

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2019), 28 (1), 61–71  
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2019), 28 (1)  
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2019), 28 (1), 61–71  
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2019), 28 (1)  
<http://iks.pn.sggw.pl>  
DOI 10.22630/PNIKS.2019.28.1.6

**Sławomir BAJKOWSKI, Aneta TYMIŃSKA, Sebastian PIĄTEK**

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
w Warszawie  
Faculty of Civil and Environmental Engineering, Warsaw University of Life Sciences  
– SGGW

## **Zredukowane współrzędne obrysu strumienia na trapezowym progu przepuszczalnym z przelewem o ostrej krawędzi na skarpie górnej Reduced co-ordinates of water surface profile above trapezoidal permeable sill with sharp-crested weir on the upstream slope**

**Słowa kluczowe:** próg gabionowy, przelew o ostrej krawędzi, przepływ wody, współrzędne zredukowane

**Key words:** gabion sill, sharp-crested weir, water flow, reduced co-ordinates

### **Wprowadzenie**

Progi to konstrukcje służące wzmocnieniu, stabilizacji i zabezpieczeniu dna koryt rzecznych. Obiekty te wykonuje się jako budowle przegradzające koryta rzeczne na całej ich szerokości. Do ich konstruowania coraz częściej wykorzystywane są gabiony. Konstrukcje te mają wiele zalet, do których zalicza się: elastyczność, wodoprzepuszczalność, wytrzymałość, korzystne aspekty eko-

logiczne, prostą technologię wykonania, przystępną cenę (Kozłowski, 2011). Wykonanie stałych przelewów we wnętrzu progów przepuszczalnych lub od strony wody górnej umożliwia utrzymanie minimalnego poziomu wody powyżej obiektu. W konstrukcjach progów trapezowych szczelne ekrany stanowiące przelewy stałe wykonuje się najczęściej na skarpie górnej lub w płaszczyźnie pionowej ściany, od strony dopływu. Tworzą one wtedy przelewy o ostrej krawędzi i płaszczyźnie ściany nachylonej do poziomu. Po przekroczeniu poziomu wyznaczonego przez górną krawędź przelewu skarpowego woda przelewa się nad jego koroną i wpływa do kamiennego korpusu progów (Bajkowski,

2013). Przepuszczalny korpus progu stanowi ośrodek porowaty, do którego powierzchniowy strumień wpływa wzdłuż jego korony. Przestrzenie pomiędzy ziarnami kruszywa wypełniającego progi gabionowe tworzą system nieregularnych porów, którymi przepływa woda ruchem turbulentnym (Bajkowski, 2013). W takich warunkach wewnątrz przepuszczalnego progu zachodzi intensywne mieszanie mas wody oraz pojawiają się duże pulsacje prędkości (Książczyński, 2008). Początkowo po przelaniu się wody nad przelewem skarpowym cała objętość wody wpływa do wnętrza korpusu na szerokości progu objętej strumieniem przelewowym. Przy zwiększających się natężeniach przepływu tworzy się przed zwartym strumieniem fala czołowa, wyznaczająca zakres strefy wpływania strumienia. Gdy czoło fali zaburzeń osiąga dolną krawędź korony progu, woda zatapia próg i przepływa również ponad jego korpusem (Akkerman i Konter, 1985). Znajomość długości strefy wpływania strumienia do wnętrza progu pozwala wydzielić na szerokości korony progu część niepokrytą wodą. Odcinek ten jest wolny od wody i może być wykorzystywany jako przejście przez rzekę. Wraz ze zwiększającym się natężeniem przepływu długość strefy wpływania wody zwiększa się do momentu, aż strumień na koronie osiągnie dolną krawędź progu. Po osiągnięciu tego stanu część wody wpływa do korpusu, a pozostała przelewa się ponad budowlą.

Celem pracy było opracowanie typowego kształtu górnego obrysu strumienia przelewowego dla progu gabionowego, w funkcji wielkości opisujących graniczne parametry strumienia. Obejmuje ona analizy wyników własnych badań

kształtu swobodnego zwierciadła wody nad trapezowym przepuszczalnym progiem kamiennym z ostrokrawędziowym przelewem na górnej skarpie. Kształt strumienia opracowano w układzie współrzędnych zredukowanych, przyjmując redukcję rzędnych punktów obrysu względem wzniesienia zwierciadła wody górnej nad koroną stałego przelewu skarpowego, a odciętych względem długości strefy wpływania strumienia na szerokości progu.

