

TOMASZ SIUTA*

MODELOWANIE BIFURKACJI PRZEPŁYWU
W KANALE OTWARTYM Z PRZELEWEM BOCZNYMMODELING OF FLOW BIFURCATION
IN THE OPEN CHANNEL WITH SIDE WEIR

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki symulacji numerycznej rozdziału przepływu na przelewie bocznym w warunkach ruchu ustalonego. W tym celu zastosowano model przepływu dwuwymiarowego, jak również podejście uproszczone oparte na jednowymiarowej analizie przepływu. Wyniki obliczeń świadczą o dobrej zgodności obu metod w odniesieniu do uzyskanych wartości natężenia wydatku przelewu, jednak lokalne różnice w układzie zwierciadła w sąsiedztwie przelewu osiągają znaczące wartości.

Słowa kluczowe: symulacja numeryczna, bifurkacja przepływu, przelew boczny

Abstract

In the paper the results of numerical simulation of flow bifurcation at the side weir were presented. For this purpose 2D-shallow water conservative numerical program was used and simplified 1D approach. After 1D model calibration, good agreement of side weir discharges was achieved for both models, but water elevation differs meaningful in the vicinity of weir.

Keywords: numerical simulation, flow bifurcation, side weir

* Dr inż. Tomasz Siuta, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

Oznaczenia

- Q – natężenie przepływu [m^3/s]
 m – współczynnik wydatku przelewu
 h – głębokość [m]
 B – szerokość przelewu prostokątnego [m]

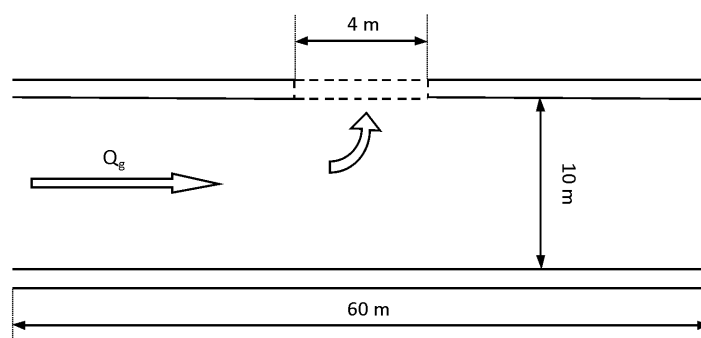
1. Wstęp

Jedną z metod ochrony przeciwpowodziowej jest redukcja fali wezbraniowej przez odprowadzenie części przepływu z rzeki do sztucznego lub naturalnego polderu za pośrednictwem przelewu bocznego zlokalizowanego na jednej ze stron obwałowania rzeki [3]. Obliczenie wydatku przelewu bocznego w określonych warunkach przepływu w rzece nie jest tak łatwe, jak to ma miejsce w przypadku przelewu czołowego. Podsyktowane jest to gwałtowną zmianą układu zwierciadła i składowej poprzecznej prędkości wzdłuż przelewu. Niemniej jednak inżynierowie coraz częściej mają do dyspozycji zaawansowane techniki komputerowe, pozwalające na rozwiązywanie złożonych problemów hydraulicznych z większą dokładnością, niż pozwalają na to wzory empiryczne [2, 6].

Celem artykułu jest przedstawienie wyników modelowania rozdziału przepływu w kanale otwartym przez przelew boczny. Obliczenia przeprowadzono za pomocą modelu przepływu dwuwymiarowego [4], jak również metodą uproszczoną na podstawie modelu przepływu jednowymiarowego [1].

2. Schemat kanału z przelewem bocznym i warianty obliczeń

Numeryczną symulację przepływu przeprowadzono w kanale o przekroju prostokątnym, na odcinku o długości 60 m (rys. 1). Spadek dna kanału jest stały i wynosi 0,001. Przyjęto współczynnik szorstkości dna równy 0,03. W połowie długości analizowanego fragmentu kanału na jednej ze ścian zlokalizowany jest przelew o szerokości 4 m i zerowej wysokości progu.



Rys. 1. Schemat kanału z przelewem bocznym
 Fig. 1. Channel with side weir scheme

Obliczenia dotyczą ruchu ustalonego w reżimie nadkrytycznym. Przeprowadzono trzy warianty obliczeń dla trzech wartości przepływu w przekroju górnym kanału (Q_g): 100 m³/s, 30 m³/s i 10 m³/s.

