

PRACE ORYGINALNE

Mariusz BARSZCZ

Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW w Warszawie
Department of Hydraulic Engineering and Environmental Restoration WULS – SGGW

Prognoza maksymalnych przepływów prawdopodobnych wywołanych ulewami w zurbanizowanej zlewni Potoku Służewieckiego

Forecast of probably flows caused by heavy rainfall on urbanized drainage basin of Służew Stream

Słowa kluczowe: mała zurbanizowana zlewnia, model SWMM, intensywne deszcze, przepływy wezbraniowe

Key words: small urbanized drainage basin, SWMM model, heavy rainfall, freshet flows

Wprowadzenie

Postępująca urbanizacja zlewni miejskich, przejawiająca się zwiększeniem udziału powierzchni szczelnych i skanalizowanych, przyczynia się do nasilenia intensywności odpływu wywołanego deszczami. Ze względu na ograniczoną przepustowość sieci kanalizacyjnej i kanałów otwartych dochodzi na obszarze zlewni do podtopień i związanych z tym utrudnień w komunikacji, strat materialnych i środowiskowych. W skrajnym przypadku skutkiem pojawienia się deszczy o małym prawdopodobieństwie wystąpienia może mieć miejsce powódź, zagrażająca życiu ludzi.

Wobec występowania przytoczonych konsekwencji podtopień pojawiających się po intensywnych deszczach, także w badanej zlewni, stajemy przed koniecznością zmniejszenia ryzyka ich występowania. Pierwszym krokiem w tych działaniach jest ocena tego ryzyka, a następnie wprowadzenie w zlewni odpowiednich działań ograniczających szybki spływ wód deszczowych, w głównej mierze przez urządzenia techniczne ze względu na zurbanizowany charakter zlewni.

Podstawą zarówno do oceny zagrożenia powodziowego, jak i do projektowania budowli/urządzeń regulujących odpływ wód deszczowych są przepływy o zadanym prawdopodobieństwie przekroczenia. Określenie przepływów prawdopodobnych z wystarczająco dużą dokładnością jest jednak trudne w przypadku zlewni miejskiej ze względu na dużą zmienność obszarową odpływu, wynikającą z mozaikowości użytkowa-

nia zlewni cząstkowych charakteryzujących się odmiennym współczynnikiem spływu, ponadto z występowania licznych budowli i urządzeń opóźniających odpływ (np. przepusty, zbiorniki) oraz sieci kanalizacyjnej, która przyspiesza odpływ wód deszczowych i ścieków do odbiorników.

W niniejszym artykule podjęto próbę wykorzystania modelu SWMM systemu hydrologicznego i hydraulicznego na przykładzie zurbanizowanej zlewni Potoku Służewieckiego do prognozy przepływów o określonym prawdopodobieństwie przekroczenia na podstawie symulacji.

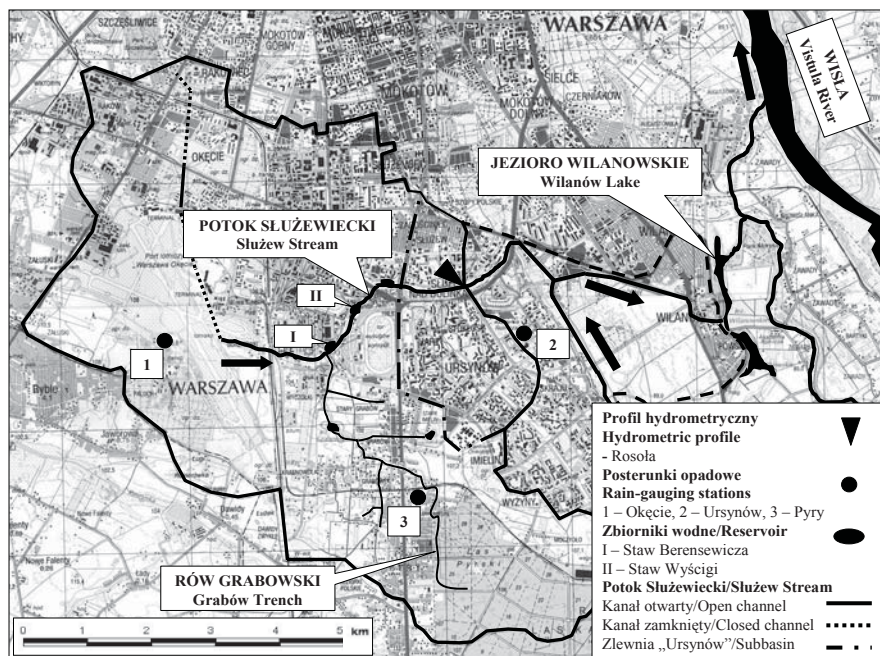
Praca ta została sfinansowana ze środków przeznaczonych na naukę w latach 2006–2009 jako projekt badawczy.

Opis zlewni badawczej

Obiektem symulacji była zlewnia Potoku Służewieckiego ograniczona profilem pomiarowym Rosoła (nazwa pochodzi od pobliskiej ulicy o dawnej nazwie Jana Rosoła). Analizowany profil Rosoła zamyka zlewnię (topograficzną z włączeniem obszarów odwadnianych siecią kanalizacyjną) o powierzchni 39,6 km², na 4+870 km Potoku Służewieckiego (rys. 1). Całkowita długość kanału głównego wynosi 14,9 km. Do początku lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku Potok Służewiecki posiadał cechy cieku naturalnego. Wraz z rozwojem urbanizacji stał się kanałem (częściowo krytym – głównie w górnej części zlewni), przyjmującym spływy powierzchniowe ścieków deszczowych i zrzuty z kanalizacji deszczowej.

W rozpatrywanym profilu hydrologicznym Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW zainstalowała łąkę wodowskazową oraz elektroniczne urządzenie do rejestracji stanów wody (typu Diver). Pomiaru przepływu w tym profilu posłużyły do konstrukcji krzywej natężenia przepływu, która jest na bieżąco weryfikowana. Do analizy pola opadów w zlewni wykorzystano pomiary elektronicznych deszczomierzy korytkowych. Dwa posterunki opadowe („Ursynów” we wschodniej części zlewni – na obszarze SGGW, oraz „Pyry” na skrzyżowaniu ulic Puławskiej z Kajakową – w południowej części zlewni) powstały w ramach projektu badawczego COST/210/2006. Deszczomierz „Okęcie” położony w zachodniej części zlewni, na obszarze Portów Lotniczych Okęcie, należy do sieci pomiarowej IMGW.

Rozpatrywana zlewnia zurbanizowana charakteryzuje się 21-procentowym udziałem powierzchni nieprzepuszczalnych i skanalizowaniem wynoszącym w przybliżeniu 60% (Banasik i in. 2007). Sprzyja to występowaniu częstych i gwałtownych wezbrań wylewających się z koryta i podtapiających przyległe tereny. Gwałtowny spływ deszczy powoduje także przepelnianie się sieci kanalizacyjnej i podtapianie nawet odległych od koryta obszarów zlewni. Szczególnie duży wpływ na kształtowanie się gwałtownych przyborów wody w profilu Rosoła ma zlewnia cząstkowa obejmująca dzielnicę Ursynów, z której wody deszczowe odprowadzane są kolektorem burzowym w niewielkiej odległości powyżej profilu zamykającego. Tak duży wpływ tej małej zlewni cząstkowej, której powierzchnia wynosi zaledwie 4,51 km², wynika z 40-procentowego



RYSUNEK 1. Zlewnia Potoku Służewieckiego po profil Rosoła i ujście do Jeziora Wilanowskiego
 FIGURE 1. The basin of Służew Stream up to the Rosoła measuring profile and to the Wilanów Lake

pokrycia obszarami nieprzepuszczalnymi i pełnego (100%) skanalizowania. Szerszy opis zlewni badawczej zawiera Operat hydrologiczny... (2002).