## Material i metody

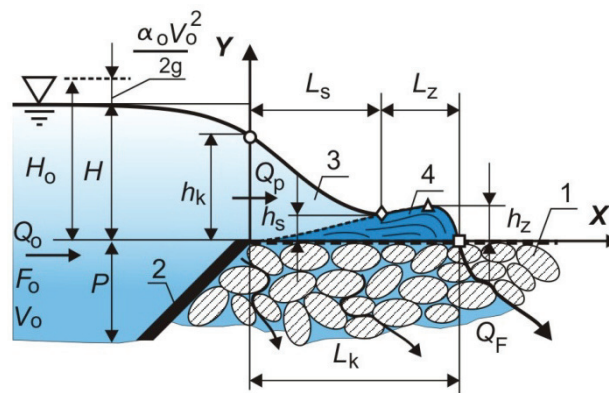
Układ strug nad przelewem stałym, który w analizowanym progu stanowi szczelny ekran na skarpie górnej, zależy od kształtu ściany przelewowej, wartości natężenia przepływu i wzniesienia zwierciadła wody górnej (Żbikowski i inni, 1986; Sobota, 1994). Dla progów przepuszczalnych na kształt strumienia przelewowego wpływają też charakterystyki geometryczne i ułożenie materiału wypełniającego korpus progu (Bajkowski, 2013). W analizach profilu zwierciadła wody na trapezowym progu przepuszczalnym ze szczelnym ekranem na skarpie górnej określono zmiany wartości wielkości charakteryzujących wybrane punkty na długości strumienia (rys. 1):

- $h_k$  – głębokość wlotowa strumienia w przekroju na granicy przelewu skarpowego (2 na rys. 1) i kamiennego progu (1 na rys. 1),
- $h_s$  – głębokość swobodnego zwierciadła na koronie progu w przekroju, poniżej którego powstaje falowa strefa zaburzeń (4 na rys. 1),

- $h_z$  – głębokość strumienia w najwyższym punkcie falowej strefy zaburzeń,
- $L_k$  – długość strefy napływu wody na koronie przelewu,
- $L_s$  – długość strefy zasięgu strumienia swobodnego (3 na rys. 1) na koronie progu,
- $L_z$  – długość falowej strefy zaburzeń.

Realizacja założonego celu obej-

nej. Długość podstawy progu wynosiła 0,40 m, a szerokość korony mierzona wzdłuż kierunku przepływu wody wynosiła 0,20 m. Współrzędne profilu zwierciadła wody ustalono na podstawie badań laboratoryjnych metodą pomiaru bezpośredniego. Pomiarów te wykonywano w punktach położonych na osi podłużnej koryta. W czasie trwania procedury pomiarowej utrzymywano stałe natężenie



RYSUNEK 1. Strumień przelewowy progu przepuszczalnego: 1 – kamienny próg przepuszczalny, 2 – ostro-krawędziowy przelew skarpowy, 3 – strefa strumienia swobodnego, 4 – falowa strefa wlotowa  
 FIGURE 1. Overflow stream of permeable sill: 1 – stone permeable sill, 2 – sharp-crested weir on upstream slope, 3 – free flow zone, 4 – wave inlet zone

mowała określenie geometrii progu gabionowego i przelewu na skarpie górnej oraz pomiary położenia zwierciadła wody w korycie badawczym dla różnych wartości natężenia przepływu. Badania wykonano w Laboratorium Hydraulicznym im. prof. Armanda Żbikowskiego Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Stanowisko badawcze stanowiło koryto o długości 4,00 m, szerokości 0,20 m i wysokości 0,40 m. Badany model był to trapezowy próg o wysokości  $P = 0,10$  m i nachyleniu obu skarp w stosunku 1 : 1, zabudowany szczelnym ekranem na skarpie gór-

przepływu wody. Wyniki z badań na modelach hydraulicznych, transformowane według skali podobieństwem na warunki rzeczywiste, ułatwiają projektowanie budowli wodnych.