3. Model przepływu dwuwymiarowego

Symulację przepływu wody w kanale przeprowadzono za pomocą programu CCHE2d [4]. Program rozwiązuje numerycznie równania wody płytkiej w następującej postaci:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = q_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + gh \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_{bx} - T_x) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) + gh \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{1}{\rho} (\tau_{by} - T_y) = 0 \quad (3)$$

gdzie:

- q_x – przepływ jednostkowy w kierunku x ,
- q_y – przepływ jednostkowy w kierunku y ,
- q_m – dopływ/odpływ źródłowy,
- z_b – rzędna dna,
- h – głębokość,
- τ_{bx} – naprężenie działające na dno w kierunku x ,
- τ_{by} – naprężenie działające na dno w kierunku y .

$$T_x = \frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial y}; \quad T_y = \frac{\partial(h\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} \quad (4)$$

gdzie:

- τ_{ij} – tensor naprężeń turbulentnych.

Współczynnik lepkości turbulentnej liczony jest na podstawie równania Prandtla [4]. Równania przepływu rozwiązywane są metodą elementów skończonych, na siatce równoległoboków.

W opisywanej symulacji opracowano siatkę dyskretyzacyjną zbudowaną z prostokątów o wymiarach 0,7 m × 0,5 m oraz prostokątów o wymiarach 0,4 m × 0,5 m w pasie obejmującym szerokość otworu.

Górny warunek brzegowy ma postać stałej wartości przepływu. Dolny warunek brzegowy ma postać formuły Manninga. Rozwiązanie dla ruchu ustalonego uzyskano jako przypadek graniczny rozwiązania dla ruchu nieustalonego. Liczba iteracji zależała od wariantu obliczeń i nie przekraczała pięciuset przy kroku czasowym równym 1 s.

4. Model przepływu jednowymiarowego

Modele dwuwymiarowe, pomimo na ogół dokładniejszych wyników obliczeń, wymagają większego zasobu danych wejściowych i są bardziej czasochłonne w obliczeniach w porównaniu z modelami jednowymiarowymi. W niektórych przypadkach jednowymiarowa analiza przepływu jest w zupełności wystarczająca ze względów praktycznych.

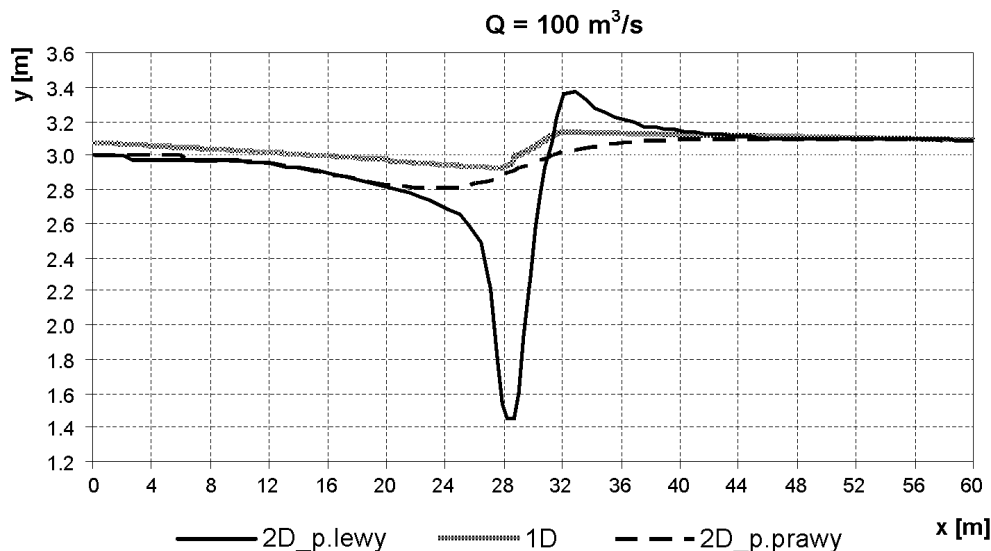
Model bifurkacji przepływu w kanale otwartym (rys. 1) opracowano również za pomocą programu Hec-Ras. Program ten stwarza możliwość wprowadzenia przelewu bocznego lub otworu w obwałowaniu cieku. Oprócz geometrii przekroju przelewu wymagane jest określenie wartości współczynnika wydatku przelewu/otworu. W programie do obliczenia wydatku przelewu bocznego stosowana jest klasyczna formuła, jak dla przelewu czołowego, ale w formie całkowej, uwzględniającej spadek zwierciadła wody (5). Obliczenia odbywają się iteracyjnie, aż do momentu domknięcia bilansu przepływu w kanale przed i za przelewem [1].

