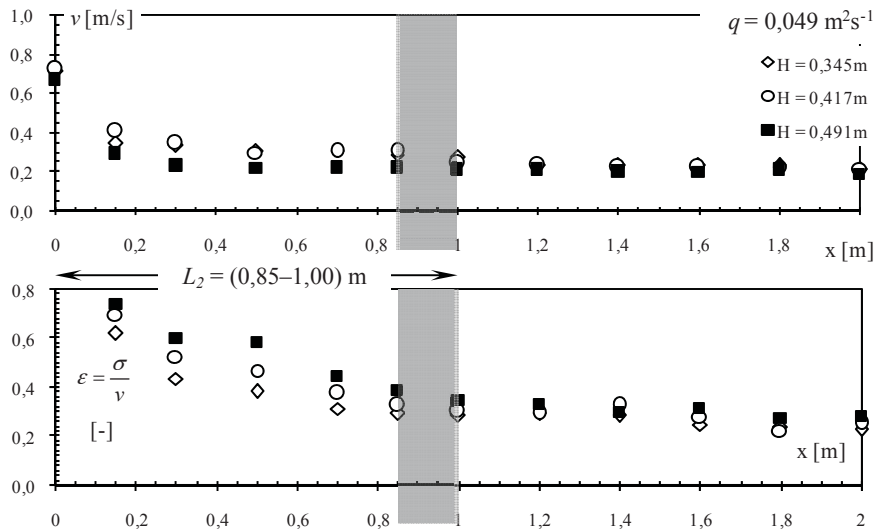
w punkcie (v) i względnej intensywności turbulencji (ϵ), obliczone na podstawie wyników pomiarów prędkości chwilowej w punktach położonych w odległości 1 cm nad dnem koryta.

Procesy rozpraszania energii, zachodzące na wypadzie, powodują wzrost prędkości pulsacyjnej i innych charakterystyk burzliwości strumienia, w tym względnej intensywności turbulencji (ϵ) – Dąbkowski i inni (1982). Uzyskane na modelu wyniki to potwierdziły, gdyż

TABELA 2. Długość umocnień pomierzona na modelu (L_1 i L_2) i obliczona na podstawie kryteriów zalecanych do stosowania w praktyce (L_u)

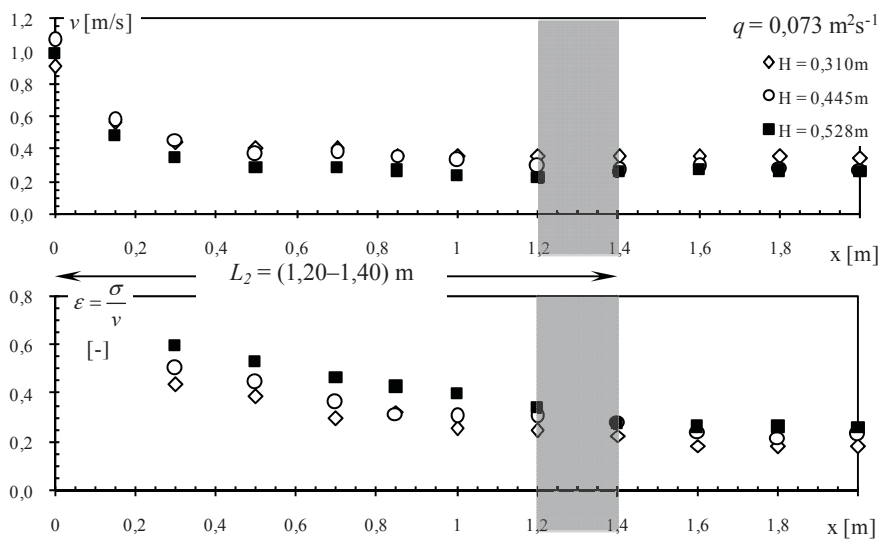
TABLE 2. Measured length of the bed protection on the model (L_1 and L_2) and calculated on the basis of criteria recommended for use in practice (L_u)