Badania opisane przez Bajkowskiego (2013) prowadzono dla jednokowej konstrukcji progu kamiennego o zróżnicowanej obudowie: osiem modeli z przelewem o ostrej krawędzi na skarpie górnej, osiem modeli z przykryciem korony progu oraz osiem modeli progu z korpusem nieobudowanym. W każdym z rozwiązań cztery modele były wypełnione kruszywem łamanym

(KR), a cztery naturalnym (KO). Dla każdego rodzaju kruszywa wyselekcjonowano cztery grupy frakcyjne: 10–20, 20–30, 40–60 oraz 60–80 mm. Prezentowany w artykule próg stanowił model z przelewem na skarpie górnej, którego korpus wypełniony był kruszywem naturalnym (KO) grupy frakcyjnej 60–80 mm o gęstości właściwej  $\rho_s = 2,60 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Wskaźnik porowatości przepuszczalnego korpusu wynosił  $e = 0,743$  a porowatość  $p = 0,42$ . W celu określenia cech ziaren materiału wypełniającego korpus wykonano analizę granulometryczną opartą na bezpośrednim pomiarze ziaren miarodajnej próbki analitycznej.

Ustalone cechy ziaren przedstawiono w tabeli 1 stanowią:

- wymiary rzeczywiste:
  - długość ziarna ( $A$ ) określająca największy ustalony wymiar wzdłuż podłużnej osi,
  - szerokość ziarna ( $B$ ) stanowiąca wymiar pośredni ustalony wzdłuż poprzecznej osi,
  - grubość ziarna ( $C$ ) stanowiąca najmniejszy prostopadły wymiar do szerokości i długości;
- wymiary zastępcze:
  - $D_s$  – średnica średnia będąca średnią arytmetyczną z szerokości, długości i grubości ziarna,
  - $D_z$  – średnica objętościowa stanowiąca średnicę kuli o rzeczywistej objętości ziarna.

Cechy krzywej uziarnienia dla przyjętych wymiarów wiodących zestawiono w tabeli 2. Dla rzeczywistej krzywej uziarnienia za wymiar wiodący przyjęto  $B$ , a dla krzywych według średnic zastępczych były to wymiary  $D_s$  i  $D_z$ . Użyte skane cechy krzywej granulometrycznej dla uszeregowanych krzywych uziarnie-

TABELA 1. Parametry materiału kamiennego wypełniającego korpus progu

TABLE 1. Parameters of the grains filling the sill body

Parametr Parameter	Wartość Value		
	Minimalna Minimum	Średnia Average	Maksymalna Maximum
A	67,6	88,5	108,0
B	60,2	68,0	77,2
C	37,7	53,5	68,7
D <sub>s</sub>	57,8	70,0	81,6
D <sub>z</sub>	56,6	67,1	79,4

nia według wymiarów ziaren  $B$ ,  $D_s$  oraz  $D_z$  przedstawiono w tabeli 2, są to:

- $D_m$  – miarodajna średnica ziarna  $d_{50}$ , dla której 50% wagowej zawartości próbki ma średnicę mniejszą/większą niż podana,
- $D_p$  – średnia średnica ziarna obliczana jako średnia ważona rozpatrywanego przedziału procentowej wagowej zawartości ( $p_i$ ) analizowanego wymiaru  $D_i$ ,
- $C_c$  – wskaźnik krzywizny krzywej uziarnienia ustalony według (PN-B-02481/1998),
- $C_u$  – wskaźnik jednorodności uziarnienia materiału (współczynnik wysortowania Hazena) ustalony według PN-EN ISO 14688-1:2006,
- $C_k$  – wskaźnik różnoziarnistości według Knoroza,
- $C_d$  – cecha dominacji obrazująca przewagę ziaren mniejszych lub większych ziarnami o średnicy miarodajnej  $d_{50}$  (Kollis, 1966).

Kruszywo użyte w badaniach laboratoryjnych konstrukcji gabionowej, wyselekcjonowane według frakcji cechuje jednorodność uziarnienia. Według

TABELA 2. Cechy geometryczne krzywych uziarnienia według wymiaru wodącego  
 TABLE 2. Geometric features of the grain curves according to the leading dimension

Parametr Parameter	Wartość – Value		
	$B$	$D_s$	$D_z$
$D_m$ [mm]	68,75	73,46	68,70
$D_p$ [mm]	69,06	71,79	68,97
$C_c$	1,04	0,97	0,99
$C_u$	1,15	1,18	1,18
$C_c \cong 1, C_u < 6$ – materiał jednofrakcyjny – unifraction material			
$C_k$	0,75	0,73	0,68
	$C_k \leq 4-5$ – materiał dobrze wysortowany – material well sorted		
$C_d$	1,09	1,11	1,12
	$C_d > 1$ – przeważają cząstki o średnicy większej od $d_{50}$ – prevail the particles with diameters greater than $d_{50}$		

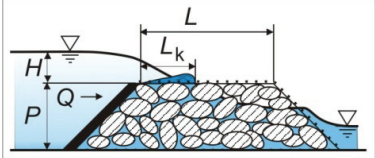
wskazanych kryteriów materiał próbki jest jednofrakcyjny z przewagą ziaren o wymiarach większych od średnicy miarodajnej. Zakresy pomiarowe podstawowych wielkości oraz bezwymiarowe parametry uzyskiwane w badaniach laboratoryjnych zestawiono w tabeli 3.