Charakterystyka modelu SWMM

Model komputerowy SWMM (Storm Water Management Model) w wersji 5.0, opracowany przez Agencję Ochrony Środowiska Stanów Zjednoczonych (U.S. Environmental Protection Agency – EPA) przy współpracy z firmą inżynierską Camp Dresser & McKee Inc., został wykorzystany do modelowania transformacji opadu w odpływ. SWMM to model dynamiczny (modelujący procesy zachodzące w systemie zlewni w funkcji czasu) przeznaczony do symulacji odpływu wód (także zanieczysz-

czeń) w reakcji na pojedyncze lub ciągle (długoterminowe) zdarzenia opadowe zasadniczo w zlewniach zurbanizowanych.

W strukturze omawianego modelu matematycznego można wyodrębnić 2 bloki (procedury), określone przez autora artykułu jako „Odpływ” i „Transport” (w tłumaczeniu oryginału z jęz. ang.), realizujące procedury obliczeniowe procesów zachodzących w hydrologicznym i hydraulicznym systemie zlewni. Procedura „Odpływ” bazuje na zbiorze zlewni cząstkowych z określonymi atrybutami (stanowiących homogeniczne obszary wydzielone w zlewni dla uwzględnienia przestrzennej zmienności modelowanych procesów hydrologicznych), które transformują spadający na ich powierzchnię opad w odpływ. Druga część modelu – „Transport”, realizuje

procedurę obliczeniową transportu odpływu do profilu zamykającego i jego transformacji przez przewody sieci kanalizacyjnej, koryta naturalne i sztuczne (kanały), zbiorniki otwarte i zamknięte, przepusty oraz pompy i regulatory przepływu (urządzenia i budowle służące do regulowania i zmiany kierunku przepływu, takie jak: zastawki, upusty, przelewy czołowe i boczne, zwężki, zawory, kłapy zwrotne).

Przedstawiona ogólna struktura modelu (podział na bloki „Odpływ” i „Transport”) składa się z szeregu modeli (submodeli) komponentów systemu zlewni, opisujących poprzez funkcje matematyczne zespół procesów zachodzących w poszczególnych środowiskach (naturalnych i sztucznych) występowania wody w zlewni. Możemy wyróżnić w modelu następujące submodele komponentów zlewni:

- submodel atmosferyczny, wykorzystujący obiekt „Posterunek opadowy” do reprezentowania opadu (wysokości opadu w przyjętych przedziałach czasowych) zasilającego obszar zlewni,
- submodel powierzchni zlewni, składający się z jednej lub wielu wyodrębnionych zlewni cząstkowych, opisujący transformujące opad (pochodzący z submodelu atmosferycznego) w odpływ działanie zlewni,
- submodel strefy gruntu (aeracji i saturacji), którego wejściem jest zasilanie wodami infiltrującymi z powierzchni zlewni, a wyjściem odpływ podpowierzchniowy i gruntowy,
- submodel (blok) transportu, opisujący proces transportu i transformacji odpływu (powierzchniowego, podpowierzchniowego i gruntowego)

w systemie hydrologicznym i hydraulicznym zlewni.

Przedmiotem modelowania matematycznego w wymienionych submodelach w reakcji na zadaną wysokość opadu są wywołane nim procesy hydrologiczne (fazy obiegu wody):

- odpływ powierzchniowy, podpowierzchniowy i gruntowy,
- infiltracja opadu do strefy aeracji i saturacji,
- retencja opadu w zagłębieniach terenowych i zwilżenie powierzchni terenu,
- parowanie ze stojących wód powierzchniowych (zbiorników).

Przebieg procesu transformacji opadu w odpływ w modelu SWMM jest opisany równaniami fizyki matematycznej zachowania masy, energii i pędu (użytkownik modelu ma do wyboru procedurę „przepływu ustalonego”, „fali kinematycznej” lub „fali dynamicznej”). Oznacza to, że parametry modelu są fizycznie mierzalnymi charakterystykami zlewni i aktualnych warunków hydrometeorologicznych. Ponadto funkcje operatora systemu mają charakterystykę nieliniową (funkcje transformujące modelu nie spełniają zasady superpozycji). Oznacza to, że model reaguje nieliniowo na zmienne wejścia, co ogólnie przyjmuje się za zgodne z przebiegiem procesu opad – odpływ w rzeczywistej zlewni.

Do opisu procesu opad – odpływ w zlewni zurbanizowanej stosowanych jest wiele różnorodnych modeli matematycznych, różniących się strukturą i przedmiotem modelowania (modele pojedynczych procesów, komponentów, integralne i globalne), czynnikiem czasu (modele statyczne lub dynamiczne), wartości poznawczych modelu, jedno-

znaczności uzyskiwanych wyników, stosowanego podejścia i metod rozwiązania (modele „białej skrzynki”, „czarnej skrzynki” i inne) oraz własnością funkcji operatora (modele liniowe, nieliniowe i inne). Obszerną charakterystykę metod i modeli stosowanych do wyznaczania odpływu w zlewniach miejskich przedstawiła w swoim artykule Gutry-Korycka (2007). Wśród nich opisane są: rozpoczynając od najprostszych – formuła racjonalna zaproponowana przez Mulvaney’a w 1851 roku, a z bardziej złożonych – jednowymiarowy model hydrodynamiczny. Poza tym w artykule można znaleźć opis modeli: hydrogramu jednostkowego, chwilowego hydrogramu jednostkowego (IUH) według Lutza, modelu Nasha – kaskady zbiorników liniowych oraz modelu SCS opadu efektywnego (według nazewnictwa w przytoczonym artykule). Przykłady praktycznego zastosowania metod/modeli do symulacji w zlewniach miejskich można znaleźć w publikacjach Oksiuty (2007) – na podstawie metody izochron, oraz Bielawskiego (1994), który wykorzystał do analiz model Nasha.

Prezentowany w artykule model SWMM ma strukturę i procedurę obliczeniową zbliżoną do wymienionego jednowymiarowego modelu dynamicznego, oba dzielą się na dwa połączone modele zlewni (bloki), tj. hydrologiczny oraz hydrauliczny, oraz wykorzystują do obliczeń transformacji opadu w odpływ równania fizyczno-matematyczne. Model SWMM odznacza się jednak dokładniejszym opisem systemu zlewni i zachodzących w nim procesów, posiada większą liczbę parametrów (fizycznie mierzalnych – omówione w kolejnym rozdziale), szczegółowo opisujących

obiekty systemu zlewni kształtujące proces opad – odpływ. W przeciwieństwie do pozostałych wymienionych metod/modeli SWMM jest złożonym modelem dynamicznym o znanej strukturze wewnętrznej (model „białej skrzynki”), oparametrach przestrzennie rozłożonych, ponadto jest modelem nieliniowym, opisującym szereg procesów hydrologicznych i hydraulicznych, rozpatrując je w poszczególnych środowiskach (submodele komponentów zlewni). Stanowi więc cenne narzędzie badawcze, projektowe lub praktyczne w zarządzaniu odpływem w zlewni, bowiem wprowadzając do modelu warianty zmiennych wejścia (np. opadów), parametrów zlewni (np. wynikających ze zmiany użytkowania zlewni cząstkowych) i nowe obiekty (np. zbiornik retencyjny), można poznać zachodzące między nimi relacje, wpływ poszczególnych czynników i genezę formowania się zjawisk.

