MICHAŁ SZYDŁOWSKI

MODELOWANIE FAL POWODZIOWYCH NA TERENACH ZABUDOWANYCH

POLITECHNIKA GDAŃSKA

monografie
86

POLITECHNIKA GDAŃSKA

MICHAŁ SZYDŁOWSKI

MODELOWANIE FAL POWODZIOWYCH NA TERENACH ZABUDOWANYCH

GDAŃSK 2007

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ
Romuald Szymkiewicz

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH
Janusz T. Cieśliński

REDAKTOR SERII
Jerzy M. Sawicki

RECENZENCI
Kazimierz Burzyński
Janusz Kubrak

PROJEKT OKŁADKI
Jolanta Cieślawska

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
http://www.pg.edu.pl/wydawnictwo/katalog
zamówienia prosimy kierować na adres wydaw@pg.gda.pl

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej
Gdańsk 2007

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiejkolwiek formie
i w jakikolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

ISBN 978–83–7348–200–5

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń 5

1. WPROWADZENIE 7

2. CEL, ZAKRES I STRUKTURA PRACY 8

3. CHARAKTERYSTYKA POWODZI MIEJSKICH 11
   3.1. Miasta a woda 12
   3.2. Przepływ wód opadowych w mieście 14
   3.3. Skutki powodzi 14

4. STAN WIEDZY O MATEMATYCZNYM MODELOWANIU PRZEPŁYWÓW POWODZIOWYCH 17
   4.1. Modelowanie propagacji fali wezbraniowej w ciekach i naturalnych dolinach rzek 17
      4.1.1. Modele matematyczne 18
      4.1.2. Metody rozwiązywania równań przepływu wody płytkiej 21
   4.2. Modelowanie przepływu wód przez obszary zabudowane 23

5. MODEL PRZEPŁYWU WODY PO TERENIE ZABUDOWANYM 26
   5.1. Równania dwuwymiarowego przepływu wody płytkiej 26
   5.2. Numeryczne rozwiązanie równań przepływu wody płytkiej 28
      5.2.1. Dyskretyzacja równań w przestrzeni metodą objętości skończonych 28
      5.2.2. Całkowanie równań w czasie 33
      5.2.3. Uwzględnienie warunków granicznych 34

6. LABORATORYJNE I NUMERYCZNE BADANIA PRZEPŁYWU WODY NA TERENIE ZABUDOWANYM 37
   6.1. Badania przepływu wody na terenie zabudowanym w laboratorium hydraulicznym ENEL-CESI 37
   6.2. Badania przepływu wody na terenie zabudowanym w laboratorium hydraulicznym Politechniki Gdańskiej 42
      6.2.1. Opis stanowiska pomiarowego i metodyki pomiarów 42
      6.2.2. Przebieg eksperymentu 47
      6.2.3. Analiza błędów i niepewności pomiarów 47
      6.2.4. Zakres badań 50
      6.2.5. Eksperyment E01 – przepływ przez obszar bez zabudowy 52
   6.3. Porównanie wyników obliczeń numerycznych z pomiarami 54
      6.3.1. Eksperyment E02 – opływ pojedynczego budynku ustawionego prostopadle do osi wyrwy w wale 57
      6.3.2. Eksperyment E03 – opływ pojedynczego budynku ustawionego ukośnie do osi wyrwy w wale 65
      6.3.3. Eksperyment E04 – przepływ przez obszar z budynkami w układzie szeregowym 74
      6.3.4. Eksperyment E05 – przepływ przez obszar z budynkami w układzie w szachownicę 82
      6.3.5. Eksperyment E06 – przepływ przez obszar z budynkami ustawionymi ukośnie do osi wyrwy w wale (wersja 1) 90
      6.3.6. Eksperyment E07 – przepływ przez obszar z budynkami ustawionymi ukośnie do osi wyrwy w wale (wersja 2) 98
      6.3.7. Eksperymenty E08 i E09 – przepływ przez jednostronnie rozszerzony obszar zalewu 106
   6.4. Wpływ sposobu reprezentacji obszaru zabudowanego na wyniki obliczeń 116

7. NUMERYCZNA SYMULACJA POWODZI NA ZABUDOWANYM TERENIE ZALEWOWYM OBWAŁOWANEJ RZEKI 123
7.1. Zalew fikcyjnego terenu zabudowanego 123
7.2. Zalew rzeczywistego terenu zabudowanego – Saska Kępa w dolinie Wisły w Warszawie 129

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI 137

Bibliografia 140
Streszczenie w jęz. polskim 148
Streszczenie w jęz. angielskim 149