$$Q = m\sqrt{2g} \int_0^B b \cdot h(b)^{3/2} \quad (5)$$

gdzie:

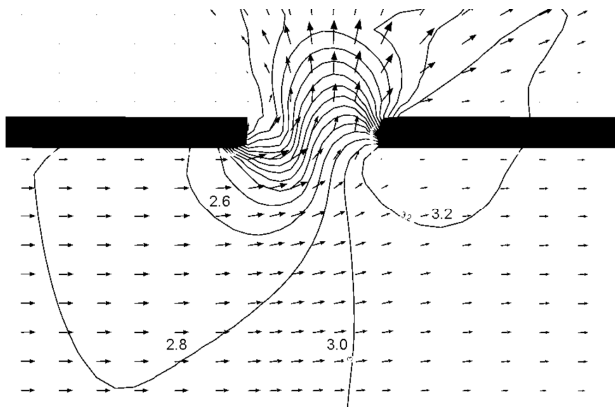
- Q – wydatek przelewu [m^3/s],
- h – zmienna głębokość na przelewie [m],
- B – szerokość przelewu (wlotu) [m],
- g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2].

Wykonano obliczenia, przyjmując domyślną wartość współczynnika $m = 1,6$ dla przelewu o zerowej wysokości progu [1].

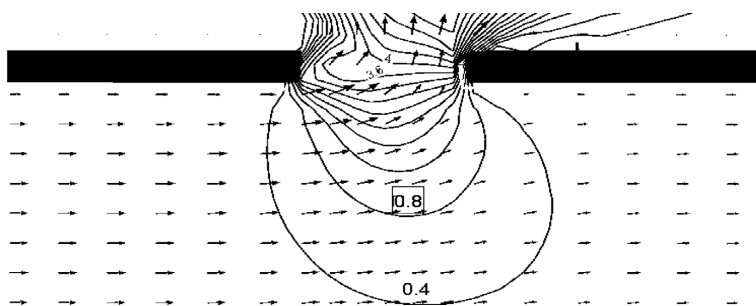


Rys. 2. Profile rzędnej zwierciadła obliczone modelem 2D i 1D

Fig. 2. Water elevation profiles calculated by 2D and 1D model



Rys. 3. Pole głębokości obliczone modelem 2D dla przypadku: $Q_g = 100 \text{ m}^3/\text{s}$
 Fig. 3. Water depth field calculated by 2D in the case of $Q_g = 100 \text{ m}^3/\text{s}$



Rys. 4. Pole składowej prędkości v_y dla przypadku: $Q_g = 100 \text{ m}^3/\text{s}$
 Fig. 4. Velocity v_y component in the case of $Q_g = 100 \text{ m}^3/\text{s}$

4. Analiza wyników

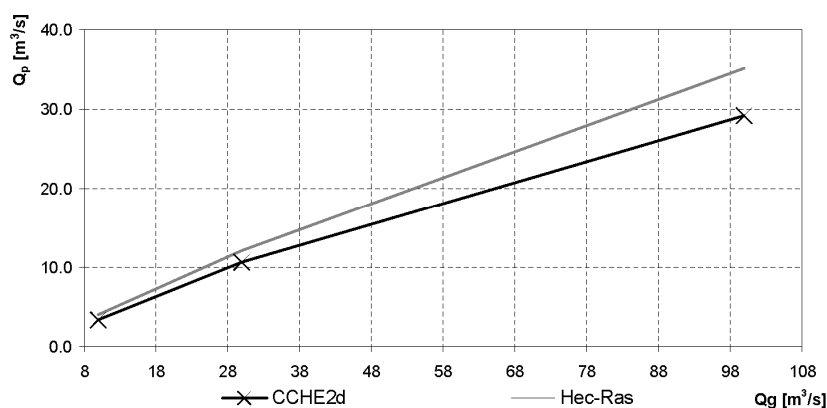
Wartości wydatku przelewu bocznego, w zależności od natężenia przepływu zadanego w górnym przekroju kanału, ilustrują tabela 1 i rysunek 5. Porównano tutaj wyniki uzyskane na podstawie modelu CCHE2d z wynikami uzyskanymi za pomocą programu Hec Ras. Wyniki zamieszczone w tabeli wykazują duży stopień zgodności, różnice względne wartości wydatków przelewu liczone za pomocą obu modeli nie przekraczają 20%.