Model zlewni badawczej

Adaptacja modelu komputerowego SWMM, wykorzystanego do modelowania transformacji opadu w odpływ w zlewni badawczej Potoku Służewieckiego, polegała na utworzeniu w oknie modelu (programu) obiektów, które reprezentują fizyczne składniki realnego (rzeczywistego) systemu hydrologicznego i hydraulicznego zlewni, a następnie na określeniu zależności między nimi oraz wartości ich parametrów (atrybutów). Do oszacowania i identyfikacji parametrów obiektów modelu wykorzystano pomierzone w terenie i zidentyfikowane na podstawie dostępnych materiałów (projektów, opracowań) charakterystyki

realnych obiektów oraz wartości parametrów zalecane w tabelach podręcznika modelu (Rossman 2005) lub podawane w literaturze (Peterson i Wicks 2006, Park i in. 2008). Poniżej przedstawiono obiekty i ich parametry, które uwzględniono w modelu badanej zlewni.

Sumy opadów rzeczywistych wykorzystanych do kalibracji i weryfikacji modelu (opisanej w dalszej części pracy) oraz w obliczeniach służących do prognozy maksymalnych przepływów prawdopodobnych określono we właściwościach obiektu nazwanego w modelu „Posterunkiem opadowym”, w przyjętych 10-minutowych przedziałach czasowych. Uwzględniono w systemie zlewni 3 posterunki (funkcjonujące we wschodniej, zachodniej i południowej części zlewni), opisane dokładniej w rozdziale „Opis zlewni badawczej”.

Obszarową zmienność spływu powierzchniowego uwzględniono przez podział zlewni na 2076 homogeniczne zlewnie cząstkowe. Głównym kryterium podziału był charakter użytkowania i związany z nim procent nieprzepuszczalności. Podział na zlewnie cząstkowe ilustruje rysunek 2, odpowiadający schematowi przyjętemu w modelu SWMM. Parametrami opisującymi proces spływu powierzchniowego z poszczególnych zlewni cząstkowych, które zostały zdefiniowane w modelu, są:

- powierzchnia zlewni, obliczana w modelu automatycznie w wyniku georeferencji mapy rastrowej badanego obszaru, tj. mapy topograficznej (2004) w skali 1 : 10 000,
- szerokość warstwy odpływu powierzchniowego, ustalana w procesie kalibracji,
- spadek powierzchni zlewni, obliczany w każdej zlewni cząstkowej z numerycznego modelu terenu (DTM – Digital Terrain Model) utworzonego w programie ArcView GIS,
- procentowy udział powierzchni nieprzepuszczalnych, określany zgodnie z rodzajem użytkowania, który identyfikowano z mapy topograficznej i zdjęć lotniczych (stan z 2005 r.) w każdej z wydzielonych zlewni homogenicznych; wykorzystano także zalecenia przyjęte przez ATV (1990, 1997) i Rossmanna (2005), które zweryfikowano na podstawie pomiarów rzeczywistych; wzorując się na specyfikacji parametrów podanych przez Rossmanna (2005) w odniesieniu do metody CN-NRCS, wyróżniono następujące typy użytkowania, którym przyporządkowano procentowy udział powierzchni nieprzepuszczalnych: nieużytki, łąki, grunty orne, lasy, sady, tereny otwarte (parki, cmentarze, trawniki z alejkami, place zabaw), tereny handlowe i przemysłowe, parkingi, jezdnie, grunty utwardzone oraz obszary zabudowy; w przypadku obszarów zamieszkałych wydzielono 5 kategorii nieprzepuszczalności, odpowiadające różnym typom budownictwa (< 20, 20–25, 25–30, 30–38 oraz 38–65%),
- współczynnik szorstkości terenu powierzchni przepuszczalnych i utwardzonych przyjmowany według danych z literatury,
- miąższość warstwy wody możliwej do zatrzymania w depresjach terenowych (detencja) i zwilżenia ich powierzchni przyjmowana wstępnie z literatury w odniesieniu do każde-

- go rodzaju użytkowania, a następnie kalibrowana za pomocą pomiarów relacji opad – odpływ,
- udział (procentowy) obszarów w nieprzepuszczalnej części powierzchni danej zlewni cząstkowej, w których wody deszczowe nie mogą być zatrzymane w obniżeniach terenowych (obszar nieprzepuszczalny bez retencji depresyjnej),
 - wartości parametru CN (Curve Number), określane w przyjętej metodzie CN-NRCS (SCS) do obliczania warstwy odpływu (Natural Resources Conservation Service – Służba Ochrony Zasobów Naturalnych) w odniesieniu do wyróżnionych typów użytkowania i rodzajów gleb określonych na podstawie map opracowanych przez Instytut Geologiczny (Szczegółowa mapa... 1978) oraz dla założonych przeciętnych warunków wilgotnościowych zlewni; poza metodą CN-NRCS obliczania warstwy odpływu (warstwy opadu efektywnego wynikającego z różnicy między opadem całkowitym i stratami – głównie na infiltrację), opisaną przez SCS (1972), Ciepielowskiego i Dąbkowskiego (2006), użytkownik modelu ma do wyboru dwa inne modele infiltracji, tj. Green-Ampt i Hortona.
- Odpływ wód deszczowych ze zlewni poprzez sieć kanałów otwartych (w tym koryto potoku głównego) i zamkniętych (sieci kanalizacyjnej) modelowano za pomocą wydzielenia 613 odcinków kanałów i 599 węzłów połączeniowych (umieszczonych w miejscu określającym zmianę charakterystyki kanałów), definiując ich parametry geometryczne, takie jak:
- kształty (zidentyfikowano przekroje kołowe i gruszkowe) oraz wymiary kanałów zamkniętych,
 - przekroje poprzeczne kanałów otwartych, określono 12 pomierzonych przekrojów rozłożonych na długości 4130 m kanału głównego, tj. od profilu pomiarowego zamykającego w górę system drenażu do oczyszczalni ścieków na obszarze lotniska Okęcie (9+000 km), powyżej której kanał przekształca się z charakteru otwartego w zamknięty,
 - długości kanałów obliczane w modelu automatycznie,
 - współczynniki szorstkości Manninga kanałów zamkniętych i otwartych, w przypadku kanałów otwartych zróżnicowano wartości współczynnika dla koryta głównego i terenów zalewowych,
 - przepływ początkowy w kanałach otwartych, przyjęto stałą wartość $0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
 - współczynniki strat na wejściu i wyjściu, określone dla wydzielonych (między węzłami) odcinków kanałów zamkniętych,
 - charakterystyki węzłów połączeniowych sieci kanalizacyjnej, w realnej zlewni węzły są studzienkami rewizyjnymi lub połączeniowymi, zlokalizowanymi w miejscach zmiany kierunku przepływu wody, spadków lub zmiany średnicy kanałów zamkniętych; w przypadku charakteryzowania węzłów określano rzędne i głębokości położenia dna studzienek oraz szacowano zasięg wylewów wód deszczowych ze studzienek w przypadku wystąpienia odpływu przekraczającego przepustowość sieci kanalizacyjnej.