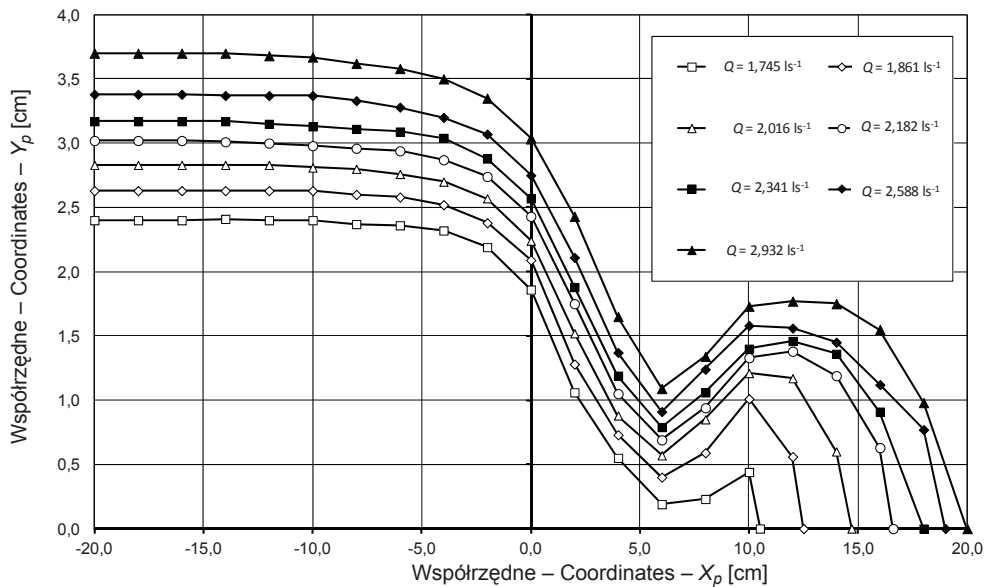
## Wyniki

### Kształt obrysu strumienia we współrzędnych wymiarowych ( $x_p, y_p$ )

Na rysunku 2 przedstawiono pomierzone układy zwierciadła wody we współrzędnych wymiarowych ( $x_p, y_p$ ).

TABELA 3. Parametry modelu fizycznego i zakresy wielkości pomiarowych  
 TABLE 3. Parameters of the physical model and values measuring ranges

Parametr Parameter			
	Wartość – value		
	minimalna minimum	średnia average	maksymalna maximum
$Q \cdot 10^{-3}$ [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]	1,745	2,238	2,932
$H \cdot 10^{-2}$ [m]	2,39	3,02	3,70
$H / L$	0,12	0,15	0,18
$L / H$	8,36	6,63	5,41
$P / H$	4,26	3,38	2,76
$H / (H + P)$	0,19	0,23	0,27
Re	16 463	23 534	31 879



RYSunEK 2. Wymiarowe krzywe zwierciadła wody na progu przepuszczalnym (badania własne)  
 FIGURE 2. Dimensional curves of the free water surface on the permeable sill (own research)

Kształt profilu swobodnego zwierciadła wody zależy od napełnienia nad przelewem związanego z aktualnym natężeniem przepływu, długości wpływania strumienia w korpusu progu oraz konstrukcji progu i parametrów granulometrycznych kruszywa (Bajkowski, 2013). Do parametrów progu przepuszczalnego, od których zależy układ swobodnego zwierciadła wody, należą w szczególności: średnica kruszywa, forma obtoczenia ziaren, porowatość korpusu odzwierciedlająca ułożenie warstwy powierzchniowej oraz rodzaj i wymiary siatki wzmacniającej. Potwierdzają to wyniki badań przedstawione w pracy Bajkowskiego (2013), wykonanych dla ośmiu wariantów progu przepuszczalnego o zróżnicowanych średnicach kruszyw: po cztery dla kruszywa łamanego i dla kruszywa naturalnego. Badania opisane przez Bajkowskiego (2013) prowadzono dla