q	h	h_{kr}	h_1	h_2	Pomierzone długości umocnień The measured length of bed protection		Długość umocnień (L_u) obliczona na podstawie kryterium nr: The length of bed protection (L_u) calculated on the basis of criterion number:				
					L_1	L_2	1	2	3	4	
$m^2 \cdot s^{-1}$	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
0,049	0,133	0,063	0,023	0,136	1,00	0,85–1,00	1,27	1,35	0,94–1,56	1,06–1,60	
		0,063	0,020	0,148	1,00		1,35	1,40			
		0,063	0,018	0,157	0,85		1,43	1,45			
0,073	0,165	0,082	0,042	0,142	1,20	1,20–1,40	1,41	1,59	1,22–2,04	1,32–1,98	
		0,082	0,030	0,175	1,20		1,62	1,73			
		0,082	0,026	0,190	1,40		1,72	1,80			
0,097	0,193	0,099	0,050	0,173	1,40	1,40–1,60	1,69	1,91	1,48–2,47	1,54–2,32	
		0,099	0,040	0,201	1,60		1,83	2,01			
		0,099	0,037	0,210	1,60		1,86	2,03			

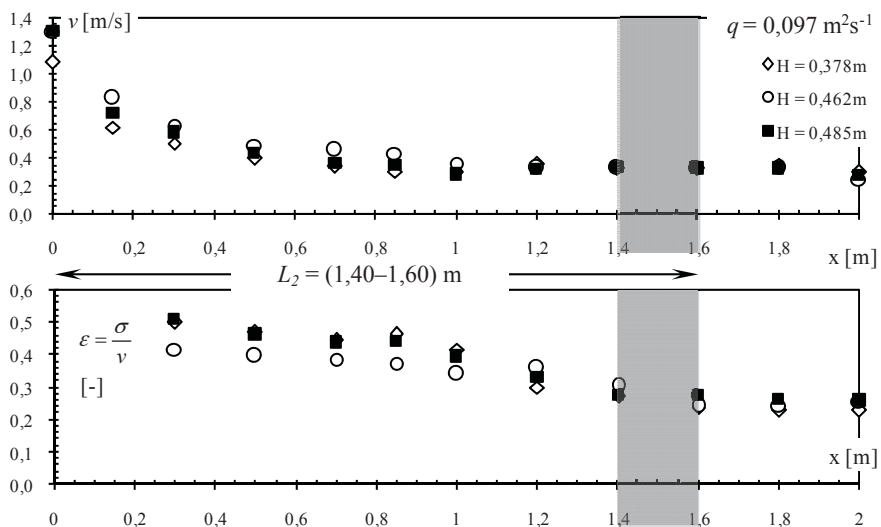


RYSUNEK 3. Wartości charakterystyk turbulencji strumienia za niekąką wypadową w doświadczeniach z przepływem $q = 0,049 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

FIGURE 3. Values of flow turbulence characteristics below the water basin in experiments for unit discharge $q = 0,049 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$



RYSUNEK 4. Wartości charakterystyk turbulencji strumienia za nieką wypadową w doświadczeniach z przepływem $q = 0,073 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
 FIGURE 4. Values of flow turbulence characteristics below the water basin in experiments for unit discharge $q = 0,073 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$



RYSUNEK 5. Wartości charakterystyk turbulencji strumienia za nieką wypadową w doświadczeniach z przepływem $q = 0,097 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
 FIGURE 5. Values of flow turbulence characteristics below the water basin in experiments for unit discharge $q = 0,097 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

największe wartości analizowanych charakterystyk turbulencji występowały bezpośrednio za niecką wypadową, a następnie malały wraz z odległością od jej końca, szczególnie na stosunkowo krótkim odcinku strumienia bezpośrednio za wypadem. Jest to typowe zjawisko dla strumienia za odskokiem hydraulicznym (Dąbkowski i in. 1982, Urbański 2006).

Na wykresach zaznaczono odległość L_2 od końca niecki wypadowej (dla $x = 0$) do punktu, w którym wartości analizowanych charakterystyk turbulencji wyraźnie stabilizowały się i na dalszym odcinku strumienia zmieniały się już tylko nieznacznie. Tak wyznaczoną odległość traktowano jako minimalną długość umocnień w dolnym stanowisku – niezbędną, aby na tym odcinku koryta poniżej wypadu mogła nastąpić największa redukcja prędkości w pobliżu dna i stopnia burzliwości strumienia. Pomierzone na modelu minimalne długości umocnień L_1 i L_2 zestawiono w tabeli 2 i porównano z obliczonymi L_u za pomocą kryteriów zalecanych do stosowania w praktyce, wykorzystując hydrauliczne parametry przepływów na modelu (h_{kr} , h_1 , h_2). W analizie nie uwzględniono kryterium nr 5, gdyż wiąże ono długość umocnień z długością wypadu, a nie z hydraulicznymi parametrami przepływu.