Kolejne elementy systemu hydrologicznego badanej zlewni, które zostały uwzględnione w modelu, to podziemne zbiorniki retencyjne. Ich budowę, przeprowadzoną na zlecenie Portów Lotniczych Okęcie, ukończono w czerwcu 2005 roku, a więc przed rozpoczęciem pomiarów natężenia przepływu wykorzystanych do kalibracji i weryfikacji modelu. Wybudowanie 5 zbiorników o łącznej pojemności 42 490 m³ (ich położenie ilustruje rys. 2) ma obecnie zasadniczy wpływ na kształtowanie odpływu z górnej części zlewni, tj. powyżej

wylotu Potoku Służewieckiego, stanowiącej w przybliżeniu 33% powierzchni rozpatrywanej zlewni.

Zbiornik oznaczony skrótem ZR1, o pojemności czynnej wynoszącej około 8000 m³, położony jest w górnej części obszaru lotniska i ma za zadanie przechwytywać wody deszczowe dopływające z wyżej położonych obszarów zabudowanych. Zbiorniki ZR2 i ZR3, o pojemności 11 130 i 15 620 m³, znajdują się w dolnej części lotniska, tuż przy kanale zamkniętym Potoku Służewieckiego. Cztery zbiorniki – ZR4, jest



RYSUNEK 2. Zlewnia Potoku Służewieckiego w modelu SWMM z podziałem na zlewnie homogeniczne

FIGURE 2. The Służew Stream basin in the SWMM model with the division into homogeneous basins

zlokalizowany poniżej CARGO (towarowej obsługi lotniskowej), a jego pojemność wynosi 1900 m^3 . Zbiornik ZR5 (najniżej położony w układzie drenażu) jest włączony w system technologiczny oczyszczania ścieków odpływających z lotniska, jego pojemność wynosi 5840 m^3 , łącznie z uwzględnieniem osadnika deszczowego. Maksymalny dopływ do tego zbiornika ($5,31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) został oszacowany według czasu oczyszczania ścieków deszczowych w oczyszczalni z uwzględnieniem pojemności zbiornika oraz na podstawie maksymalnego dopuszczalnego odpływu do Potoku Służewieckiego, który według pozwolenia wodno-prawnego wynosi $1,53 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Jeśli dopływ jest większy od wartości krytycznej $5,31 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, wówczas wody deszczowe są kierowane poprzez kanał ulgi do głównego cieku, z pominięciem zbiornika ZR5.

Poza wymienionymi zbiornikami krytymi w modelu uwzględniono następujące istniejące zbiorniki powierzchniowe (starorzeczka, stawy, jeziora):

- Jezioro Grabowskie i Jezioro Imielińskie, przez które następuje przepływ Kanałem Grabowskiego (odpływ wód z jego zlewni), prawego dopływu Potoku Służewieckiego,
- Staw Berensewicza, zlokalizowany powyżej ujścia Kanału Grabowskiego do Potoku (w 8+000 km), którego zadaniem jest retencjonowanie wód deszczowych; objętość planowanej w projekcie rezerwy powodziowej zbiornika (maksymalnie $10\,180 \text{ m}^3$, jak podają Gradowski i Banasik 2007), zależy od jego napełniania następującego przez przelew boczny,

jednak dopiero wówczas, gdy przepływ Potoku Służewieckiego przekroczy wartość krytyczną $5,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,

- Staw Wyścigi, znajdujący się na 6+590 km biegu kanału głównego, o określonej pojemności przeciwpowodziowej, odpływ poniżej stawu jest ograniczony przepustem o wydatku $2,63 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Poza wymienionymi urządzeniami sterującymi falą wezbraniową uwzględniono w modelu opad – odpływ przepusty, ograniczające swobodny odpływ wód deszczowych. W zlewni Kanału Grabowskiego (zamykającej powierzchnię $12,5 \text{ km}^2$, charakteryzującej się niewielkim stopniem zurbanizowania) uwzględniono 29 małych przepustów drogowych. Ich specyfikę określono za pomocą właściwości obiektu, według numeru kodu odpowiadającego danemu typowi konstrukcji przepustu. Natomiast w Potoku Służewieckim uwzględniono przepust pod ulicą Kłobucką długości 19,6 m (od 8+547 km do 8+528 km), położony około 450 m poniżej wylotu z obszaru lotniska Okęcie, oraz przepust pod ulicą Łączyny długości 177 m (od 7+806 km do 7+629 km), zlokalizowany poniżej ujścia Kanału Grabowskiego. Wydatek przepływu pierwszego z nich wynosi w przybliżeniu $3,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i jest znacznie mniejszy od przepustowości głównego koryta w przekroju górnym, który przy głębokości wody brzegowej wynosi około $32,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Wymienione wartości przepływu przyjęto za Bajkowskim (2008). Przepływ przez przepust pod ulicą Łączyny jest limitowany do maksymalnej wartości około $3,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Weryfikacja modelu opad – odpływ

Kolejnym etapem adaptacji modelu SWMM dla zurbanizowanej zlewni Potoku Służewieckiego była jego kalibracja i weryfikacja. W procesie kalibracji, opisanej szczegółowo we wcześniejszej publikacji (Barszcz 2009), prowadzono symulację wezbrań wywołanych ulewami w profilu zamykającym, hydrogramy zaś rzeczywiste i symulowane były porównywane, zwłaszcza ich przepływy maksymalne, objętości fali wezbraniowej oraz czas opóźnienia (LAG) odpływu (mierzony pomiędzy środkami ciężkości hietogramu opadu efektywnego i hydrogramu). Różnicę między pomierzonym i symulowanym wezbraniem określono jako błąd względny. W przypadku przepływów błędy względne zawierały się w granicach od $-0,36$ do $-3,34\%$, a dla objętości wezbrań od $-0,1$ do $-25,2\%$, natomiast dla czasu opóźnienia (LAG time) błędy wynosiły od $-10,1$ do $29,9\%$. Uzyskane w kalibracji modelu wartości błędów uznano za zadowalające i przystąpiono do weryfikacji modelu.

Weryfikację modelu przeprowadzono na podstawie 12 wybranych ulew, zarejestrowanych w latach 2007–2008, które wywołały najwyższe przepływy w profilu zamykającym. W tabeli 1 zestawiono wysokości opadów deszczu pomierzone w trzech posterunkach oraz wywołane nimi przepływy maksymalne i objętości odpływu (obliczone dla 12 godzin czasu ich trwania). Oceny zgodności wartości pomierzonych i symulowanych wezbrań dokonano za pomocą błędu względnego.

Spośród 12 ulew wywołujących wezbrania 7 zarejestrowały trzy poste-

runki opadowe, natomiast pozostałe 5 zdarzeń, ze względu na awarie elektronicznego deszczomierza na posterunku „Pyry”, zarejestrowały dwa posterunki. Pomierzone sumy wysokości deszczy przez posterunek „Okęcie” wynosiły od 1,0 do 24,2 mm (wartość średnia 7,6 mm), natomiast na posterunkach „Ursynów” i „Pyry” zmieniały się od 4,0 do 81,5 mm (wartość średnia 15,7 mm) oraz od 2,6 do 37,8 mm (wartość średnia 9,2 mm). Szczególnego komentarza wymaga wartość sumy deszczu pomierzonej przez posterunek „Ursynów” w dniu 15.08.2008 roku, wynosząca 81,5 mm, która jest większa od sumy wysokości deszczu obliczonej ze wzoru Bogdanowicz i Stachy’ego dla założonego prawdopodobieństwa $p = 1\%$ (przy tym samym czasie trwania co deszcz pomierzony), wynoszącej 70,6 mm.