Tabela 1

Porównanie obliczonego wydatku przelewu bocznego

Q_g [m^3/s]	Wydatek przelewu bocznego [m^3/s]	
	model 2D	model 1D
100	29,21	35,14
30	10,6	12,09
10	3,45	4

Profil zwierciadła w obrębie przelewu ma przebieg wznoszący, co jest konsekwencją nadkrytycznego reżimu przepływu [5]. O ile wartości obliczonego wydatku przelewu za pomocą obu modeli są zbliżone, o tyle położenie i kształt zwierciadła wykazuje duże zróżnicowanie w zależności od odległości profilu (przekroju podłużnego) od ściany, w której zlokalizowany jest przelew (rys. 2 i 3). W modelu jednowymiarowym zakłada się poziomy układ zwierciadła w przekroju poprzecznym, podczas gdy w rzeczywistości w sąsiedztwie otworu rzędna zwierciadła ulega gwałtownym zmianom. Na rysunku 2 przedstawiono dwa profile zwierciadła, obliczone modelem dwuwymiarowym, biegnące tuż przy obu ścianach kanału („lewy” i „prawy”). Profil zwierciadła policzony za pomocą programu Hec-Ras leży nieco powyżej profilu „prawego” obliczonego modelem CCHE2d. Jest to widoczne szczególnie na odcinku powyżej otworu, różnica rzędnych sięga tutaj do 18 cm przy przepływie $Q_g = 100 \text{ m}^3/\text{s}$.



Rys. 5. Wydatek przelewu bocznego w funkcji dopływu górnego Q_g

Fig. 5. Discharge of side weir as a function of inflow discharge Q_g

Model dwuwymiarowy wskazuje na prawie dwukrotne obniżenie głębokości wody na początku otworu (profil „lewy”, rys. 2), przy czym im większa wartość przepływu Q_g , minimalna głębokość przesuwana się nieco w dół otworu na skutek kontrakcji strugi na przelewie bocznym. W dolnej części otworu, przy krawędzi ściany można zaobserwować lokalne podpiętrzenie zwierciadła, spowodowane szerokością ściany kanału.

Największe prędkości w kierunku poprzecznym do kierunku przepływu w kanale występują w połowie szerokości otworu w profilu przy ścianie. W miarę oddalania się od ściany z otworem, maksymalna prędkość v_y przesuwana się w dół (rys. 4)

5. Wnioski

Model dwuwymiarowy stwarza możliwość dokładniejszej, bardziej szczegółowej analizy efektów bifurkacji przepływu w porównaniu z modelem jednowymiarowym. Dotyczy to przede wszystkim układu powierzchni zwierciadła w pobliżu przelewu bocznego. Wartości wydatków badanego przelewu bocznego obliczone za pomocą modelu jednowymiarowego Hec-Ras i modelu dwuwymiarowego CCHE2d różnią się o nie więcej niż 20%.

Literatura

- [1] Brunner G.W., *Hec Ras hydraulice reference manual*, computer program documentation, 2008.
- [2] Gutierrez Andres J., et al., *2D Flooding Analysis in Scotland*, 11th Int. Con. On Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 2008.
- [3] Jaffe A.D., Sanders B.F., *Engineered levee breaches for flood mitigation*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 127, No. 6, 2001.
- [4] Jia J. Wang S.Y., *CCHE2D Verification and Validation Tests Documentation*, Technical Report No. NCCHE-TR-2001-2, August 2001.
- [5] Swamee P.K., et al., *Subcritical flow over rectangular side weir*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 120, No. 1, 1994.
- [6] Twaróg B., *Ocena zagrożenia w wyniku przerwania wału przeciwpowodziowego*, Gospodarka Wodna, nr 12, Wyd. NOT Sigma, Warszawa 2004.