

Janusz URBAŃSKI

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

Długość odskoku hydraulicznego na modelu jazu **Length of hydraulic jump on model of the dam**

Słowa kluczowe: budowla piętrząca, niecka wypadowa, długość odskoku hydraulicznego
Key words: water structure, stilling basin, length of hydraulic jump

Wprowadzenie

Odskok hydrauliczny towarzyszący przejściu 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 strumienia, tworząc warunki powstawania odskoku przysuniętego do ściany piętrzącej. Zmniejsza to prędkość za wypadem i ogranicza erozję dna i skarp naturalnego koryta rzeki poniżej budowli. Jednym ze sposobów uzyskania odskoku przysuniętego jest zatopienie go w niecce wypadowej. Warunkiem poprawnego zaprojektowania niecki jest znajomość podstawowych parametrów odskoku – głębokości sprzężonych (h_1 i h_2) oraz długości.

Długość odskoku (L_0) mierzona jest od przekroju występowania pierwszej

głębokości sprzężonej (h_1) do przekroju końcowego, którego położenie trudno jest jednoznacznie 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 masy 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 tę długość od głębokości sprzężonych (h_1 i h_2) i liczby Froude'a (Fr_1) w przekroju występowania pierwszej głębokości sprzężonej. W tabeli 1 przytoczono także równania zalecane do stosowania w praktyce projektowej (za: Dąbkowski i in. 1982).

TABELA 1. Równania opisujące długość odskoku (L_0) na poziomym dnie (za: Čertousov 1962, Hager i in. 1990, Dąbkowski i in. 1982)

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

| 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 | $L_0 = 10,3h_1(\text{Fr}_1 - 1)^{0,81}$ | (2) |
| Pavlovski | $L_0 = 2,5(1,9h_2 - h_1)$ | (3) |
| Smetana | $L_0 \approx 6(h_2 - h_1)$ | (4) |
| Bakhmeteff and Matzke | $L_0 = 5(h_2 - h_1)$ | (5) |
| Page | $L_0 = 5,6h_2$ | (6) |
| Wu | $L_0 = 10(h_2 - h_1)\text{Fr}_1^{-0,16}$ | (7) |
| Formuły zalecane w praktyce Equations recommended in practice | $L_0 = 3h_2$ | (8) |
| | $L_0 = (4 \div 4,5)(h_2 - h_1)$ | (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, (np. $h_2 - h_1$). 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. Čertousov (1962) nazywa go odskokiem zatopionym, cechującym się tym, że jest on przysunięty do ściany przelewu lub otworu wypływowego, a spadająca struga jest zatopiona. Taka sytuacja niewątpliwie wpływa na strukturę strumienia w odskoku i bezpośrednio za nim, a zatem także na jego długość. Wpływ ten jest jednak słabo rozpoznany.

W pracy podano wyniki pomiarów długości (L_w) odcinka strumienia od zasuwy piętrzącej do przekroju stagnacji wody na powierzchni zwierciadła oraz wyniki obliczeń długości odskoku (L_0) i ich analizę.

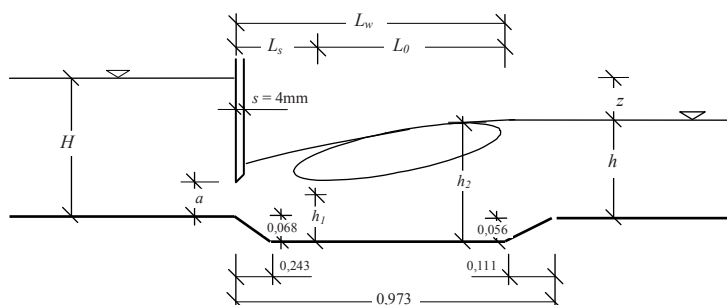
Metodyka i zakres badań

Badania przeprowadzono na modelu jazu (rys. 1) wykonanym w korycie prostokątnym szerokości $B = 1,0$ m.