Przepływy maksymalne (odniesione do przepływu całkowitego) pomierzonych wezbrań wynosiły od 3,277 do 22,098 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a symulowanych od 3,032 do 23,576 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Wartość średnia tych przepływów, obliczona z wartości pomierzonych, wynosiła 7,360 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, przy odchyleniu standardowym 5,659 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a z wartości symulowanych 8,025 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, przy odchyleniu standardowym 5,810 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Wartość średnia symulowanych przepływów jest więc większa od wartości średniej pomierzonych przepływów o 9,04%. Błąd względny symulacji przepływów, tj. różnica między wartościami symulowanymi i rzeczywistymi odniesiona do wartości pomierzonej, wynosi od $-19,6$ do 44,9%, a jego wartość średnia 11,3%, przy odchyleniu standardowym 19,6%. Dla siedmiu spośród 12 analizowanych zdarzeń obliczony błąd oceny przepły-

TABELA 1. Wartości pomierzone i symulowane zdarzeń uzyskane do weryfikacji modelu odpływu SWMM w zurbanizowanej zlewni Potoku Służewieckiego
 TABLE 1. Characteristics of the measured and simulated event, used for the model verification

Lp. No	Data wystąpienia zdarzenia Date of the event	Wysokość deszczu <i>P</i> Rain depth			Przepływ po- mierzony Q_{max} Measured flow $m^3 \cdot s^{-1}$	Przepływ symu- lowany Q_{max} Simulated flow $m^3 \cdot s^{-1}$	Błąd względny oceny przepły- wu Error of Q_{max} estimation %	Objętość wcz- brania pomie- rzona V Measured flow volume m^3	Objętość wcz- brania symulo- wana V Simulated flow volume m^3	Błąd względny oceny objętości Error of V esti- mation %
		O	U	P						
		mm								
1	21.06.2007	9,8	8,8	3,6	5,400	5,812	7,6	71145,9	58107,2	-18,3
2	02.07.2007	8,6	11,0	-	6,461	8,485	31,3	60916,9	66929,9	9,9
3	25.07.2007	2,8	5,1	-	3,770	3,032	-19,6	34408,1	22559,1	-34,4
4	27.07.2007	11,2	5,7	-	6,267	7,153	14,1	75445,5	57211,4	-24,2
5	18.09.2007	5,4	8,6	-	4,366	4,675	7,1	62512,4	42608,8	-31,8
6	28.09.2007	3,6	11,0	-	6,706	6,771	1,0	54558,0	50099,4	-8,2
7	11.07.2008	3,2	8,1	3,1	4,963	5,191	4,6	44515,2	35921,6	-19,3
8	25.07.2008	1,0	6,2	2,6	3,339	3,372	-0,8	27121,7	25648,1	-5,4
9	02.08.2008	8,8	11,0	5,3	6,061	8,784	44,9	52800,8	66648,9	26,2
10	09.08.2008	6,8	4,0	4,4	3,277	4,731	44,4	26345,8	31995,0	21,4
11	15.08.2008	24,2	81,5	37,8	22,098	23,576	6,7	352542,6	410423,3	16,4
12	16.08.2008	5,6	27,4	7,3	15,557	14,715	-5,4	143204,8	141319,8	-1,3
Zakres zmienności Range of variables		1,0 – – 24,2	4,0 – – 81,5	2,6 – – 37,8	3,277 – 22,098	3,032 – 23,576	-19,6 – 44,9	26345,8 – – 352542,6	22559,1 – – 410423,3	-34,4 – 26,2
Srednia wartość Average		7,6	15,7	9,2	7,360	8,025	11,3	83793,2	84122,7	-5,8
Odchylenie stand. Standard deviation		6,1	21,6	12,7	5,659	5,810	19,6	90086,1	107397,5	20,7

P – wysokość (suma) deszczu pomierzona na posterunkach opadowych: O – Okęcie, U – Ursynów, P – Pyry.

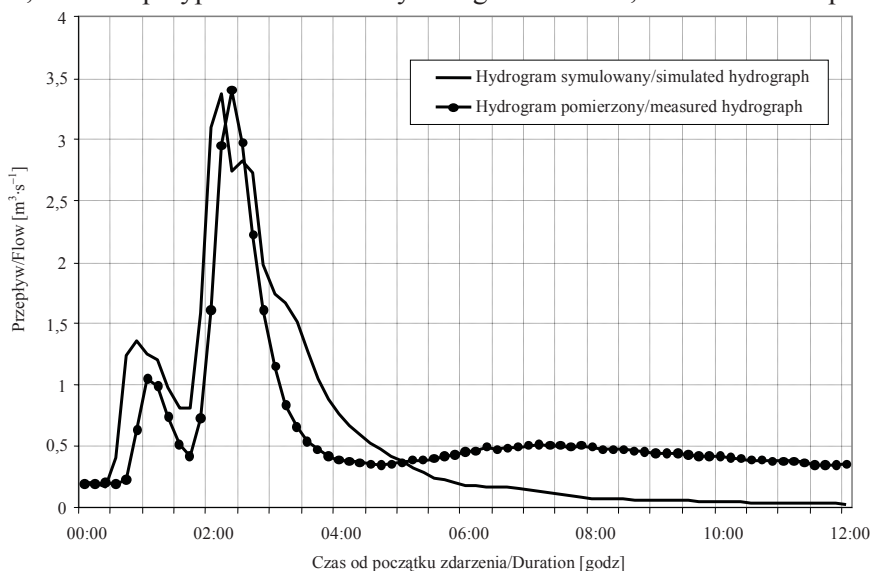
P – The sum of rain depth measured at the stations: O – Okęcie, U – Ursynów, P – Pyry.

wów był mniejszy od 10%, a dla dzie-
więciu – mniejszy od 20%. Największą
zgodność uzyskano dla wezbrań z dnia
28.09.2007 roku i 25.07.2008 roku, dla
których błędy względne były najmniej-
sze, 0,97 i -0,79%. Największy błąd
(44,9 i 44,4%) oceny przepływów mak-
symalnych uzyskano w przypadku wez-
brań w dniach 2 i 9.08.2008 roku. Uzy-
skanie dużych błędów w symulacji tych
dwóch zdarzeń skłania do poszukiwania
dalszych przyczyn przeszacowania para-
metrów, a przede wszystkim do popra-
wienia oceny pola opadów jako wejścia
do modelu.

Poza symulacją przepływów maksy-
malnych wykorzystanych do weryfikacji
modelu porównano wartości pomierzo-
nych i obliczonych objętości wezbrań.
Objętości pomierzonego odpływu wa-
hały się od 26 345,8 do 352 542,6 m³,
przy wartości średniej wynoszącej
83 793,2 m³ i odchyleniu standardowym
90 086,1 m³. W przypadku wezbrań sy-

mulowanych najmniejsze i największe
wartości objętości wynosiły odpowied-
nie 22 559,1 i 410 423,3 m³. Ich wartość
średnia wynosiła 84 122,7 m³, przy od-
chyleniu standardowym 107 397,5 m³.
Błąd względny oceny objętości waha się
od -34,4 do 26,2%. Wartość średnia błę-
du wynosiła -5,8%, a odchylenia stan-
dardowego 20,7%. Hydrogramy prze-
pływu pomierzonego i symulowanego
wezbrania z dnia 25.07.2008 roku, dla
którego uzyskano najmniejszy błąd oce-
ny przepływów maksymalnych, przed-
stawia rysunek 3.

