

BADANIA DŁUGOŚCI ODSKOKU HYDRAULICZNEGO NA MODELU JAZU

Janusz Urbański¹, Marta Jaworska

¹Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań długości zatopionego odskoku hydraulicznego. Doświadczenia przeprowadzono na modelu budowli piętrzącej z wypływem wody spod zasuwy i niecką wypadową. Geometria modelu i warunki hydrauliczne w doświadczeniach były typowe dla małych jazów występujących w terenie. Pomierzone długości odskoku porównano z obliczonymi wzorami innych autorów oraz równaniami zalecanymi do stosowania w praktyce projektowej. Opracowano równania wiążące bezwymiarową długość odskoku $\lambda_0 = \frac{L_0}{h_1}$ z hydraulicznymi parametrami strumienia: q , v_1 ,

Fr_1 . Wyniki doświadczeń wykazały, że wzrost stopnia zatopienia odskoku hydraulicznego wpływa na ograniczenie jego długości.

Słowa kluczowe: modelowanie fizyczne, jaz, długość odskoku hydraulicznego

WSTĘP

Odskok hydrauliczny, towarzyszący przejściu strumienia z ruchu podkrytycznego w nadkrytyczny, jest tematem wielu prac badawczych wykonywanych głównie ze względu na duże praktyczne znaczenie wiedzy o tym zjawisku w hydrotechnice. Na wypadzie budowli wodnych odskok wykorzystuje się do rozpraszania energii. Zmniejsza on prędkość przepływu w dolnym stanowisku i ogranicza erozję dna i skarp naturalnego koryta rzeki poniżej budowli. Jednym ze sposobów utrzymywania odskoku w obrębie wypadu budowli jest zatopienie go w niecce wypadowej. Warunkiem poprawnego zaprojektowania niecki jest znajomość podstawowych parametrów odskoku, tzn. głębokości sprzężonych (h_1 i h_2) oraz jego długości (L_0).

Długość odskoku (L_0) mierzona jest od przekroju występowania pierwszej głębokości sprzężonej (h_1) do przekroju końcowego, którego położenie trudno jest jednoznacznie

Adres do korespondencji – Corresponding author: Janusz Urbański, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska, Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska, ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa,
e-mail: janusz_urbanski@sggw.pl

określić. Wpływa na to między innymi wysoki stopień turbulencji w odskoku i bezpośrednio za nim, nieustannie zmieniający cechy przepływu strumienia. Jedną z propozycji definiowania końca odskoku jest przekrój, w którym obserwuje się stagnację mas wody na powierzchni swobodnej strumienia [Hager i in. 1990]. Odcinek strumienia od przekroju występowania głębokości (h_1) do przekroju stagnacji wody na swobodnej powierzchni strumienia nazywany jest długością walca wodnego (L_0). Długość ta jest najważniejszą wielkością charakteryzującą odskok, gdyż jest stosunkowo łatwa do określenia. Różne formuły opisujące długość walca (L_0), powstającego na płaskim, poziomym dnie, zamieszczono w tabeli 1. Uzależniają one ją od głębokości sprzężonych h_1 i h_2 i liczbą Froude'a (Fr_1) w przekroju występowania pierwszej głębokości sprzężonej. W tabeli 1 przytoczono także równania zalecane do stosowania w praktyce projektowej [Dąbkowski i in. 1982].

Tabela 1. Równania opisujące długość odskoku (L_0) na poziomym dnie [Čertousov 1962, Dąbkowski i in. 1982, Hager i in. 1990]

Table 1. Equations describing length of hydraulic jump (L_0) on the horizontal bottom [Čertousov 1962, Dąbkowski at al. 1982, Hager at al. 1990]

Autor – Author	Równanie Equation	Numer równania Number of equation
Wóycicki	$L_0 = \left(8 - 0,05 \frac{h_2}{h_1}\right)(h_2 - h_1)$	(1)
Čertousov	$L_0 = 10,3h_1 (Fr_1 - 1)^{0,81}$	(2)
Pavlovski	$L_0 = 2,5(1,9h_2 - h_1)$	(3)
Smetana	$L_0 \approx 6(h_2 - h_1)$	(4)
Bakhmeteff, Matzke	$L_0 = 5(h_2 - h_1)$	(5)
Page	$L_0 = 5,6h_2$	(6)
Wu	$L_0 = 10(h_2 - h_1) Fr_1^{-0,16}$	(7)
Formuły zalecane w praktyce	$L_0 = 3h_2$	(8)
Equations recommended in practice	$L_0 = (4 - 4,5)(h_2 - h_1)$	(9)
	$L_0 = 5h_2$	(10)