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 at 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 | $\lambda_0 = 6Fr_1$ | (11) |
| Pietrkowski (1932) | 10,0 | 0,5÷1,46 | 5,5÷19,8 | 0,83÷1,72 | $\lambda_0 = 5,9Fr_1$ | (12) |
| Schröder (1963) | 59,8 | 3,4÷10,2 | 1,83÷9,93 | 4,44÷10,66 | $\lambda_0 = 40 \operatorname{erf} \left[\frac{1}{16} (1 + 8Fr_1^2)^{0,5} - 3 \right]$ | (13) |
| Sarma (1973) | 30,5 | 2,1÷6,7 | 1,21÷3,79 | 1,11÷1,97 | $\lambda_0 = 6,73(Fr_1 - 1)$ | (14) |



RYSUNEK 1. Schemat i podstawowe wymiary modelu jazu

FIGURE 1. Schema and base dimensions of model of the dam

Strumień wody wypływał spod zasuwę piętrzącej, podnoszonej na określoną wysokość (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.

Za pierwszą głębokość sprężoną (h_1) przyjęto najmniejszą głębokość stru-

mienia za zasuwę, nazywaną przez Čertousova głębokością zdławioną i obliczaną jako $h_1 = \varepsilon a$, gdzie ε jest współczynnikiem dławienia. Jego wartość zawarta w przedziale (0,615÷0,69) uzależniona jest przez Żukowskiego (Kiselev 1974) od stosunku a/H . Drugą głębokość sprężoną (h_2) obliczono z równania:

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

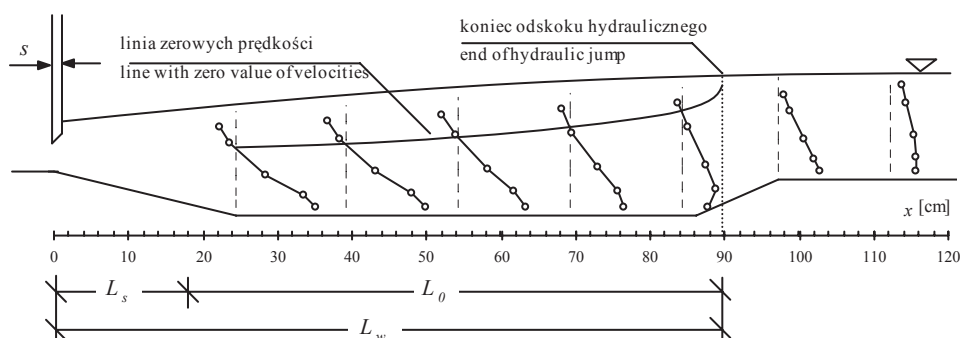
TABELA 3. Hydrauliczne parametry przepływów na modelu i pomierzone długości odskoku
TABLE 3. Hydraulic parameters of flow on model and measured length of hydraulic jump

| q | H | h | z | a | ϵ | h_1 | h_2 | Fr ₁ | L _w | L _s | L ₀ | σ_z |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|-----------------|----------------|----------------|----------------|------------|
| m ² ·s ⁻¹ | m | m | m | m | – | m | m | – | m | m | m | – |
| 0,049 | 0,345 | 0,133 | 0,224 | 0,037 | 0,616 | 0,023 | 0,135 | 4,5 | 0,83 | 0,093 | 0,74 | 1,40 |
| | 0,417 | | 0,296 | 0,032 | 0,614 | 0,020 | 0,147 | 5,7 | 0,89 | 0,080 | 0,81 | 1,28 |
| | 0,491 | | 0,370 | 0,029 | 0,612 | 0,018 | 0,156 | 6,6 | 0,94 | 0,073 | 0,87 | 1,21 |
| 0,073 | 0,310 | 0,165 | 0,157 | 0,067 | 0,621 | 0,042 | 0,141 | 2,7 | 0,90 | 0,168 | 0,73 | 1,53 |
| | 0,445 | | 0,292 | 0,049 | 0,616 | 0,030 | 0,176 | 4,4 | 0,95 | 0,123 | 0,83 | 1,27 |
| | 0,528 | | 0,375 | 0,043 | 0,614 | 0,026 | 0,192 | 5,4 | 1,09 | 0,108 | 0,98 | 1,18 |
| 0,097 | 0,378 | 0,193 | 0,197 | 0,080 | 0,621 | 0,050 | 0,172 | 2,8 | 1,07 | 0,200 | 0,87 | 1,42 |
| | 0,462 | | 0,281 | 0,064 | 0,617 | 0,039 | 0,200 | 3,9 | 1,02 | 0,160 | 0,86 | 1,24 |
| | 0,485 | | 0,304 | 0,060 | 0,616 | 0,037 | 0,210 | 4,4 | 1,08 | 0,150 | 0,93 | 1,19 |

