

TOMASZ SIUTA*

NUMERYCZNE MODELOWANIE DWUWYMIAROWEGO
POLA PRZEPIŹYWU NA OBSZARACH ZALEWOWYCHNUMERICAL SIMULATION OF 2D FLOW FIELD
AT INDUATION AREA

Streszczenie

W artykule przedstawiono i poddano analizie przykładowe wyniki symulacji numerycznej dwuwymiarowego pola ustalonego przepływu na terenach zalewowych podgórskiej rzeki Raby tuż poniżej zbiornika retencyjnego w Dobczycach. Obliczenia mają charakter poglądowy i mają na celu przedstawienie tych wyników z rozwiązania dwuwymiarowego, których nie można otrzymać za pomocą konwencjonalnych modeli jednowymiarowych, powszechnie stosowanych przy wyznaczaniu stref zalewu. Wyniki obliczeń wykorzystano do wyznaczania potencjalnych stref zalewu, będącego skutkiem przerwania lub przelania się wody przez koronę wału.

Słowa kluczowe: pole przepływu, symulacja numeryczna, strefa zalewu, przerwanie wału

Abstract

In the paper the results of numerical simulation of steady 2D flow field at floodplains of Raba river just downstream of Dobczyce reservoir were presented. The purpose of this calculation is presentation of qualitative hydraulics effects which are unattainable by conventional 1D models widely applied in the field of floodplains determination. This hydraulics effects concern the potential flow due to levee breach or levee overtopping mainly.

Keywords: numerical simulation, floodplains, levee breach, flow field

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

1. Wstęp

Jednym z podstawowych narzędzi oceny zagrożenia powodziowego są mapy topograficzne z naniesionymi strefami zalewu, odpowiadającymi określonym przepływowi prawdopodobnym [7]. W przypadku obwałowanych odcinków rzek należy raczej mówić o potencjalnych strefach zalewu [7], będących konsekwencją przerwania wału lub zniszczenia innych obiektów hydrotechnicznych. W takich przypadkach często wyznacza się strefy zalewu przy założeniu całkowitej likwidacji obwałowania, jest to zrozumiałe w przypadku długich odcinków rzek, gdzie trudno przewidzieć lokalizację ewentualnej awarii wału. Jak pokazują doświadczenia ostatnich powodzi, w obszarach o gęstej zabudowie na zawalu istnieje potrzeba indywidualnego podejścia do wyznaczania potencjalnych stref zalewu. Uzyskanie realistycznej oceny zagrożenia wspomnianych obszarów w konsekwencji awarii wałów jest możliwe przez uwzględnienie wielu hipotetycznych wariantów przerwania wałów w różnych lokalizacjach i opracowanie na tej podstawie mapy maksymalnych głębokości lub energii właściwej [8]. Zastosowanie modelu dwuwymiarowego w przypadku zlewni rzek podgórskich i górskich dostarcza nie tylko informacji o głębokości wody w strefie zalewu, ale również pozwala precyzyjniej (w porównaniu z modelami jednowymiarowymi) wyznaczyć pole prędkości, którego układ jest bardziej złożony w porównaniu z rzekami nizinnymi, gdzie dominują obszary bezodpływowe i w fazie przepływu ustalonego prędkości na ogół nie są duże. Modele numeryczne wody płytkiej, oparte na zaawansowanych schematach zachowawczych, stwarzają możliwość odwzorowania przepływów szybkozmiennych z dużym spadkiem zwierciadła, które są często następstwem awarii budowli hydrotechnicznych [1, 4, 6].

Modele dwuwymiarowe pozwalają ponadto na opisanie dynamicznej strefy rozprzyszczenia [3, 8], co może mieć istotne znaczenie z punktu widzenia ostrzeżenia i ewakuacji ludności przed zagrożeniem.

Do obliczeń przepływu efektów przepływu dwuwymiarowego na obszarach zalewowych rzeki podgórskiej, wybrano do analizy przykładowy fragment zlewni rzeki Raby pomiędzy 60 a 62 km.

2. Charakterystyka obszaru zalewowego

Analizowany odcinek rzeki Raby leży pomiędzy 60 a 62 km, tuż poniżej zbiornika retencyjnego w Dobczycach i obejmuje większość obszaru miasta (rys. 1). Położony jest on w dolinie rzeki podgórskiej o szerokości rzędu 500 m. Średni spadek dna koryta rzeki na tym odcinku wynosi 0,0014. Lewobrzeżna część doliny jest bardziej płaska w porównaniu z prawobrzeżną. W części prawobrzeżnej dominuje zabudowa zwarta, w części lewobrzeżnej zabudowa ciągnie się wzdłuż drogi i w poprzek doliny (rys. 1).