Długość walca wodnego często bywa podawana jako wielkość bezwymiarowa, której skalą mogą być poszczególne głębokości sprzężone (h_1 , h_2) lub ich kombinacje, na przykład ($h_2 - h_1$). Najprostszą i często przedstawianą miarą długości walca wodnego jest

$\lambda_0 = \frac{L_0}{h_1}$ [Busch 1981, Hager i in. 1990]. W tabeli 2 przedstawiono warunki prowadzenia

doświadczeń przez różnych autorów w korytach o przekroju prostokątnym szerokości B oraz propozycje równań wiążących bezwymiarową długość walca λ_0 z liczbą Froude'a (Fr_1).

Przytoczone wzory odnoszą się do przypadku odskoku, tworzącego się w korycie o przekroju prostokątnym i dnie poziomym. W mniejszym stopniu rozpoznany jest odskok o właściwościach kształtowanych w sposób sztuczny za pomocą zagłębienia w dnie wypadu, zwanego niecką, lub podpiętrzenia wody, za odskokiem za pomocą progu. Čer-

Tabela 2. Warunki prowadzenia badań nad długością walca wodnego i propozycje równań różnych autorów [Hager i in. 1990]

Table 2. Conditions of laboratory experiment over length of water roller and proposition of equations according to various authors [Hager et al. 1990]

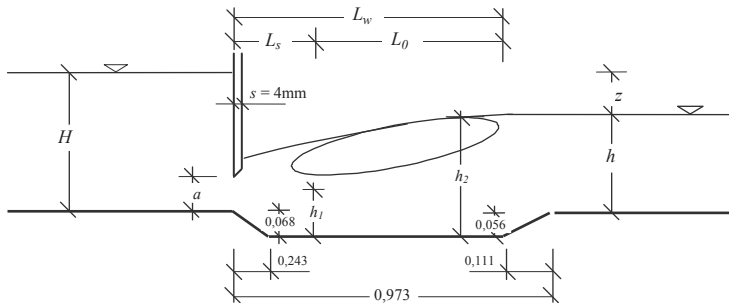
Autor Author	B [cm]	h_1 [cm]	Fr_1 [-]	$Re_1 \cdot 10^{-5}$ [-]	Równanie Equation	Numer równania Number of equation
Safranez [1929]	49,9	0,71–5,7	1,72–19,1	0,58–2,54	$\lambda_0 = 6 Fr_1$	(11)
Pietrkowski [1932]	10,0	0,5–1,46	5,5–19,8	0,83–1,72	$\lambda_0 = 5,9 Fr_1$	(12)
Sarma [1973]	30,5	2,1–6,7	1,21–3,79	1,11–1,97	$\lambda_0 = 6,73 (Fr_1 - 1)$	(13)

tousou [1962] nazywa go odskokiem zatopionym, cechującym się tym, że jest on przysunięty do ściany przelewu lub otworu wypływowego, a spadający strumień jest zatopiony. Taka sytuacja niewątpliwie wpływa na strukturę przepływu w odskoku i bezpośrednio za nim, a zatem także na jego długość. Wpływ ten jest jednak słabo rozpoznany.

W pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzonych na modelu jazu z wypływem strumienia spod zasuw, niekłą do rozpraszania energii i płaskim, poziomym umocnieniem dna w dolnym stanowisku. Podczas doświadczeń wykonywano punktowe pomiary prędkości w pionach rozmieszczonych w osiowej płaszczyźnie modelu na długości niekły. Uzyskane rozkłady prędkości umożliwiły lokalizację przekroju stagnacji wody na powierzchni zwierciadła, utożsamianego z końcowym przekrojem odskoku hydraulicznego. Odległość od zasuw piętrzącej do tego przekroju (L_w) była podstawą określenia długości odskoku (L_0) na modelu.

METODYKA I ZAKRES BADAŃ

Badania przeprowadzono na modelu jazu (rys. 1) wykonanym w korycie prostokątnym szerokości $B = 1,0$ m. Strumień wody wypływał spod zasuw piętrzącej, podnoszonej na określonej wysokości (a) podczas każdego doświadczenia. Zatopiony odskok hydrauliczny utrzymywany był w niecce wypadowej. Podstawowe wymiary modelu przedstawiono na rysunku 1, a parametry hydrauliczne strumienia w doświadczeniach w tabeli 3.