modelu progu bez wzmocnienia, ośmiu modeli wzmocnionych siatką plecioną oraz czterech wariantów progu wzmocnionych siatką zgrzewaną. Prezentowany w artykule próg był wypełniony kruszywem o parametrach podanych w tabelach 1 i 2. Konstrukcja jego była wzmocniona siatką plecioną o oczkach sześciokątnych  $16 \times 20$  mm, o grubości drutu 0,6 mm. Badania wykonano dla ustalonego/jednego ułożenia kamieni.

Do przekroju wystąpienia doliny fali na końcu strefy swobodnego strumienia czynnikiem formującym kształt zwierciadła wody, oprócz poziomu wody górnej, jest obecność stałego przelewu o ostrej krawędzi na skarpie górnej. Na tym odcinku swobodne zwierciadło wody obniża się, uzyskując najmniejszą głębokość w miejscu wystąpienia dna fali, po czym rzędne zwierciadła wody wzrastają. Dla badanych zakresów przepływów w czę-



ści strumienia poniżej fazy swobodnego przepływu zauważono występowanie formy falowej, na długości której woda wpływa do wnętrza korpusu. Strefa zaburzeń powstaje pod wpływem kruszywa wypełniającego próg, co powoduje zmianę kształtu swobodnego zwierciadła wody. Powstająca na szerokości progu fala wydłuża strefę pokrycia wodą korony przelewu. Na zasięg falowej strefy zaburzeń poza wielkościami hydraulicznymi w dużym stopniu wpływają parametry granulometryczne kruszywa oraz sposób ułożenia jego warstwy powierzchniowej, co wykazały badania opisane przez Bajkowskiego (2013).

### **Kształt obrysu strumienia we współrzędnych zredukowanych ( $X_k, Y_k$ )**

Dla badanych przelewów redukcja obu współrzędnych punktów obrysu ( $x_p, y_p$ ) do wartości bezwymiarowych

$$\left( X_b = \frac{x_p}{H}, Y_b = \frac{y_p}{H} \right) \text{ względem wyso-$$

kości warstwy przelewowej ( $H$ ) nie daje jednoznaczności przebiegu profilu górnego obrysu strumienia. Na rysunku 3 pokazano profil górnego obrysu strumienia w układzie prostokątnym współrzędnych zredukowanych. Wartości

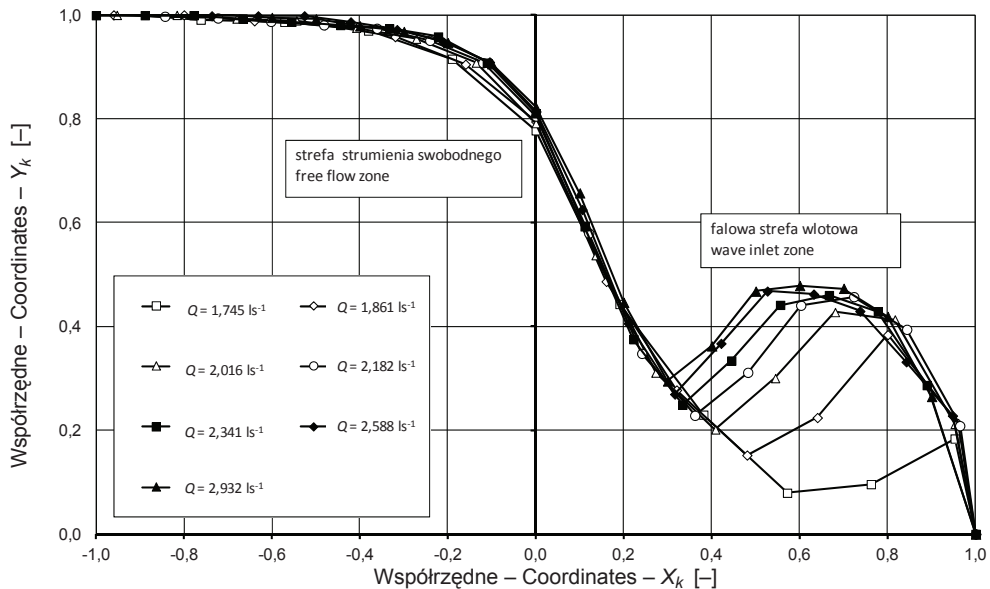
$$\left( X_k = \frac{x_p}{L_k}, Y_k = \frac{y_p}{H} \right) \text{ współrzędnych}$$