Po obu stronach rzeka jest obwałowana, pozwalając na maksymalną przepustowość około $950 \text{ m}^3/\text{s}$. Zrzuty wody ze zbiornika, które przekroczą wspomnianą wartość przepływu spowodują przelania się wody przez koronę wału (głównie na odcinku lewobrzeżnym) począwszy od przekroju dolnego (60 km).

3. Numeryczny model terenu

Numeryczny model terenu opracowano na podstawie dygitalizacji mapy kartograficznej w skali 1:10000, oraz na podstawie uproszczonego modelu koryta rzeki. Przyjęto trapezowy kształt przekroju koryta o szerokości dolnej podstawy równej 30 m i nachyleniu skarp równym 1:5. Rzędne wysokości wałów i ich usytuowanie przyjęto na podstawie danych geodezyjnych pomierzonych w przekrojach w km: 62, 61.5, 61, 60. W programie SMS utworzono triangulacyjną mapę wysokościową, a następnie nieregularną siatkę dyskretyzacyjną pokrywającą analizowany obszar terenu [5]. Rzędną terenu w poszczególnych oczkach siatki uzyskano poprzez interpolację liniową na podstawie wspomnianej mapy wysokościowej.



Rys. 1. Mapa zlewni częściowej Raby wraz z referencyjną strefą zalewu
Fig. 1. Map of partial catchment with reference flood zone

4. Matematyczny model przepływu wody płytkiej

Obliczenia dwuwymiarowego pola przepływu przeprowadzono za pomocą programu Hydro_as_2d, do którego aplikacji stosowane jest środowisko SMS [5]. Program wykorzystuje numeryczne rozwiązanie równań Navier-Stokesa w postaci uproszczonej do dwuwymiarowego przepływu w planie. Model ten tworzą następujące równania:

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

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

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

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 styczne przy dnie w kierunku x ,
- τ_{by} – naprężenie styczne przy dnie 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} – składowe tensora lepkości turbulentnej.

Współczynnik lepkości turbulentnej liczony jest na podstawie równania Prandtla [5]. Równania przepływu rozwiązywane są numerycznie metodą objętości kontroli dla nieregularnej siatki dyskretyzacyjnej.

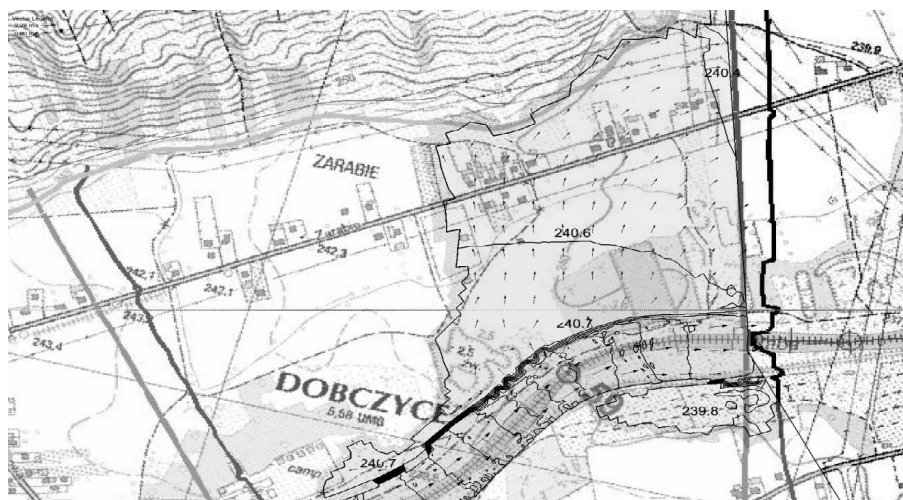
5. Wariantowe obliczenia pola przepływu w obszarach potencjalnego zalewu

Analizę wszystkich wariantów obliczeń przeprowadzono dla przepływu ustalonego 1400 m³/s, który odpowiada wartości przepływu prawdopodobnego $Q_{1\%}$ dla przekroju w 62 km. Przepływ ten skutkuje przelaniem się wody przez koronę wału na długości około 600 m w dolnym, lewobrzeżnym odcinku rzeki (rys. 2). Sytuacja ta była przedmiotem symulacji w pierwszym wariantie obliczeniowym. Pozostałe warianty obliczeń wynikają z przyjętych scenariuszy przerwania wałów.