Rys. 1. Schemat i podstawowe wymiary modelu jazu [m]

Fig. 1. Schema and base dimensions of model of the dam [m]

Tabela 3. Hydrauliczne parametry przepływu na modelu i pomierzone długości odskoku
 Table 3. Hydraulic parameters of flow on model and measured length of hydraulic jump

q	a	H	h	z	h_1	h_2	Fr_1	L_w	L_s	L_0	σ_z
$m^2 \cdot s^{-1}$	m	m	m	m	m	m	–	m	m	m	–
0,049	0,027	0,417	0,133	0,296	0,016	0,166	7,6	0,93	0,07	0,86	1,14
		0,425	0,148	0,289	0,016	0,167	7,7	0,91	0,07	0,84	1,22
		0,451	0,166	0,297	0,016	0,170	8,0	0,89	0,07	0,82	1,31
0,073	0,038	0,445	0,165	0,292	0,024	0,203	6,5	1,00	0,10	0,90	1,09
		0,473	0,192	0,293	0,023	0,207	6,7	0,99	0,10	0,89	1,20
		0,499	0,212	0,299	0,022	0,210	7,0	0,99	0,10	0,89	1,28
0,097	0,052	0,462	0,193	0,281	0,031	0,234	5,7	1,07	0,13	0,93	1,06
		0,489	0,22	0,281	0,030	0,238	5,9	1,05	0,13	0,92	1,16
		0,513	0,24	0,285	0,029	0,241	6,1	1,04	0,13	0,90	1,23

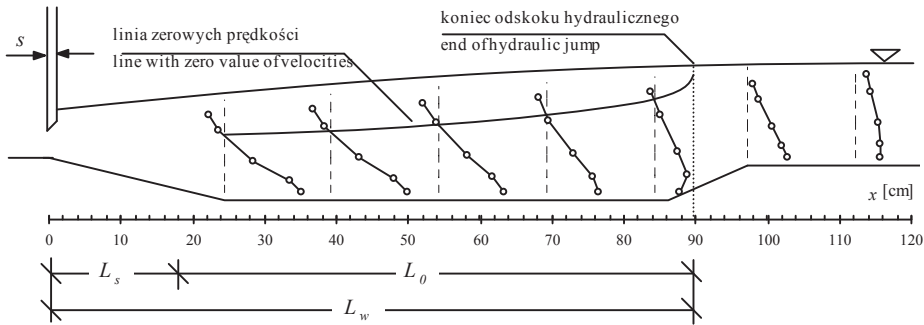
Pierwszą głębokość sprzężoną (h_1) obliczono, wykorzystując równanie Bernoulliego (14), opisujące wzniesienie linii energii (E_0) w górnym stanowisku nad dnem wypadu:

$$E_0 = h_1 + \frac{\alpha q^2}{2g\varphi^2 h_1^2}$$

Wartości współczynników Coriolisa (α) i prędkości (φ) przyjęto równe jedności. Drugą głębokość sprzężoną (h_2) obliczono z równania:

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

Za koniec odskoku przyjęto miejsce stagnacji strug wody, czyli punkt na powierzchni zwierciadła wody, w którym podłużna prędkość była zerowa. Lokalizację końcowego przekroju odskoku hydraulicznego dokonywano na podstawie analizy wyników pomiarów prędkości strumienia na wypadzie [Urbański 2008, Jaworska 2010]. Piony pomiarowe rozmieszczone były w osiowej płaszczyźnie koryta na długości niecki wypadowej i płaskiego, poziomego dna za wypadem w dolnym stanowisku (rys. 2). W każdym pionie pomiary wykonano w pięciu punktach rozmieszczonych następująco: p_1 w odległości 1 cm nad dnem, p_2 na wysokości $0,2 h_w$ nad dnem, $p_3 - 0,5 h_w$, $p_4 - 0,7 h_w$, a p_5 na głębokości 2 cm pod zwierciadłem wody. Głębokość strumienia (h_w) na wypadzie była zmienna i w związku z tym mierzona była w każdym pionie za pomocą wodowskazu szpilkowego. Do pomiarów prędkości wykorzystano elektrosondę PEMS, rejestrującą z częstotliwością 0,1 s chwilowe wartości poziomych składowych wektora prędkości. Czas pomiaru prędkości w każdym punkcie wynosił 120 s i był wystarczający dla zapewnienia stacjonarności i ergodyczności pola prędkości [Urbański 2003]. Rejestrowane były zatem ciągi wartości chwilowych o liczebności 1200 elementów. Na ich podstawie obliczono w każdym punkcie średnią wartość prędkości (v_{sr}), a następnie sporządzono rozkłady v_{sr} w pionach. Umożliwiły one wyznaczenie przebiegu tzw. linii zerowej prędkości [Bogomolov i Michajłow 1965] w obszarze od-