Za koniec odskoku przyjęto miejsce stagnacji strug wody, czyli punkt na powierzchni zwierciadła wody, w którym podłużna prędkość była zerowa. Lokalizacji końcowego przekroju odskoku hydraulicznego dokonywano na podstawie analizy wyników pomiarów prędkości strumienia na wypadzie. 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 wy-

konano w pięciu punktach rozmieszczonych następująco: p_1 – w odległości 1 cm nad dnem, p_2 – na wysokości $0,2h_w$ nad dnem, p_3 – na wysokości $0,5h_w$, p_4 – na wysokości $0,7h_w$, a p_5 – na głębokości 2 cm pod zwierciadłem wody. Głębokość strumienia (h_w) na wypadzie była zmieniana 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



RYSUNEK 2. Sposób lokalizacji końca odskoku hydraulicznego na podstawie przebiegu linii zerowej prędkości

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

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 Michajlov 1965) w obszarze odskoku hydraulicznego i jej ekstrapolację w kierunku zwierciadła wody (rys. 2). Linia ta w miejscu styku ze zwierciadłem wody wskazywała położenie końcowego przekroju odskoku hydraulicznego.

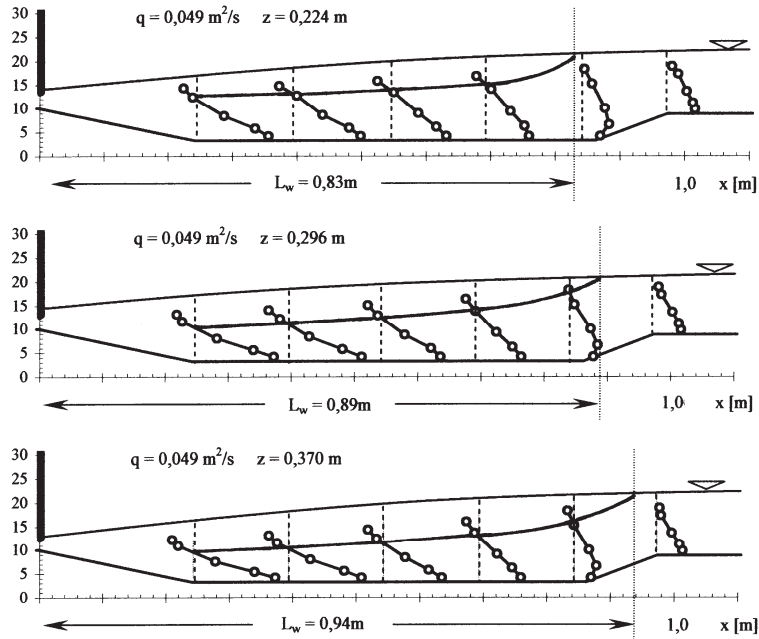
Jako długość odskoku hydraulicznego (L_0) przyjęto różnicę odległości mierzonej w osi koryta od zasuwy piętrzącej do punktu stagnacji strug (L_w) i odległości spadania strumienia (L'_s) pomniejszonej o grubość zasuwy $s = 4$ mm, tzn. $L_0 = L_w - L'_s$, gdzie $L'_s = L_s - s$ (rys. 2). Wartość $L_s = 2,5a$ obliczono według zaleceń (CBSiPWM, 1970) dla wypływu spod zasuwy bez progów. Przyjęta wartość L'_s jest średnią z przedziału zalecanego przez Čertusova (1962) dla schematu wypływu spod zasuwy nad dnem płaskim. Jako współczynnik zatopienia odskoku 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 .