We wszystkich wariantach obliczeniowych dolny warunek brzegowy ma postać formuły Manninga określonej na podstawie stałej wartości spadku tarcia równej 0,0014. Tak określony dolny warunek brzegowy może być adekwatny jedynie w sytuacji, kiedy efekty cofkowe na odcinku Raby od przekroju ujściowego do Wisły, aż do przekroju w 60 km nie powodują istotnego spiętrzenia wody w tym przekroju (przekrój zamykający). W przypadku krótkotrwałych zrzutów powodziowych ze zbiornika (około kilku godzin) podpiętrzenie w przekroju zamykającym na skutek wspomnianych efektów cofkowych nie ma istotnego znaczenia. Jednak w przypadku zrzutów długotrwałych (w tym wypadku, trwających kilkanaście godzin) należałoby modelować cały odcinek rzeki Raby od przekroju ujściowego, aż do przekroju w 60 km. W przypadku modelu dwuwymiarowego byłby to proces bardzo złożony i czasochłonny, stąd praktycznym rozwiązaniem byłoby wówczas zastosowanie modelu jednowymiarowego tylko w celu wyliczenia dolnego warunku brzegowego dla modelu dwuwymiarowego [6]. Temat ten jednak wykracza poza zakres niniejszego artykułu.

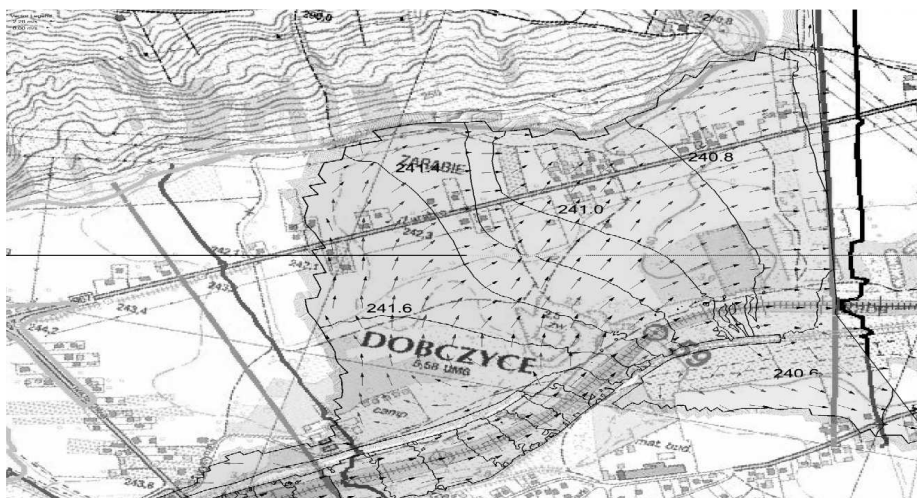
Drugi wariant obliczeń dotyczy hipotetycznego przerwania wałów na odcinkach, w których do przelania wody przez koronę wałów w pierwszym wariantie obliczeń (rys. 3). Przyjęto całkowite rozmycie dolnego odcinka wału lewobrzeżnego na długości

ok. 600 m oraz odcinka prawobrzeżnego na długości 100 m. Wariant trzeci dotyczy hipotetycznego scenariusza całkowitego przerwania fragmentu wału prawobrzeżnego na długości 40 m, którego oś leży w 60,75 km (rys. 4). Do celów porównawczych przeprowadzono również obliczenia strefy zalewu, w sytuacji całkowitego usunięcia obwałowań na analizowanym odcinku rzeki Raby (rys. 1).