Rys. 2. Sposób lokalizacji końca odsoku hydraulicznego na podstawie przebiegu linii zerowej prędkości

Fig. 2. Localization method the end of hydraulic jump according to line with zero value of velocities

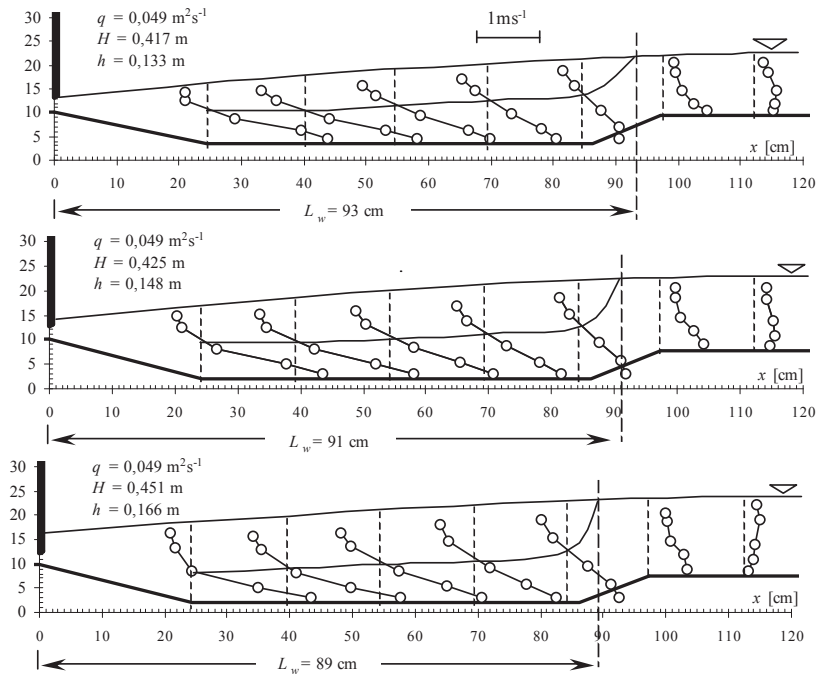
skoku hydraulicznego i jej ekstrapolację w kierunku zwierciadła wody (rys. 2). Linia ta w miejscu styku ze zwierciadłem wody wskazywała położenie końcowego przekroju odsoku hydraulicznego.

Jako długość odsoku hydraulicznego (L_0) przyjęto różnicę odległości mierzonej w osi koryta od zasuwy piętrzącej do punktu stagnacji strug (L_w) i odległości spadania strumienia L'_s pomniejszonej o grubość zasuwy $s = 4$ mm, tzn. $L_0 = L_w - L'_s$, gdzie $L'_s = L_s - s$ (rys. 2). Wartość $L_s = 2,5a$ obliczono według zaleceń z Wytycznych instruktażowych... [1970] dla wypływu spod zasuwy bez progu. Przyjęta wartość L'_s jest średnią z przedziału zalecanego przez Čertousova [1962] dla schematu wypływu spod zasuwy nad dnem płaskim. Jako współczynnik zatopienia odsoku hydraulicznego (σ_z), zgodnie z zaleceniami praktycznymi [Dąbkowski i in. 1982], przyjęto stosunek: $\sigma_z = \frac{h + d + \Delta z}{h_2}$.