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

A – jakobian wektora **F**
Cr – liczba Couranta
c – prędkość rozprzestrzeniania się małych zaburzeń
E, **G** – wektory strumieni zmiennych zachowawczych w kierunku x i y
F – wektor strumieni zmiennych zachowawczych
Fr – liczba Froude'a
g – przyspieszenie ziemskie
h – głębokość wody
I – macierz jednostkowa
n – współczynnik szorstkości Manninga
n – wektor jednostkowy, normalny do powierzchni
n_x, n_y – składowe wektora **n**
q_x, q_y – jednostkowe natężenie przepływu odpowiednio w kierunku x i y
r – prawy wektor własny macierzy **A**
R – niezmiennik Riemanna
S – wektor członów źródłowych
S_{fx}, S_{fy} – spadek hydrauliczny odpowiednio w kierunku x i y
S_{ox}, S_{oy} – spadek dna odpowiednio w kierunku x i y
t – czas
U – wektor zmiennych zachowawczych
u – wektor prędkości przepływu
u, v – poziome składowe wektora **u**
x, y – poziome współrzędne układu kartezjańskiego
λ – wartość własna macierzy **A**
Θ – współczynnik wagowy

Rozdział 1

WPROWADZENIE

W pracy przedstawiono podsumowanie wyników badań prowadzonych przez autora w Politechnice Gdańskiej w latach 2004–2006, dotyczących matematycznego modelowania powierzchniowego przepływu wody na terenach zabudowanych, powstałego wskutek przerwania obwałowania przeciwpowodziowego, czy uszkodzenia budowli piętrzącej. Stanowi ona uzupełnienie i rozszerzenie wcześniejszych badań na temat modelowania propagacji fal powodziowych w naturalnych dolinach rzek, wywoływanych awariami zapór zbiornikowych (Szydłowski, 2003).

Problem matematycznego modelowania powierzchniowego przepływu wody na terenach o intensywnej zabudowie był jednym z podstawowych elementów wykonanego pod kierownictwem autora w latach 2005–2006 projektu badawczego nr 2 P06S 034 29, finansowanego przez ówczesne Ministerstwo Nauki i Informatyzacji pt. „Fizyczne i matematyczne modelowanie gwałtownych zalewów na obszarach o zróżnicowanym zagospodarowaniu terenu dla potrzeb prognozowania skutków powodzi i wyznaczania lokalnych stref zagrożenia powodziowego".

Powodzie w obszarach miejskich mają różne przyczyny. Mogą być one bądź następstwem zjawisk naturalnych, takich jak wystąpienia rzek z koryt i ulewne deszcze, bądź też skutkiem uszkodzeń budowli hydrotechnicznych, takich jak zapory zbiornikowe lub wały przeciwpowodziowe. Również sam przebieg powodzi w mieście może być różny: powolny – związany z długotrwałym zatopieniem terenów zalanych, lub gwałtowny i krótkotrwały – wynikający z nagłego pojawienia się i przejścia fali wezbraniowej. W pracy przedstawiono wyniki badań nad drugim z wymienionych typów powodzi, której skutki zależą głównie od hydrodynamiki przepływu, a nie od czasu zatopienia zalanych terenów. Skupiono się na analizie wpływu elementów zabudowy miejskiej, takich jak domy i zespoły budynków, na warunki przepływu wody. Szczególną uwagę zwrócono na problem właściwego wyboru i poprawnego rozwiązania matematycznego modelu rozpatrywanego zjawiska fizycznego oraz na ocenę jakości wyników obliczeń.

W hydrologii, najczęściej stosowanym matematycznym modelem przepływu wody w naturalnych ciekach i zbiornikach są jedno- bądź dwuwymiarowe równania de Saint-Venanta. U podstaw wyprowadzenia wspomnianych równań leży założenie o wolnozmienności ruchu wody. W przypadku powodzi na terenach zabudowanych, wywołanych nagłymi przyczynami, takimi jak przerwania wałów powodziowych, można spodziewać się, że przepływ wody będzie miał charakter szybkozmienny. Jednocześnie, w przypadku gdy obszar przepływu jest zabudowany, mogą w nim występować zjawiska lokalne, jak choćby odskoki hydrauliczne, znaczne spiętrzenia i depresje zwierciadła czy strefy cyrkulacji prędkości. Z formalnego punktu widzenia, w takich warunkach ruchu, równania de Saint-Venanta nie są adekwatnym modelem zjawiska przepływu wody ze swobodnym zwierciadłem. Prowadząc badania opisane w niniejszej pracy, szukano odpowiedzi na pytanie, czy w praktyce dwuwymiarowy, płaski model fali dynamicznej nadaje się do numerycznych symulacji powodzi na terenie zurbanizowanym, wywołanych awariami wałów przeciwpowodziowych, oraz jakie są ograniczenia jego stosowalności.