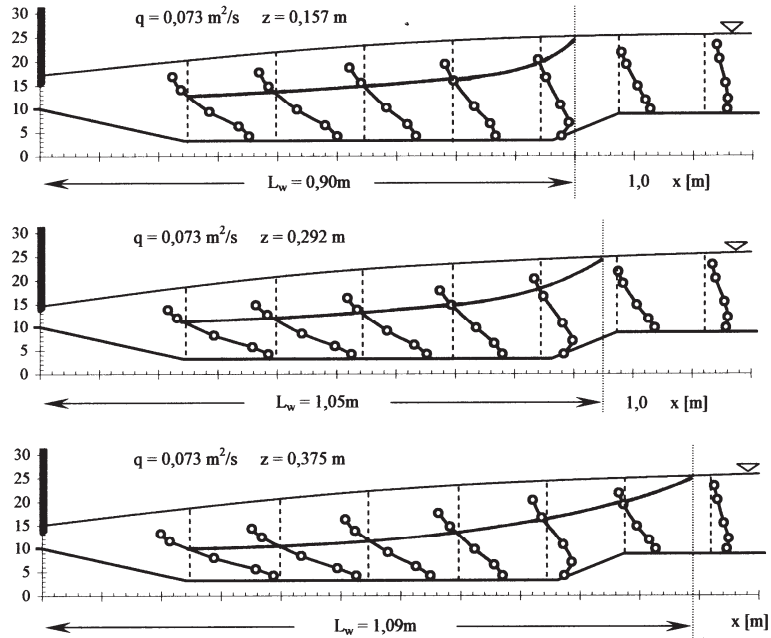
Analiza wyników doświadczeń

Pomierzone w doświadczeniach rozkłady prędkości w pionach na długości strumienia na wypadzie przedstawiono na rysunkach 3, 4 i 5. Kształty tachoid są typowe dla strumienia na wypadzie 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 odskoku hydraulicznego. Wyniki pomiarów długości odskoku zamieszczono w tabeli 3.

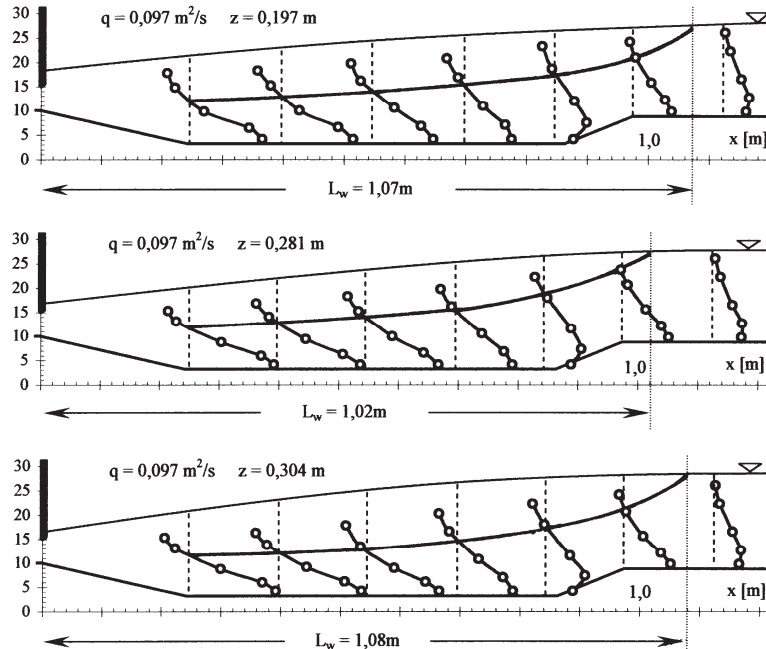
Wykorzystując wzory z tabeli 1 i parametry hydrauliczne strumienia w doświadczeniach (tab. 3), obliczono długości odskoku (L_0). Porównanie ich z wynikami pomiarów tej wielkości w doświadczeniach (rys. 6) wskazuje na dużą rozbieżność zarówno długości uzyskiwanych ze wzorów, jak i pomierzonych w porównaniu z obliczonymi. Największe wartości uzyskano ze wzorów Wu i Wójcickiego. Długości (L_0) z pomiarów na modelu leżą w większości przypadków w pobliżu środka przedziału wartości uzyskanych ze wzorów (1)–(7) (rys. 6a). Pomierzone na modelu długości odskoku porównano także z wynikami obliczeń (L_0) równania-



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



RYSUNEK 4. Pomierzone rozkłady prędkości w doświadczeniach z przepływem $q = 0,074 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
 FIGURE 4. Measured distributions of velocity in investigations for flow $q = 0,074 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$



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

mi (8)–(10), zalecanymi do stosowania w praktyce projektowej (rys. 6b). Długość odskoku na modelu 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 budowłach piętrzących (Dąbkowski i in. 1982).