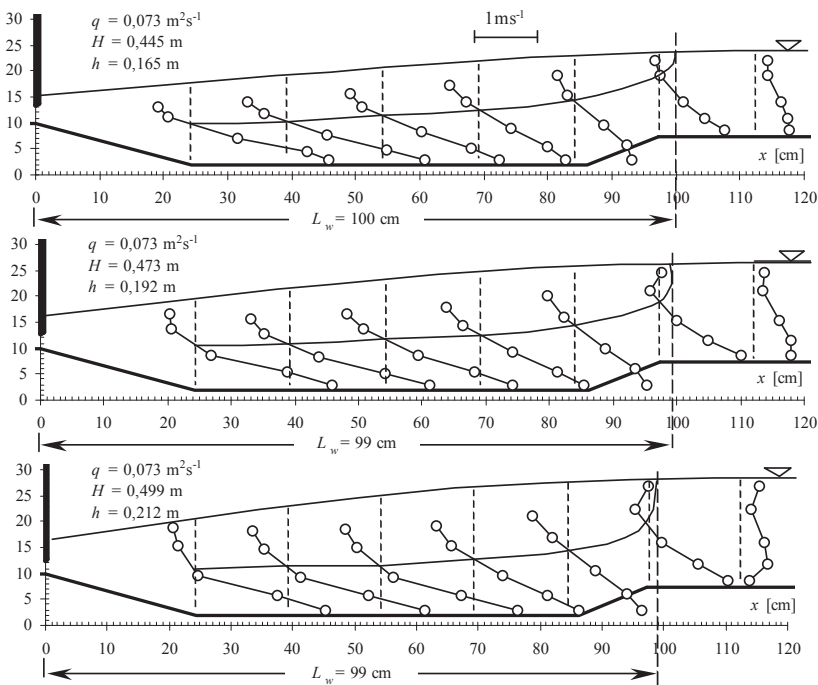
Wartość Δz , nazywaną spiętrzeniem strumienia na wypływie z niecki, oblicza się jako $\Delta z = \frac{v_h^2 - v_2^2}{2g}$, gdzie: v_h i v_2 są prędkościami w przekrojach strumienia o głębokościach odpowiednio h i h_2 .

WYNIKI I ICH ANALIZA

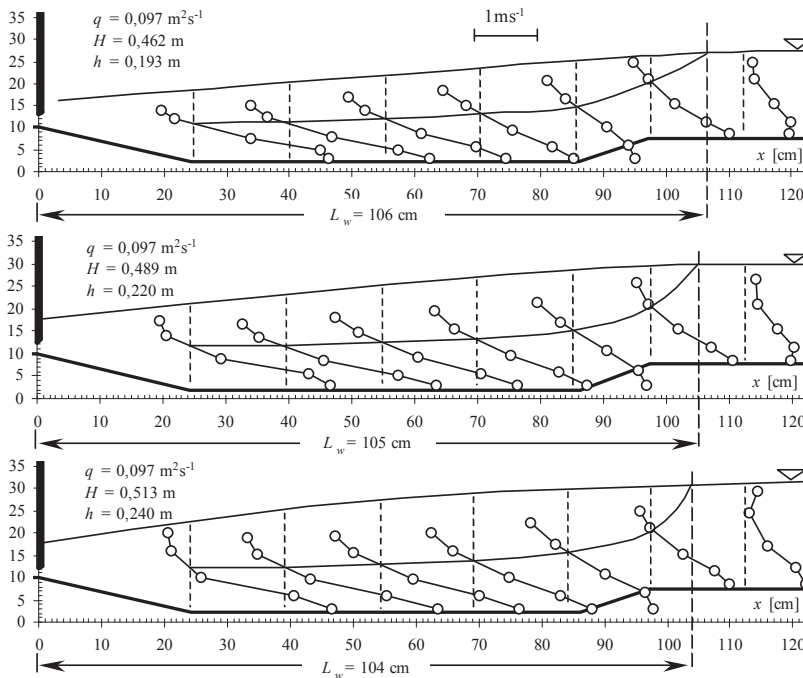
Pomierzone w doświadczeniach rozkłady prędkości w pionach przedstawiono na rysunkach 3, 4 i 5. Kształty tachoid są typowe dla strumienia na wypadku budowli z wypływem wody spod zasuwy. Największe prędkości występowały w pobliżu dna, co związane było z występowaniem strumienia tranzytowego w dolnej części strumienia. Bezpośrednio pod zwierciadłem wody wartości prędkości były ujemne. Łącząc punkty przecięcia tachoid z pionami pomiarowymi, wykreślono przebieg linii zerowej prędkości (rys. 3, 4 i 5) i dokonano jej ekstrapolacji w kierunku zwierciadła wody, lokalizując w ten sposób końcowy przekrój odsoku hydraulicznego. Wyniki pomiarów długości odsoku zamieszczono w tabeli 3.