Biorąc za podstawę zgodność prze-
biegu hydrogramów w czasie, można
zauważyć dwudzielną osiągnięcia
największych wartości wezbrania sym-
ulowanego i rzeczywistego – pierwszy
z nich występuje 10 minut wcześniej.
Wartości przepływów kulminacyjnych
są sobie prawie równe – różnica wynosi
tylko 0,033 m³·s⁻¹. Charakterystyczne dla
tego wezbrania, ale również dla pozosta-



RYSUNEK 3. Hydrogramy pomierzonego i symulowanego przepływu podczas wezbrania w dniu 25.07.2008 roku

FIGURE 3. The hydrographs of measured and simulated flows

łych 12 pomierzonych zdarzeń jest to, że po zasadniczej fazie opadania przepływów następuje ponowny ich wzrost (zaznacza się kolejna kulminacja widoczna mniej lub bardziej wyraźne dla różnych zdarzeń) i utrzymuje się przez kilka/kilkanaście godzin na poziomie wyższym od wartości przepływu przed wystąpieniem wezbrania (pochodzącego z zasila- nia odpływem gruntowym). Można przy- jąć, że występowanie takiego wzrostu przepływów o łagodniejszym przebiegu jest wynikiem retencji wód deszczowych w opisywanych zbiornikach (podziem- nych i powierzchniowych) oraz ograni- czonego wydatku istniejących przepu- stów, które opóźniają dopływ wód do rozpatrywanego profilu zamykającego.

Prognoza przepływów prawdopodobnych wywołanych ulewami

Jako zasadniczy cel artykułu przyję- to prognozę przepływów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przekroczenia (p), wywołanych desz- czami ulewnymi o tym samym praw- dopodobieństwie, tj. $p = 100, 50, 20, 10$ i 1% . Przy decyzji o wyborze do analizy deszczy charakteryzujących się prawdo- podobieństwami w zakresie od 100 do 10% kierowano się względami praktycz- nymi, ponieważ wywołane nimi prze- pływy są wykorzystywane w praktyce inżynierskiej do projektowania objek- tów technicznych gospodarki wodnej i systemów odwadniających w obsza- rach zurbanizowanych. Potwierdzenie tego można znaleźć w badanej zlewni Potoku Służewieckiego, w której do wy- miarowania podziemnych zbiorników, przechwytyjących wody deszczowe na

obszarze lotniska Okęcie, wykorzysta- no przepływy obliczone dla deszczu o prawdopodobieństwie wystąpienia $p = 20\%$ (czasie trwania $t = 15$ min). Zalecenia co do wykorzystywania praw- dopodobnych deszczy nawalnych do wymiarowania burzowców w miastach zostały sformułowane przez polską i niemiecką normę: PN-S-02204 (1997) i ATV-Regelwerk (1990). Podobne zale- cenia podają w swoich pracach Geiger i Dreiseitl (1999), Sawicka-Siarkiewicz i Błaszczuk (2007) oraz Słyś (2008). Przyjęcie do prognozy odpływu desz- czu o niskiej częstotliwości wystąpie- nia $c = 100$ lat ($p = 1\%$) podyktowane było oceną zagrożenia powodziowego w badanej zlewni miejskiej.

Poza określeniem prawdopodobień- stwa wystąpienia deszczy do prognozy przepływów trzeba było jeszcze wybrać ich czas trwania. Najkrótszy czas desz- czu, przyjęty empirycznie z pomiarów, wynosił $t = 15$ min. Taki czas trwania deszczu należy przyjmować w oblicze- niach przepływów przy wymiarowaniu hydraulicznym urządzeń retencyjnych i infiltracyjnych na obszarach miejskich. Kolejny czas trwania deszczu przyjmo- wano z krokiem 15–30-minutowym, zwiększając go do momentu uzyskania reakcji w postaci maksymalnej wartości prognozowanego przepływu o danym prawdopodobieństwie przekroczenia. Do obliczenia wysokości maksymalnego deszczu wykorzystano formułę zapro- nowaną przez Bogdanowicz i Stachy'ego (1998), sformułowaną przy opisie kal-ibracji modelu (Barszcz 2009).

Zastosowanie obliczonych wysoko- ści deszczy do prognozy przepływów wymagało ponadto przyjęcia schematu zmienności natężenia w czasie trwania deszczu. W analizie 12 deszczy wy-

korzystanych przy weryfikacji modelu rozpoznano występowanie różnych rozkładów intensywności deszczu w czasie, które możemy zakwalifikować do trzech uogólnionych typów – deszcz z maksymalną intensywnością na początku, w środku i na końcu. Nie stwierdzono jednak wyraźnie dominującego typu. Wobec powyższego przyjęto uproszczenie, że ulewa ma stałą intensywność w czasie – równomierność (tzw. schemat blokowy).

Kolejnym bardzo ważnym elementem w prognozie przepływów było przyjęcie założenia o równomierności wysokości obliczonego deszczu w całej zlewni.

Wykorzystując model opad – odpływ zlewni Potoku Służewieckiego przeprowadzono prognozę przepływów prawdopodobnych w reakcji na przyjęte deszcze. Obliczone sumy wysokości deszczu i wywołane nimi przepływy maksymalne

TABELA 2. Charakterystyki ulew i wywołane nimi przepływy prawdopodobne
TABLE 2. Characteristics of calculated rains and values of forecasted flows

p	Czas trwania deszczu t Rain duration	Wysokość deszczu P Rain depth	Przepływ $Q_{p,t}$ Flow	p	Czas trwania deszczu t Rain duration	Wysokość deszczu P Rain depth	Przepływ $Q_{p,t}$ Flow
%	min	mm	$m^3 \cdot s^{-1}$	%	min	mm	$m^3 \cdot s^{-1}$
100	15	3,5	1,961	10	15	22,6	13,048
	30	4,4	2,613		30	28,6	15,150
	60	5,5	2,716		60	34,9	29,504
	90	6,3	3,001		90	38,7	19,951
	120	6,9	3,369		120	41,5	20,518
	150	7,4	3,629		–	–	–
	175	7,8	3,367		–	–	–
50	15	13,0	8,168	2	15	29,6	16,299
	30	16,4	9,772		30	37,3	18,783
	60	20,1	11,707		60	45,5	36,182
	90	22,4	13,450		90	50,5	22,881
	120	24,1	13,938		120	54,0	23,359
	150	25,0	13,773		–	–	–
	–	–	–		–	–	–
20	15	19,0	11,423	1	15	32,2	16,704
	30	24,0	13,157		30	40,6	20,987
	60	29,3	26,577		60	49,5	38,951
	90	32,6	17,957		90	54,9	23,592
	120	35,0	18,430		120	58,8	24,203
Zakres zmienności Range of variables		3,5–35,0	1,961– –26,577	×	×	22,6–58,8	13,048– –38,951

Objaśnienia/Explanations:

p – prawdopodobieństwo wystąpienia deszczu i przepływu / rain and flow probability.

Liczby wytłuszczone – maksymalny przepływ prawdopodobny $Q_{max,p,t}$ / Bold number – maximum probably flow $Q_{max,p,t}$.

ne, prognozowane w profilu Rosoła badanej zlewni, zestawiono w tabeli 2.