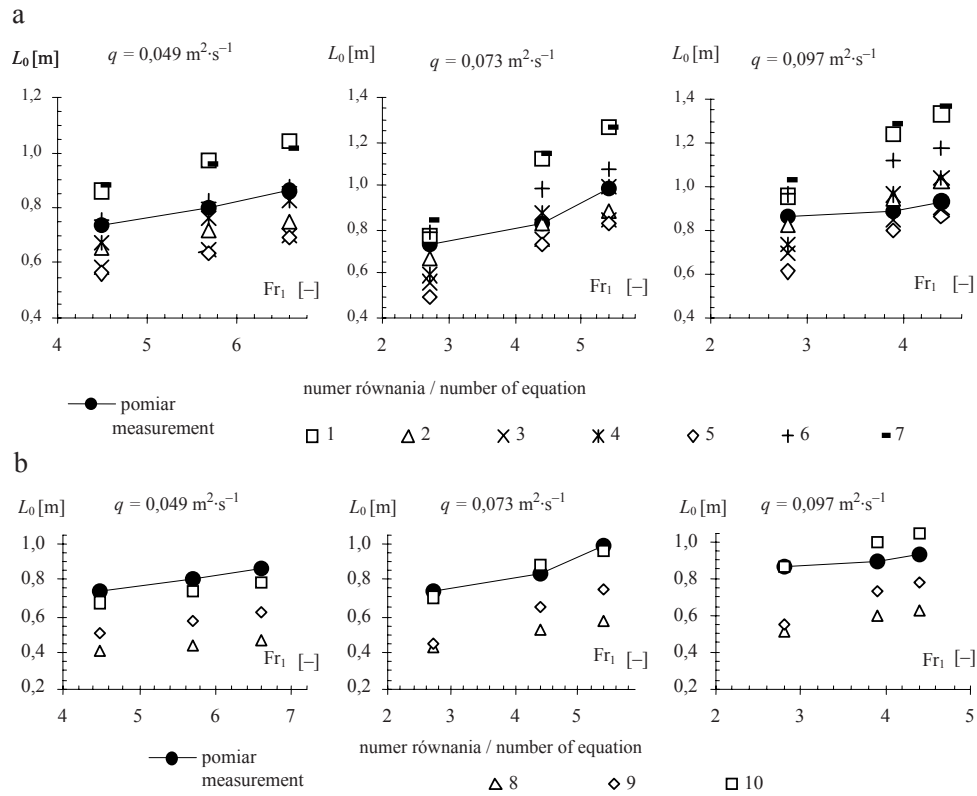
Dla parametrów przepływów na modelu (tab. 3) obliczono wartości bezwymiarowej długości odskoku $\lambda_0 = \frac{L_0}{h_1}$ wzorami z tabeli 2 i wyniki wraz z pomierzonymi przedstawiono na rysunku 7. Wzory dają duży rozrzut wyników, a wartości λ_0 z pomiarów przy liczbie Froude'a $Fr > 4,6$ są większe od obliczonych wzorami.

Dla warunków hydraulicznych, w jakich przeprowadzono doświadcze-

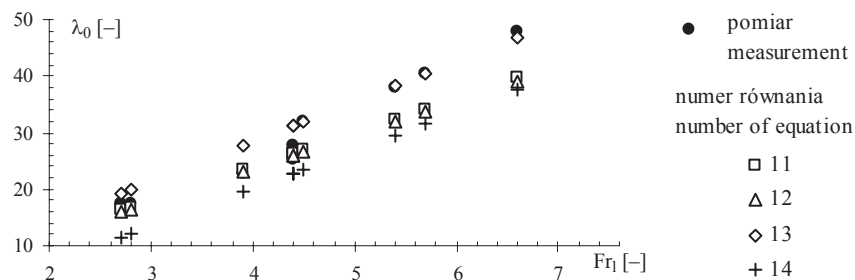
nia, uzależniono bezwymiarową charakterystykę długości odskoku (λ_0) od parametrów strumienia wody. Obliczono bezwymiarowy iloraz $\frac{q}{zv}$, wiążący jednostkowe natężenie przepływu (q) ze średnią prędkością wypływu wody spod zasuwy ($v = q/a$) i różnicą poziomów wody górnej i dolnej (z) – rysunek 1. Związek $\lambda_0 = f\left(\frac{q}{zv}\right)$ dla badanych przepływów przedstawiono na rysunku 8. Na podstawie wyników doświadczeń otrzymano równanie:

$$\lambda_0 = 17,1 \left(\frac{q}{zv} \right)^{-0,96}$$

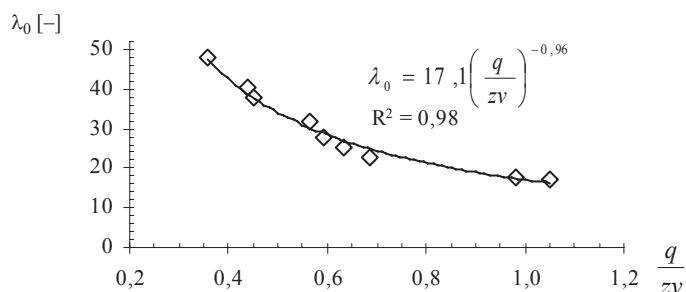
współczynnika determinacji $R^2 = 0,98$.