zredukowanych uzyskano, dzieląc wymiarowe współrzędne punktów obrysu profilu przez ich graniczne wartości maksymalne. Opracowując współrzędne zredukowane, przyjęto różne zmienne redukcyjne w kierunku półosi 0X oraz 0Y. Graniczną wartość rzędnych punk-

tów obrysu wyznacza wysokość warstwy przelewowej ponad rzędną korony progu w stanowisku górnym. W kierunku półosi 0Y współrzędne zredukowano do jednostkowego napełnienia  $H$  nad koroną progu. Dla półosi odciętych 0X graniczną wartość współrzędnych obrysu stanowi długość wpływania strumienia do wnętrza korpusu progu  $L_k$  – rysunek 1. Redukcję odciętych współrzędnych punktów obrysu wykonano, uwzględniając całkowitą długość wpływania ( $L_k$ ), bez podziału na strefę strumienia swobodnego ( $L_s$ ) i długość fali zaburzeń ( $L_z$ ). Dzieląc wartości pomierzonych wymiarowych współrzędnych punktów swobodnego obrysu strumienia przelewowego ( $x_p, y_p$ ) przez maksymalne wartości graniczne, uzyskano (współrzędne zredukowane układu prostokątnego

$$X_k = \frac{x_p}{L_k}, Y_k = \frac{y_p}{H}.$$

Profile zwierciadła wody w zredukowanym prostokątnym układzie współrzędnych zakresie korony progu przedstawiono na rysunku 4. Na profilu zwierciadła wody progu przepuszczalnego (rys. 4) we współrzędnych zredukowanych widoczne są różnice w układzie punktów na początkowym odcinku przepływu swobodnego i w strefie zaburzeń. Punkty o współrzędnych ( $X_s, Y_s$ ) dla strumienia swobodnego grupują się wzdłuż krzywej 1 na rysunku 4, a dla czołowej opadającej części fali współrzędne ( $X_z, Y_z$ ) wzdłuż krzywej 2 na rysunku 4. W początkowej strefie napływu za ekranem szczelnym na odcinku strumienia swobodnego (1 na rys. 4) punkty zwierciadła wody układają się wzdłuż jednej linii, przybierając kształt zbliżony do układu zwierciadła wody na przelewie



RYSunEK 3. Krzywe swobodnego zwierciadła wody progu przepuszczalnego w układzie współrzędnych zredukowanych (badania własne)

FIGURE 3. Curves of the free water surface of the permeable sill in the reduced co-ordinates (own research)

o ostrej krawędzi. W falowej strefie zaburzeń (2 na rys. 4) układ swobodnego zwierciadła wody wskazuje występowanie dwóch charakterystycznych odcinków. Pierwszy odcinek obejmuje wznoszącą część grzbietu fali zaburzeń, drugi grupuje punkty opadającej części grzbietu. Układ fali, wyznaczony przez punkty pomiarowe w zredukowanych współrzędnych, przedstawia typowy przebieg strumienia na długości korony.

Przebieg profilu zwierciadła wody wskazuje na możliwość opracowania dwóch cząstkowych krzywych typowego obrysu strumienia według równania (1):