Wysokość deszczy ulewnych wahała się od 3,5 do 58,8 mm, odpowiednio dla największego prawdopodobieństwa i czasu trwania $t = 15$ min oraz dla najmniejszego prawdopodobieństwa ($p = 1\%$) i czasu trwania deszczu $t = 120$ min. Wywołane przez te deszcze przepływy w cieku odpowiadały wartości od 1,961 do $38,951 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, przy czym największy przepływ uzyskano w przypadku deszczu o prawdopodobieństwie 1% i czasie trwania 60 min. Maksymalne wartości przepływów ($Q_{\max,p,t}$), prognozowane dla poszczególnych prawdopodobieństw deszczy p [%] i ich czasu trwania t [min], wynosiły:

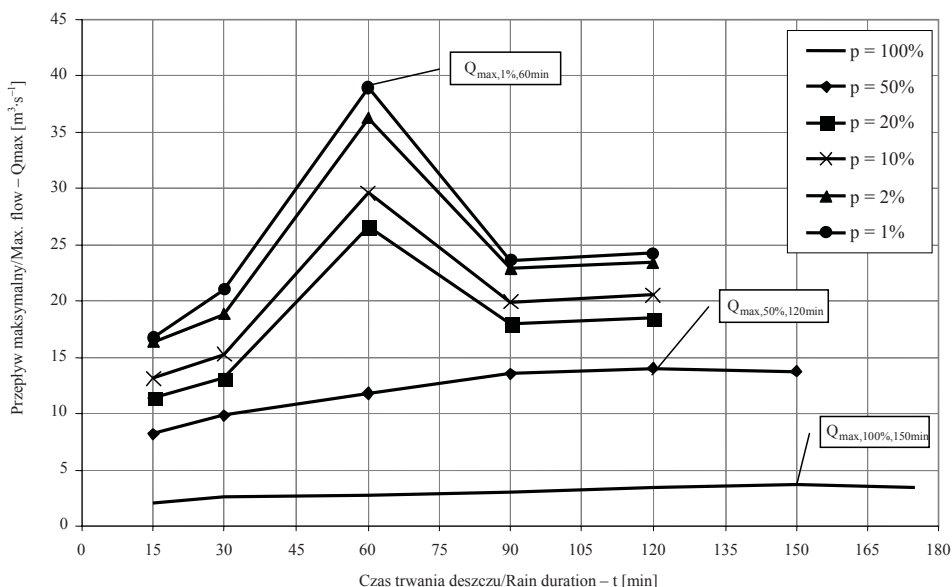
- $Q_{\max,100\%,150\text{min}} = 3,629 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
- $Q_{\max,50\%,120\text{min}} = 13,938 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
- $Q_{\max,20\%,60\text{min}} = 26,577 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
- $Q_{\max,10\%,60\text{min}} = 29,504 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,

- $Q_{\max,2\%,60\text{min}} = 36,182 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
- $Q_{\max,1\%,60\text{min}} = 38,951 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (tab. 2).

Zmienność obliczonych przepływów w zależności od prawdopodobieństwa i czasu trwania deszczy przedstawia także rysunek 4.

Jak wynika z obliczeń (tab. 2 i rys. 4), największe przepływy o prawdopodobieństwach 100 i 50% były wywołane deszczem trwającym odpowiednio 150 i 120 min. W zakresie mniejszych prawdopodobieństw największe przepływy osiąga zlewnia pod wpływem deszczy trwających 60 min.

Ponieważ przyjęto założenie, że pole opadu deszczu odnosi się do całego obszaru zlewni, to wywołane nimi przepływy są większe niż uzyskane w przypadku wystąpienia deszczy o mniejszym zasięgu obszarowym. W celu wstępnego rozpoznania, jak duży wpływ na wartość przepływu ma zasięg obszarowy desz-



RYSUNEK 4. Prognozowane przepływy wywołane ulewami o różnym prawdopodobieństwie wystąpienia

FIGURE 4. The forecasted maximum flows

czu (w tym wielkość i charakterystyka obszaru objętego opadem deszczu), przeprowadzono symulację prognozy przepływów, przyjmując, że deszcz o wybranych charakterystykach będzie ograniczony tylko do zlewni cząstkowej Ursynowa o powierzchni 4,51 km² (11,4% całej badanej zlewni), ale odznaczającej się największym udziałem uszczelnienia i skanalizowania. Uzyskana w tych analizach wartość przepływu w reakcji na deszcz o prawdopodobieństwie 1% i czasie trwania 60 min wynosi 18,174 m³·s⁻¹, co stanowi 46,6% wartości przepływu prognozowanego dla deszczu o tych samych charakterystykach, ale odnoszącego się do całej badanej zlewni.

Podsumowanie i wnioski

W artykule scharakteryzowano obiekty i parametry modelu matematycznego opad – odpływ SWMM (Storm Water Management Model), uwzględnione dla systemu hydrologicznego i hydraulicznego zlewni Potoku Służewieckiego po profil Rosoła. Aby możliwie dokładnie uwzględnić zmienność przestrzenną procesu odpływu z badanej zlewni, dokonano szczegółowego jej podziału na zlewnie cząstkowe, wyróżniając 2076 zlewni homogenicznych. Głównym kryterium podziału na zlewnie cząstkowe był charakter użytkowania obszaru i związany z nim procentowy udział powierzchni nieprzepuszczalnych. W modelu SWMM uwzględniono postępowanie opadowe, podziemne i powierzchniowe zbiorniki retencyjne oraz sieć kanalizacyjną i przepusty drogowe.

Przedstawiono wyniki weryfikacji modelu, przeprowadzonej na podstawie dwunastu ulew wywołujących wezbrania w latach 2007–2008, zdarzeń stanowiących tzw. materiał niezależny, a więc niewykorzystywany w procesie kalibracji modelu. Jako zasadniczy cel artykułu przyjęto określenie maksymalnych przepływów prawdopodobnych wywołanych deszczami ulewnymi, przyjmując założenie, że prognozowane przepływy można opisać tym samym prawdopodobieństwem jak deszcze, które je wywołały. Stosując formułę Bogdanowicz i Stachy’ego, obliczono wysokości opadów deszczu w przyjętym czasie trwania, określonych maksymalnym zakresem od 15 do 175 min, charakteryzujących się prawdopodobieństwami $p = 100, 50, 20, 10, 2$ i 1%.

Model symulacyjny został wykorzystany dla zlewni Potoku Służewieckiego w profilu zamykającym przy ulicy Rosoła. Weryfikacja modelu oraz prognoza przepływów prawdopodobnych pozwalają sformułować następujące wnioski:

1. Opracowanie modelu opad – odpływ zlewni zurbanizowanej wymagało uwzględnienia w nim dużej liczby obiektów oraz podziału zlewni na zlewnie cząstkowe (charakteryzujące się odmiennymi warunkami transformacji opadu w odpływ), aby jak najlepiej odwzorować proces i zidentyfikować parametry systemu hydrologicznego badanej zlewni.
2. Uzyskane w weryfikacji modelu wartości symulowanych przepływów kulminacyjnych wezbrań charakteryzowały się średnim błędem oceny, wynoszącym 11,3% (w stosunku do wartości pomierzonych), przy odchyleniu standardowym 19,6%.

Dla siedmiu spośród dwunastu analizowanych zdarzeń obliczony błąd estymacji przepływów był mniejszy od 10%, a dla dziewięciu mniejszy od 20%.