Rys. 3. Pomierzone rozkłady prędkości w doświadczeniach z przepływem $q = 0,049 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
 Fig. 3. Measured distributions of velocity in investigations for flow $q = 0,049 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$



Rys. 4. Pomierzone rozkłady prędkości w doświadczeniach z przepływem $q = 0,073 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
 Fig. 4. Measured distributions of velocity in investigations for flow $q = 0,073 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

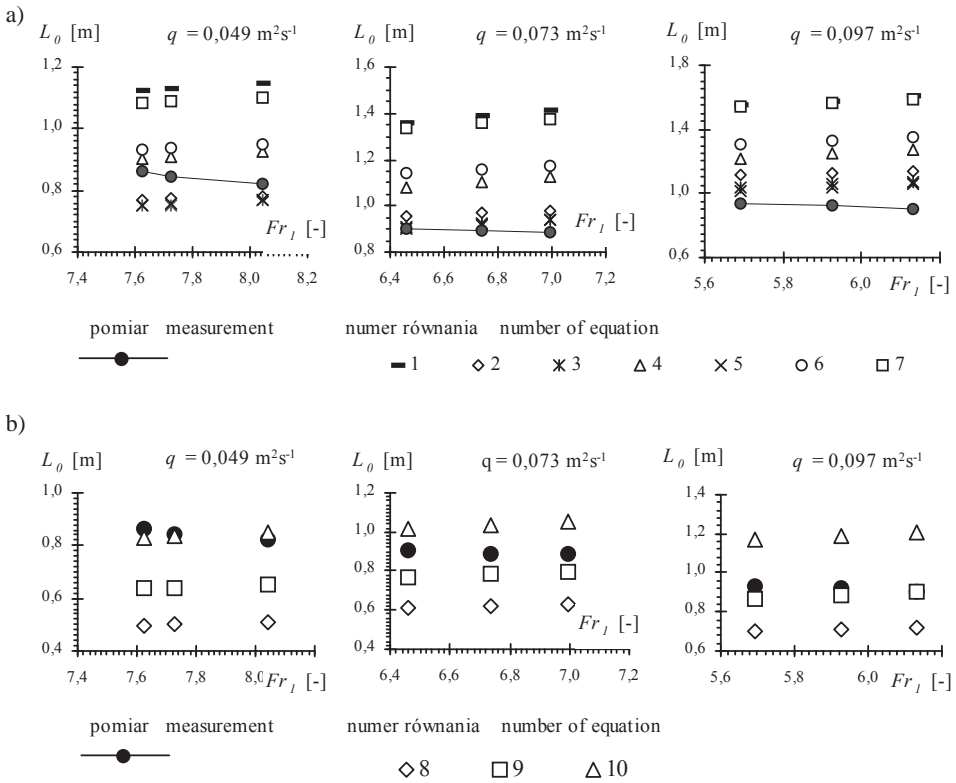


Rys. 5. Pomierzone rozkłady prędkości w doświadczeniach z przepływem $q = 0,097 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
 Fig. 5. Measured distributions of velocity in investigations for flow $q = 0,097 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Dla parametrów hydraulicznych strumienia w doświadczeniach (tab. 3) obliczono długość odskoku (L_0), stosując wzory z tabeli 1, a porównanie ich z wynikami pomiarów tej wielkości w doświadczeniach przedstawiono na rysunku 6. Uzyskano dużą rozbieżność wyników, zarówno długości (L_0) uzyskiwanych ze wzorów, jak i pomierzonych w porównaniu z obliczonymi. Największe wartości uzyskano ze wzorów Wu i Wójcickiego, a najmniejsze z równania Pawłowskiego. Pomierzone na modelu długości (L_0) podczas doświadczeń z przepływami $q = 0,073 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ i $q = 0,097 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ są mniejsze od obliczonych ze wzorów (1)–(7) (rys. 6a). Przyczyną tego może być zatopienie odskoku hydraulicznego w niecce wypadowej. Wzory zamieszczone w tabeli 1 dotyczą odskoku niezatopionego.

Pomierzone na modelu długości odskoku hydraulicznego porównano także z wynikami obliczeń L_0 równaniami (8)–(10), zalecanymi do stosowania w praktyce projektowej (rys. 6b). Długość odskoku na modelu w większości przypadków była większa od obliczonej ze wzorów (8) i (9), a zbliżona do wyznaczonej z równania (10), dającego maksymalną wielkość L_0 , której przekraczanie nie jest celowe we wszystkich budowlach piętrzących [Dąbkowski i in. 1982].