$$Y = A \cdot X^4 + B \cdot X^3 + C \cdot X^2 + D \cdot X + E \quad (1)$$

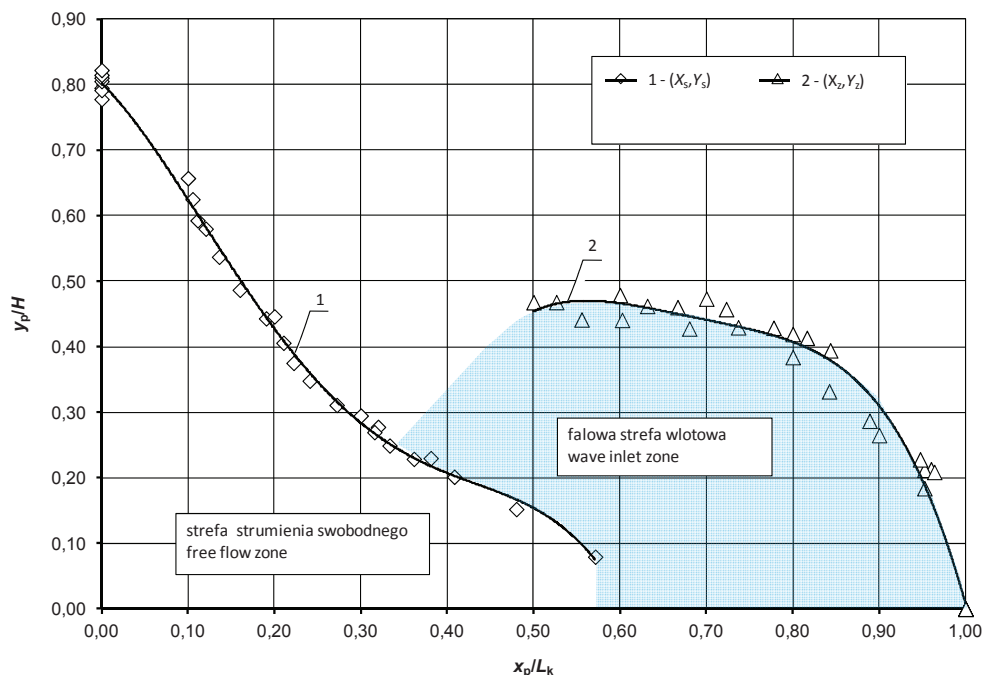
Jedno typowe równanie opisujące kształt górnego obrysu strumienia prze-

lewowego opracowano dla strumienia w obszarze strugi swobodnej, drugie wskazujące kształt powierzchniowej strugi strumienia przelewowego w strefie fali czołowej. Współczynniki opracowanych równań do wzoru (1) zestawiono w tabeli 4.

## Podsumowanie i wnioski

W artykule opisano wykorzystanie wyników badań laboratoryjnych w celu opracowania typowego kształtu górnego obrysu strumienia przepływającego ponad gabionowym progiem ze szczelnym ekranem na skarpie górnej. Badany próg wypełniony był materiałem kamiennym grupy frakcyjnej 60–80 mm. Porównując warunki swobodnego strumienia





RYSUNEK 4. Krzywe zwierciadła wody na progu przepuszczalnym we współrzędnych zredukowanych (badania autorów): 1 – obrys strumienia swobodnego, 2 – obrys strumienia falowego  
 FIGURE 4. Curves of the water surface of the permeable sill in reduced co-ordinates (research by authors): 1 – surface shape of the free stream, 2 – surface shape of the wave inlet zone

przepływającego nad nachylonym, trapezowym przelewem o ostrej koronie, kruszywo stanowiące wypełnienie korpusu przepuszczalnego progu oraz ekran szczelny na górnej skarpie wpływają na kształt strumienia na przelewie. Profil zwierciadła wody na koronie przelewu

przybiera nieregularny kształt i ulega zmianie wraz ze zwiększającym się natężeniem przepływu. Na wlocie przelewu występuje strefa swobodna przepływu strumienia, poniżej powstaje falowa strefa zaburzeń.

Wnioski z przeprowadzonych analiz:

TABELA 4. Parametry krzywych regresji według równania (1)  
 TABLE 4. Parameters of regression curves according to the equation (1)

Parametr Parameter					
A	B	C	D	E	R
Obrys strumienia swobodnego – Free stream contour $y_s / H = F(x_s / L_k)$					
-24,4707	26,8563	-7,3372	-1,2830	0,8020	0,998
Obrys strumienia falowego – Wave stream contour $y_z / H = F(x_z / L_k)$					
-35,2999	96,6811	-99,3142	45,0780	-7,1359	0,991

1. Wartości zredukowanych współrzędnych punktów obrysu pozwalają opracować równanie typowego profilu zwierciadła wody oddzielnie dla strefy strumienia swobodnego i falowego.
2. Dla profili według równania (1) uzyskano wartości współczynnika korelacji  $R$  (tab. 4) większe od 0,90, co wskazuje na istnienie między zmiennymi bardzo silnej zależności funkcyjnej, zarówno dla części swobodnej jak i falowej.