3. Mając na uwadze przyszłe bardziej szczegółowe analizy procesu opad – odpływ w badanej zlewni oraz zmniejszenie błędu oceny przepływów kulminacyjnych i objętości symulowanych wezbrań, przewiduje się jeszcze dokładniejszą identyfikację parametrów obiektów uwzględnionych w modelu. Priorytetem jest poprawienie oceny pola opadów (zasięgu obszarowego i zmienności przestrzennej wysokości opadów deszczu) jako wejścia do modelu. Z wstępnych analiz wynika, że zasięg obszarowy deszczu i charakterystyka obszaru objętego opadem (udział powierzchni nieprzepuszczalnych i skanalizowanych, występowanie obiektów retencyjnych) mają decydujący wpływ na wartości przepływów.
4. Prognozowane wartości maksymalnych przepływów ($Q_{\max,p,t}$) dla przyjętych prawdopodobieństw przekroczenia p [%] oraz czasów trwania deszczu t [min] wynoszą:
 - $Q_{\max,100\%,150\min} = 3,629 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
 - $Q_{\max,50\%,120\min} = 13,938 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
 - $Q_{\max,20\%,60\min} = 26,577 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
 - $Q_{\max,10\%,60\min} = 29,504 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
 - $Q_{\max,2\%,60\min} = 36,182 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,
 - $Q_{\max,1\%,60\min} = 38,951 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Należy mieć na uwadze, że podane wartości przepływów prognozowano w reakcji na deszcze obliczeniowe, dla których przyjęto założenie o równomierności rozkładu ich wysokości na całej powierzchni zlewni.

1. Porównując przepływy prognozowane i przepustowość Potoku Służewieckiego w profilu wodowskazowym Rosoła, stwierdzono, że prognozowany maksymalny przepływ o prawdopodobieństwie przekroczenia 20% (wywołany deszczem ulewnym występującym przeciętnie raz na 5 lat), wynoszący $26,577 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, jest znacznie większy od natężenia przepływu określonego dla brzegowego stanu wody, wynoszącego w przybliżeniu $15,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Natomiast maksymalny przepływ o prawdopodobieństwie 50% ($13,938 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) jest mniejszy od przepływu brzegowego o $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.
2. Model zurbanizowanej zlewni Potoku Służewieckiego jest modelem dynamicznym, którego funkcje transformujące opad w odpływ oparte są na fizyczno-matematycznym opisie poszczególnych procesów. To pozwala znaleźć szerokie zastosowanie modelu w badanej zlewni, między innymi w różnych aspektach projektowania obiektów inżynierii wodnej (do wyznaczania przepływów miarodajnych i kontrolnych o zadanym prawdopodobieństwie przekroczenia, oceny wpływu projektowanych przedsięwzięć na wielkość odpływu), w bieżącej prognozie wezbrań i zarządzaniu odpływem, do przewidywania wpływu zmian wywołanych działalnością człowieka na obszarze zlewni (zmian użytkowania terenu) na reżim odpływu oraz w badaniach naukowych dostarczających informacji o procesach zachodzących w zlewni.

Literatura

- ATV-Regelwerk, Arbeitsblatt A138 1990: Bau und Bemessung von Anlagen zur dezentralen Versickerung von nicht schädlich verunreinigtem Niederschlagswasser. St. Augustin.
- ATV-Schriftenreihe (Abwassertechnische Vereinigung e.v.) 1997: Versickerung von Regenwasser. Bonner Universitäts-Buchdruckerei, Bonn.
- BAJKOWSKI S. 2008: Analiza warunków działania przepustu na Potoku Służewieckim pod ulicą Kłobucką. Materiały niepublikowane. Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW, Warszawa.
- BANASIK K., BARSZCZ M., HEJDUK L. 2007. Current and perspective flood flow consequences of land use changes in Służew Creek (Suburb of Warsaw). Proc. COST Session Aquaterra Conference 2007, Hamburger Wasserbau: 3–16.
- BARSZCZ M. 2009: Analysis of freshets caused by heavy rainfall on small urbanized drainage basin of Służew Stream. *Studia Geotechnica et Mechanica* 4: 3–15.
- BIELAWSKI Z. 1994: Określenie charakterystyk odpływu z terenów zurbanizowanych na podstawie cech fizycznych zlewni i opadu. Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN 5.
- BOGDANOWICZ E., STACHY J. 1998: Maksymalne opady deszczu w Polsce. Charakterystyki projektowe. Materiały badawcze. Seria: Hydrologia i Oceanologia 23. Wydawnictwo IMGW, Warszawa.
- CIEPIEŁOWSKI A., DĄBKOWSKI Sz.L. 2006: Metody obliczeń przepływów maksymalnych w małych zlewniach rzecznych (z przykładami). Projprzem-EKO, Bydgoszcz.
- GEIGER W., DREISEITL H. 1999: Nowe sposoby odprowadzania wód deszczowych. Poradnik. Przekład J. Brzeski. Projprzem-EKO, Bydgoszcz.
- GRADOWSKI Ł., BANASIK K. 2007: Wpływ zbiornika Staw Berensewicza na redukcję fali wezbraniowej Potoku Służewieckiego. *Przeł. Nauk. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* XVII, 2 (40): 13–25.
- GUTRY-KORYCKA M. 2007: Odpływ ze zlewni zurbanizowanych. *Prace i Studia Geograficzne* 38: 37–56.
- Mapa topograficzna 2004. Numery arkuszy: N-34-138-D-b-2, N-34-139-C-a-1, N-34-138-B-d-4, N-34-139-A-c-1, N-34-139-C-a-3. Główny Urząd Geodezji i Kartografii, Warszawa.
- OKSIUTA M. 2007: Ocena odpływu wezbraniowego ze zlewni Potoku Służewieckiego w Warszawie. *Prace i Studia Geograficzne* 38: 57–71.
- Operat hydrologiczny Potoku Służewieckiego w przekroju ul. Przyczółkowej 2002. Materiały niepublikowane. Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW, Warszawa.
- PARK S.Y., LEE K.W., PARK I.H., HA S.R. 2008: Effect of the aggregation level of surfach runoff fields and sewer network for a SWMM simulation. *Desalination* 226: 328–337.
- PETERSON E.W., WICKS C.M. 2006: Assessing the importance of conduit geometry and physical parameters in karst systems using the storm water management model (SWMM). *J. of Hydrology* 329: 294–305.
- PN-S-02204 1997: Drogi samochodowe. Odwodnienie dróg. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa.
- ROSSMAN L.A. 2005: Storm water management model user's manual version 4. National Risk Managemen Research Laboratory, Cincinnati.
- SAWICKA-SIARKIEWICZ H., BŁASZCZYK P. 2007: Urządzenia kanalizacyjne na terenach zurbanizowanych. Wymagania techniczne i ekologiczne. Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa.
- SCS National Engineering Handbook 1972: Soil Conservation Service Sec. 4, Hydrology. USDA.
- SŁYŚ D. 2008: Retencja i infiltracja wód deszczowych. Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów.
- Szczegółowa mapa geologiczna Polski 1978. Numery: 559-Raszyn, 560-Piaseczno, 524-Warszawa wschód, 523-Warszawa Zachód. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa.

Summary

Forecast of probably flows caused by heavy rainfall on urbanized drainage basin of Służew Stream. The main goal of this study was to evaluate the SWMM model's (i.e. Storm Water Management Model) applicability to simulation of runoff in the Służew Stream basin (located in the southern part of Warsaw). The twelve rainfall-runoff event measured at the surveyed Rosoła profile, were used to the verification of the model. In the next phase, the SWMM model was used

in order to determine the probable maximum flows, caused by estimated rainfall with 100, 50, 20, 10, 2 and 1% probability.

Author's address:

Mariusz Barszcz
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
Poland
e-mail: mariusz_barszcz@sggw.pl