Minimalna długość umocnień (L_1 i L_2), wyznaczona zgodnie z przyjętą w pracy metodyką na podstawie analizy wyników pomiarów charakterystyk turbulencji strumienia za niecką wypadową, była w większości przypadków mniejsza od obliczonej na podstawie kryteriów zalecanych do stosowania w praktyce, szczególnie nr 1 i 2. Zatem może być rozpatrywana tylko jako minimalna, zapewniająca ochronę dna koryta

na długości tzw. odcinka przejściowego strumienia za odskokiem hydraulicznym, charakteryzującego się wzmożoną burzliwością. Rozpatrując kryteria nr 3 i 4, zauważyć można, że obliczona zgodnie z nimi graniczna minimalna długość umocnień jest zbliżona do wyznaczonej na podstawie wyników badań modelowych. Kryteria te pozwalają jednak wydłużyć umocnienia w dość szerokim zakresie, co zapewnia stabilność koryta na dłuższym odcinku w dolnym stanowisku i wpływa na poprawę bezpieczeństwa budowli.

Podsumowanie

Pomimo iż Rozporządzenie... (2007) w przypadku budowli hydrotechnicznych klasy III i IV nie narzuca konieczności weryfikacji rozwiązań projektowych badaniami modelowymi, można wskazać, że przeprowadzenie badań na modelu powinno być w każdym przypadku uzupełniającym elementem procesu projektowego, a określenie optymalnej długości umocnień w dolnym stanowisku należy traktować jako jedno z podstawowych zagadnień w zakresie badań.

Literatura

- DĄBKOWSKI Sz.L., SKIBIŃSKI J., ŻBIKOWSKI A. 1982: Hydrauliczne podstawy projektów wodnomelioracyjnych. PWRiL, Warszawa.
- KISELEV P.G. 1974: Spravočnik po gidravličeskim raščetam. Energia, Moskwa.
- POLAK K., ROSICKI A., SZAMOWSKI A. 2006: Zastosowanie badań modelowych do projektowania obiektów hydrotechnicznych. *Gospodarka Wodna* 8: 306–309.

- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie. Dz.U. z 2007 r. nr 86, poz. 579.
- URBAŃSKI J. 2006: Intensywność turbulencji strumienia za odskokiem hydraulicznym na dwóch modelach jazu. W: Problemy hydrotechniki. Modelowanie i hydroinformatyka oraz wybrane zagadnienia ochrony przeciwpodziowej. Red. S. Kostecki. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław: 363–370.
- URBAŃSKI J. 2007a: Długość odcinka strumienia o podwyższonej turbulencji za odskokiem hydraulicznym. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 519, *Inżynieria i Kształtowanie Środowiska Obszarów Niezurbanizowanych – Woda w Inżynierii Krajobrazu*: 329–338.
- URBAŃSKI J. 2007b: Rozmycia dna na modelu jazu ze zmienną długością umocnień w dolnym stanowisku. *Acta Scientiarum Polonorum, Architectura* 6 (2): 27–36.
- WU S., RAJARATNAM N. 1996: Transition from hydraulic jump to open channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering* 122, 9: 526–528.
- ŻBIKOWSKI A. 1962: Małe budowle wodne. Cz. I. Jazy i zapory. PWN, Warszawa.
- ŻBIKOWSKI A. 1970: Badania laboratoryjne zależności głębokości rozmycia poniżej przelewu od długości umocnień i czasu trwania doświadczenia. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska, Warszawa.
- ŻBIKOWSKI A., ŻELAZO J. 1993: Ochrona środowiska w budownictwie wodnym. Materiały informacyjne. MOŚZNiL, Warszawa.

Summary

Verification of criteria for determining the length of bed protection in downstream of the weir. The paper presents results of laboratory tests, purpose was to verification of criteria for determining the length of bed protection in downstream of the weir. Investigations were conducted on model of weir with overflow under closure, water basins to disipate of energy and horizontal the bed protection in downstream. During the experiments measured velocity in verticals below the water basin located in the axial plane of the channel. An analysis of the results in terms of determining the minimum length of the bed protection in downstream. Measured length of the bed protection were compared with calculated on the basis criteria recommended for practical application. The measured length of bed protection was smaller than the calculated. The criteria used in practice allow longer the bed protection. This provides stability for the longer bed of channel in the downstream and influence to building safety.

Author's address:

Janusz Urbański
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Inżynierii Wodnej
ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa
Poland
e-mail: janusz_urbanski@sggw.pl