## Literatura

- Akkerman, G.J. i Konter, J.L.M. (1985). *Hydraulic Design Criteria for Rockfill Closure to Tidal Gaps, Vertical Closure Method* Report M 1741. Part IV. Delft: Delft Hydraulics Laboratory.
- Bajkowski, S. (2013). *Warunki przepływu wody przez budowle przepuszczalne*. Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- Kollis, W. (1966). *Gruntoznawstwo techniczne*. Warszawa: Arkady.
- Kozłowski, W. (2011). *Konstrukcje gabionowe – teoria, praktyka i badania*. Opole: Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej.
- Książczyński, K. (2008). *Hydraulika, Zestawienie pojęć i wzorów stosowanych w budownictwie*. Kraków: Oficyna Wydawnicza Politechniki Krakowskiej.
- PN-B-02481:1998. Geotechnika. Terminologia podstawowa, symbole literowe i jednostki miar.
- PN-EN ISO 14688-1:2006. Badania geotechniczne. Oznaczanie i klasyfikowanie gruntów. Część 1: Oznaczanie i opis.
- Sobota, J. (1994). *Hydraulika*. Tom, I, II. Wrocław: Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu.
- Żbikowski, A., Bajkowski, S., Batijewski, W., Dąbkowski, S.Z.L., Kubrak, J. i Lipka,

W. (1986). Wytyczne wymiarowania przelewów i ich kanałów odprowadzających w budowlach wodno-melioracyjnych. W H. Okruszko, *Obliczenia hydrauliczne przelewów budowli wodno-melioracyjnych*. (strony 9-93). Warszawa: PWRiL.

## Streszczenie

**Zredukowane współrzędne obrysu strumienia na trapezowym progu przepuszczalnym z przelewem o ostrej krawędzi na skarpie górnej.** Celem pracy było opracowanie typowego kształtu górnego obrysu strumienia trapezowego progu gabionowego ze szczelnym ekranem na skarpie górnej. Opracowano zredukowane współrzędne górnego obrysu strumienia trapezowego progu gabionowego ze szczelnym ekranem na skarpie górnej. Rzędne punktów obrysu zredukowano względem wysokości warstwy wody górnej nad koroną przelewu skarpowego. Odcięte punktów obrysu zredukowano według długości strefy wpływania strumienia do wnętrza kamiennego progu. W analizach wykorzystano wyniki badań laboratoryjnych, według których opracowano kształt swobodnego zwierciadła wody we współrzędnych zredukowanych. Analizowany próg składał się z części przepuszczalnej wypełnionej naturalnym kruszywem oraz stałej w formie nachylonego przelewu o ostrej koronie. Próg miał kształt trapezowy symetryczny o nachyleniu obu skarp 1 : 1. Kształt strumienia przepływającego nad analizowanym progiem zależy od wzniesienia zwierciadła wody górnej nad koroną przelewu skarpowego. W efekcie przeprowadzonych analiz otrzymano ujednolicony kształt strumienia zarówno dla przepływu swobodnego, jak i falowej strefy zaburzeń. Uzyskane profile cechuje silna zależność korelacyjna. Otrzymane wyniki mogą być brane pod uwagę przy projektowaniu podobnych budowli wodnych.

## Summary

**Reduced co-ordinates of water surface profile above trapezoidal permeable sill with sharp-crested weir on the upstream slope.** The purpose of the work was to develop a typical shape of water surface profile above trapezoidal gabion sill with the sharp-crested weir on the upstream slope. Reduced co-ordinates of the water surface profile above trapezoidal gabion sill with a sharp-crested weir on the upstream slope were developed. The ordinate points of the contour were reduced in relation to the height of the upstream water level above the sharp-crested weir. The cut off points of the contour were reduced according to the length of the zone influencing the stream to the inside of the stone sill. In the analyzes, the results of laboratory tests were used, according to which the shape of the free surface profile reduced coordinates was developed. The analyzed sill consisted of the permeable part filled natural aggregates and the solid part in the form of an inclined sharp-crested weir. The sill had

a symmetrical trapezoidal shape with the slopes of 1 : 1. The shape of the stream flowing over the analyzed sill depends on the head of the upstream water level above the crest of the slope weir. As a result of the conducted analyzes, a uniform stream shape was obtained for both the free and wave flow of the disturbance zone. The profiles obtained have strong correlation dependence. The obtained results can be taken into account during design similar hydraulic structures.

### Authors' addresses:

Sławomir Bajkowski, Aneta Tymińska,  
Sebastian Piątek  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
w Warszawie  
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska  
Katedra Inżynierii Wodnej  
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa  
Poland  
e-mail: slawomir\_bajkowski@sggw.pl  
tyminska\_aneta@wp.pl  
sebastianpiatek55@gmail.com