Rys. 2. Strefa zalewu i rzędne zwierciadła (wariant 1)

Fig. 2. Flood zone with water head (variant 1)



Rys. 3. Strefa zalewu i rzędne zwierciadła (wariant 2)

Fig. 3. Flood zone with water head (variant 2)



Rys. 4. Strefa zalewu i rzędne zwierciadła (wariant 3)

Fig. 4. Flood zone with water head (variant 3)

4. Analiza wyników obliczeń

Strefy zalewu obliczone w pierwszym wariantcie (przelanie wody przez koronę wałów) przedstawia rys. 2. Występuje tutaj przepływ na obszarze zawala z wyraźną składową prędkości w kierunku poprzecznym do nurtu rzeki, spadek zwierciadła w tym kierunku wynosi 0,001. Odmienne wygląda pole przepływu w przypadku rozmycia dolnego fragmentu wałów (drugi wariant obliczeń). Wektory prędkości na zawalu, poniżej odcinka obwałowanego, układają się prawie równolegle do wektorów w nurcie rzeki na odcinku, gdzie doszło do rozmycia wałów (rys. 3). Istnieje tutaj jednak wyraźna strefa przepływu w kierunku przeciwnym do przepływu w nurcie, jest ona zlokalizowana powyżej lewobrzeżnej wyrwy w wale. Przepływ ten istotnie poszerza strefę zalewu (miejscami o ponad 400 m) w porównaniu z zasięgiem strefy obliczonej w wariantcie pierwszym (rys. 2). Warto zauważyć, iż rzędne zwierciadła w sąsiedztwie przekroju w 60 km (rys. 3) są nieco większe niż w przypadku referencyjnej strefy zalewu (rys. 1). Oznacza to, że częściowe uszkodzenie wałów może prowadzić lokalnie do większych głębokości podtopienia terenu w porównaniu z sytuacją, w której wałów w ogóle by nie było. Jeszcze dobitniej można to zaobserwować na podstawie obliczeń wykonanych w wariantcie trzecim. Rysunek 4 ilustruje strefę zalewu w przypadku przerwania prawobrzeżnego fragmentu wału, szerokość tej strefy w obszarze wyrwy sięga do 70 m w głąb prawobrzeżnej części miasta Dobczyce. Jest to dwukrotnie większy zasięg zalewu w porównaniu z tym, który zaistniałby, gdyby wałów w ogóle nie było (rys. 1). Głębokość w omawianej lokalnej strefie zalewu jest miejscami aż o 0,4 m większa w porównaniu z głębokością obliczoną dla referencyjnej strefy zalewu.

5. Wnioski

Wyznaczanie stref zagrożenia powodziowego ma kluczowe znaczenie w planowaniu zagospodarowania przestrzennego oraz przy podejmowaniu decyzji o warunkach zabudowy na obszarach dolinowych rzek. W przypadku obwałowanych odcinków rzek w sąsiedztwie gęstej zabudowy, istotne jest również rozpoznanie potencjalnego zagrożenia powodziowego, jakie wynikałoby z częściowego lub całkowitego uszkodzenia obwałowań, tzw. potencjalnych stref zalewu. Obliczenia hydrauliczne w takich przypadkach na ogół nie są proste z uwagi na brak informacji o miejscu potencjalnej awarii wałów, jak również z powodu skomplikowanego pola przepływu na obszarze zawala. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie modelu przepływu dwuwymiarowego do wielowariantowej symulacji hydraulicznych skutków potencjalnej awarii wałów. Jak wykazano w niniejszym artykule, istnieją przypadki, w których lokalne zagrożenie powodziowe na skutek przerwania fragmentu wału jest większe niż w przypadku, gdyby tych wałów w ogóle nie było. Choć fakt ten ma znaczenie lokalne, to powinien być szczególnie brany pod uwagę w ocenie zagrożenia powodziowego w obszarach gęstej zabudowy mieszkalnej lub gospodarczej.

Literatura

- [1] Caleffi V., Valiani A., Zani A., *Finite volume method for simulating extreme flood events in natural channels*, Journal of Hydraulic Research, Vol. 41, No. 2, 2003, 167-177.
- [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] Nujic M., *Hendbuch*, Rosenheim 2001.
- [5] Liang Q., Borthwick A.G.L., Stelling G., *Simulation of dam- and dyke-break hydrodynamics on dynamically adoptive quadtree grids*, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 46, 2004.
- [6] Nachlik E., Kostecki S., Gądek W., Stochmal R., *Strefy Zagrożenia Powodziowego*, Biuro Koordynacji Banku Światowego we Wrocławiu, Wrocław 2000.
- [7] Twaróg B., *Ocena zagrożenia w wyniku przerwania wału przeciwpowodziowego*, Gospodarka Wodna, nr 12, Wyd. NOT Sigma, Warszawa 2004.