RYSUNEK 6. Pomierzone i obliczone długości odskoku hydraulicznego: a – wzorami (1)–(7), b – wzorami (8)–(10) zalecanymi do stosowania w praktyce
 FIGURE 6. Length of hydraulic jump measured and calculated: a – by equations (1)–(7), b – equations (8)–(10) recommended in practice

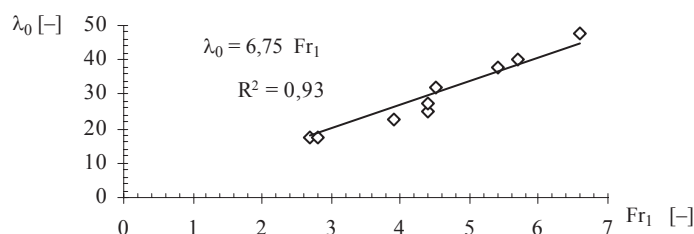


RYSUNEK 7. Zmienność λ_0 z Fr_1 według wzorów (11)–(14) i według pomiarów
 FIGURE 7. Variability of λ_0 with Fr_1 from measurement on model and equations (11)–(14)



RYSUNEK 8. Zależność $\lambda_0 = f\left(\frac{q}{zv}\right)$ dla badanych warunków hydraulicznych

FIGURE 8. Relationship $\lambda_0 = f\left(\frac{q}{zv}\right)$ for investigated flow conditions



RYSUNEK 9. Związek λ_0 z liczbą Froude'a (Fr_1) dla badanych warunków hydraulicznych

FIGURE 9. Relationship between λ_0 and Froude number (Fr_1) for investigated hydraulic 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 ważne dla Fr_1 o wartościach z przedziału od 2,7 do 6,6:

$$\lambda_0 = 6,75 Fr_1$$

ze współczynnikiem determinacji $R^2 = 0,93$.

Podsumowanie

Długość odskoku hydraulicznego, z uwagi na złożoną strukturę przepływu, jest parametrem trudnym do zmierzenia, a identyfikowanie przez badaczy prze-

kroju końcowego odskoku – subiektywne. Rozbieżności w wynikach obliczeń długości odskoku z wykorzystaniem proponowanych przez nich wzorów mogą częściowo wynikać także 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 między długościami pomierzonych odskoku a długościami obliczonymi różnymi wzorami. Przyczyn rozbieżności można upatrywać w różnicach rzeczywistego schematu najczęściej stosowanego dla jazów małych i średniej wielkości i schematu, dla którego opracowano wzory na długość odskoku (L_0).

Nieznany wpływ na długość odskoku wywiera też stopień jego zatopienia.

Związki (16) i (17), uzyskane na podstawie wyników pomiarów długości odskoku na modelu, ważne dla zakresu warunków hydraulicznych, w jakich przeprowadzono doświadczenia, mają duże wartości współczynników determinacji (R^2), co dowodzi istnienia ścisłych związków długości odskoku z parametrami hydraulicznymi strumienia.

Literatura

- 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_1 . XIX IAHR – Congress, New Delhi, India, Subject D(b), 15: 299–306.
- CBSiPWM, 1970: Wytyczne instruktażowe projektowania budowli wodnomelioracyjnych – jazy. Warszawa.
- ČERTOUSOV M.D. 1962: Gidravlika – specjalny kurs. Gosudarstvennoje Energetičeskoje Izdatelstvo, Moskva, Leningrad.
- DĄBKOWSKI Sz.L., SKIBIŃSKI J., ŻBIKOWSKI A. 1982: Hydrauliczne podstawy projektów wodnomelioracyjnych. PWRiL, Warszawa.
- HAGER W.H., BREMEN R., KAWAGOSHI N. 1990: Classical hydraulic jump: length of roller. *Journal of Hydraulic Research* 28, 5: 591–608.
- KISELEV P.G. 1974: Spravočnik po gidravličeskim rasčetam. Energia, 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.

Summary

Length of hydraulic jump on model of the dam. 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 , Fr_1 are calculated and compared with results of experiments.

Author's address:

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