Dla parametrów przepływów na modelu (tab. 3) obliczono wartości bezwymiarowej długości odskoku $\lambda_0 = \frac{L_0}{h_1}$ wzorami z tabeli 2 i wyniki wraz z pomierzonymi przedstawiono na rysunku 7. Wartości λ_0 obliczone ze wzorów (11)–(13) są zbliżone do siebie,



Rys. 6. Pomierzone i obliczone długości odskoku hydraulicznego: a – wzorami (1)–(7), b – równaniami (8)–(10) zalecanymi do stosowania w praktyce

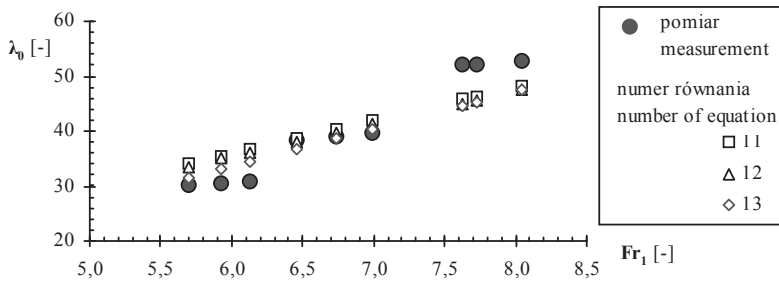
Fig. 6. Length of hydraulic jump measured and calculated by: a – equations (1)–(7), b – equations (8)–(10) recommended in practice

a pomierzone w doświadczeniach przy liczbie Froude'a $Fr_1 < 6,1$ były mniejsze od obliczonych, a przy $Fr_1 > 7,6$ były większe. Największą zgodność wyników pomiarów i obliczeń λ_0 uzyskano w doświadczeniach z liczbą Froude'a $Fr_1 = (6,5-7,0)$ – rysunek 7.

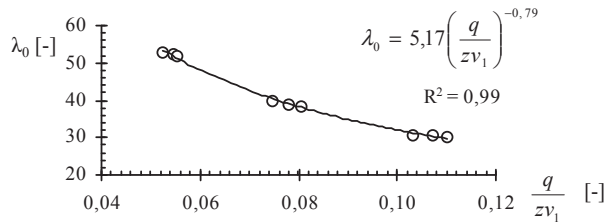
Bezwymiarową charakterystykę długości odskoku (λ_0) uzależniono od parametrów hydraulicznych strumienia wody w doświadczeniach. Obliczono wartości ilorazu $\frac{q}{zv_1}$, wiążącego jednostkowe natężenie przepływu (q) ze średnią prędkością ($v_1 = q/h_1$) w przekroju występowania pierwszej głębokości sprzężonej (h_1) i różnicą poziomów wody górnej i dolnej (z). Związek $\lambda_0 = f\left(\frac{q}{zv_1}\right)$ dla badanych przepływów przedstawiono na rysunku 8. Na podstawie wyników doświadczeń otrzymano równanie:

$$\lambda_0 = 5,17 \left(\frac{q}{zv_1} \right)^{-0,79}$$

o współczynniku determinacji $R^2 = 0,99$.



Rys. 7. Zmienność λ_0 z Fr_1 według wzorów (11)–(13) i według pomiarów
 Fig. 7. Variability of λ_0 with Fr_1 from measurement on model and equations (11)–(13)

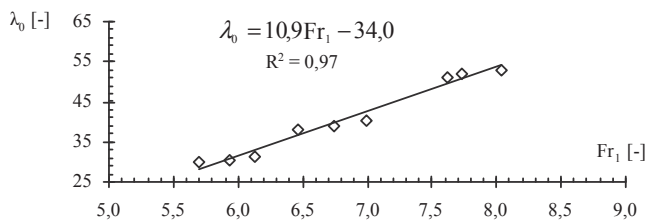


Rys. 8. Zależność $\lambda_0 = f\left(\frac{q}{zv_1}\right)$ dla badanych warunków hydraulicznych
 Fig. 8. Relationship $\lambda_0 = f\left(\frac{q}{zv_1}\right)$ for investigated flow conditions

Badano również zależność bezwymiarowej długości odskoku (λ_0) od liczby Froude’a (Fr_1) – rysunek 9. Wyniki pomiarów na modelu wyrównano funkcją liniową i uzyskano równanie $\lambda_0 = f(Fr_1)$, dla Fr_1 o wartościach z przedziału od 2,7 do 6,6:

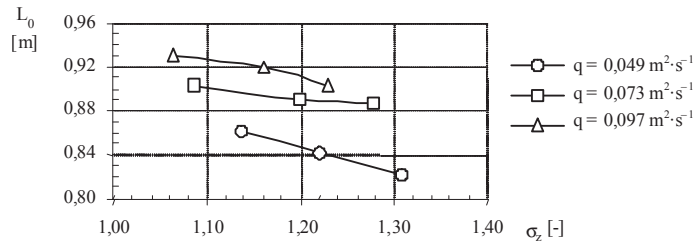
$$\lambda_0 = 10,9 Fr_1 - 34,0 \tag{17}$$

ze współczynnikiem determinacji $R^2 = 0,97$.



Rys. 9. Związek λ_0 z liczbą Froude’a (Fr_1) dla badanych warunków hydraulicznych
 Fig. 9. Relationship between λ_0 and Froude number (Fr_1) for investigated hydraulic conditions

Na rysunku 10 przedstawiono zależność długości odskoku (L_0) od współczynnika jego zatopienia (σ_z). Wraz ze wzrostem σ_z długość odskoku malała. Zwiększenie napelnienia koryta (h) w dolnym stanowisku powodowało wzrost współczynnika zatopienia (σ_z) i przysunięcie odskoku do zasuwy piętrzącej, a tym samym zmniejszenie jego długości.



Rys. 10. Związek długości odskoku (L_0) ze współczynnikiem zatopienia (σ_z)
 Fig. 10. Relationship between (L_0) and coefficient (σ_z)

PODSUMOWANIE

Długość odskoku hydraulicznego z uwagi na złożoną strukturę przepływu jest parametrem trudnym do zmierzenia, a identyfikowanie przez badaczy przekroju końcowego odskoku – subiektywne. Rozbieżności w wynikach obliczeń długości odskoku z wykorzystaniem proponowanych przez nich wzorów mogą wynikać właśnie z tej przyczyny.

Zalecane do stosowania w praktyce wzory do wymiarowania niecki wypadkowej zostały zaczerpnięte z badań dla płaskiego dna na wypadzie. Z przeprowadzonych doświadczeń wynikają wyraźne różnice pomierzonych długości odskoku w porównaniu z obliczonymi różnymi wzorami. Przyczyną rozbieżności mogą być różnice rzeczywistego schematu najczęściej stosowanego dla małych jazów i schematu, dla którego opracowano wzory na długość odskoku (L_0). Wyniki doświadczeń wykazały, że wzrost stopnia zatopienia odskoku hydraulicznego wpływa na ograniczenie jego długości.

Równania (16) i (17), uzyskane na podstawie wyników pomiarów długości odskoku na modelu, mają duże wartości współczynników determinacji (R^2), co dowodzi istnienia ścisłych związków długości odskoku z parametrami hydraulicznymi strumienia.

PIŚMIENNICTWO

- Bogomolov A.I., Michajlov K.A., 1965. Gidravlika. Izdatielstvo S.I., Moskva.
- Busch F., 1981. The Length of the Free Plane Hydraulic Jump on a Horizontal Floor in Regard to F , R and b/h_j . XIX IAHR-Congress, New Delhi, India, D(b), 15: 299–306.
- Čertousov M.D. 1962. Gidravlika – specjalny kurs. Gosudarstvennoje Energetičeskoje Izdatelstvo, Moskva – Leningrad.
- Dąbkowski Sz.L., Skibiński J., Żbikowski A., 1982. Hydrauliczne podstawy projektów wodnometeoracyjnych. PWRiL, Warszawa.
- Hager W.H., Bremen R., Kawagoshi N., 1990. Classical hydraulic jump: length of roller. Journal of Hydraulic Research 28, 5: 591–608.
- Jaworska M., 2010. Badania długości odskoku hydraulicznego na modelu jazu. Praca inżynierska. Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska SGGW, Warszawa.
- 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., 2008. Długość odskoku hydraulicznego na modelu jazu. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* 1 (39): 3–12.
Wytyczne instruktażowe projektowania budowli wodno-melioracyjnych – jazy, 1970. CBSiPWM, Warszawa.

INVESTIGATIONS OF LENGTH OF HYDRAULIC JUMP ON WEIR MODEL

Abstract. Results the investigation of length of submerged hydraulic jump are presented. Experiments were conducted on model taired construction with the outflow under the closure and with bottom stilling basins. Schema of investigated model and hydraulic parameters are typical for low head structures existing in the field. Measured length of hydraulic jump was compared with calculated according to different formulas. Relationships between nondimensional length of hydraulic jump $\lambda_0 = \frac{L_0}{h_1}$ with hydraulic parameters of flow q , v_1 , Fr_1 are calculated and compared with results of experiments. Increase the degree of submerged hydraulic jump reduces the length.

Key words: physical modeling, weir, length of hydraulic jump

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 7.07.2010