PRZEGLĄD GEOGRAFICZNY
2017, 89, 3, s. 429-449

Porównanie przepływów o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia obliczonych w zlewni miejskiej za pomocą modeli SWMM i SBUH

Comparison of flows of defined probabilities of occurrence calculated in an urban catchment using SWMM and SBUH models

MARIUSZ BARSZCZ
Katedra Inżynierii Wodnej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
02-776 Warszawa, ul. Nowoursynowska 159; mariusz_barszcz@sggw.pl

Zarys treści. W pracy podjęto próbę oszacowania przepływów o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia w zlewni Potoku Służewieckiego w Warszawie za pomocą dynamicznego modelu SWMM (Storm Water Management Model) oraz konceptualnego modelu SBUH (Santa Barbara Urban Hydrograph). Przeprowadzono ocenę zgodności przepływów obliczonych za pomocą różnych modeli w czterech przekrojach obliczeniowych. Relatywnie dobrą zgodność uzyskano jedynie dla dwóch zlewni cząstkowych, o małej powierzchni.

Przedstawiono również wyniki weryfikacji wyżej wymienionych modeli w małej zlewni miejskiej, zlokalizowanej w Baltimore (Stany Zjednoczone).

Słowa kluczowe: zlewnia miejska, przepływy, model SBUH, model SWMM, czas koncentracji, czas krytyczny opadu.

Wprowadzenie

Do obliczania przepływów jako reakcji na opady deszczu w praktyce inżynierskiej są stosowane modele o różnym stopniu złożoności – od prostych wzorów empirycznych lub zależności regresyjnych do modeli matematycznych opisujących wszystkie procesy obiegu wody w zlewni (Beven, 2001; Singh, 1995; WMO, 1994). W większości przypadków istniejące modele są odpowiednie do obliczeń tylko w zlewniach naturalnych. Obszerną charakterystykę metod i modeli stosowanych do analizy procesów hydrologicznych w zlewniach miejskich przedstawiła M. Gutry-Korycka (2007). Opis metody izochron, zastosowanej do symulacji przepływów w zlewni miejskiej, można znaleźć w pracy Oksiuty (2007), a opis modelu konceptualnego Nasha – w pracy Z. Bielawskiego (1994). Spośród modeli

https://doi.org/10.7163/PrzG.2017.3.5

przeznaczonych do obliczania przepływów w obszarach zurbanizowanych, można wymienić dynamiczny model SWMM (Storm Water Management Model) oraz konceptualny model SBUH (Santa Barbara Urban Hydrograph).

W niniejszej pracy podjęto próbę oszacowania przepływów o prawdopodobieństwach wystąpienia 10, 2 i 1 % w czterech przekrojach obliczeniowych, zlokalizowanych na obszarze zlewni Potoku Służewieckiego w Warszawie. Do ich obliczania zastosowano wspomniane modele SWMM i SBUH, zaliczane do różnych rodzajów (klas) modeli matematycznych ze względu na ich odmienne własności, takie jak: struktura modelu, dostępność informacji o wewnętrznej budowie modelowanego obiektu, wartości poznawcze modelu lub własności funkcji operatora.

Model SWMM jest złożonym modelem dynamicznym, w którym przebieg transformacji opadu w odpływ jest opisany równaniami zachowania masy i pędu (użytkownik modelu ma do wyboru jedną z trzech opcji procedury obliczeniowej: „przepływ ustalony", „fala kinematyczna", „fala dynamiczna"). Pod względem struktury i przedmiotu modelowania, SWMM można zakwalifikować jako model komponentów zlewni – opisujący procesy zachodzące w poszczególnych środowiskach występowania wody w zlewni lub jako model częściowo integralny (Ozga-Zielińska i Brzeziński, 1997). Biorąc pod uwagę inne kryteria klasyfikacji modeli, SWMM zalicza się do modeli genetycznych, dynamicznych, nieliniowych, modeli o parametrach rozłożonych. Charakteryzuje go duża liczba parametrów, które określa się dla poszczególnych obiektów uwzględnionych w modelu zlewni (na przykład dla obszarów cząstkowych trzeba zidentyfikować co najmniej trzynaście parametrów). Parametry modelu są w większości fizycznie mierzalnymi charakterystykami zlewni i warunków hydrometeorologicznych. W innym rozdziale tej pracy opisano adaptację modelu SWMM dla badanej zlewni. Szeroki opis modelu i przykłady jego zastosowania w praktyce inżynierskiej można znaleźć w podręczniku L.A. Rossmana (2005) oraz w pracach M. Barszcza (2009, 2015a, 2015b), J. Barco i innych (2008) czy J. Warwicka i P. Tadepalli (1991).

Model SBUH jest prostym modelem konceptualnym (symptomatycznym), w którym zakłada się transformację opadu w odpływ w pojedynczym zbiorniku liniowym. Przebieg tego procesu jest opisany równaniem zachowania masy (równaniem ciągłości), w którym przyjęto liniową zależność między odpływem a retencją. SBUH należy do grupy modeli o parametrach skupionych, w których zmienne zależne są funkcjami wyłącznie czasu. Ten model ma tylko jeden parametr – współczynnik retencji zbiornika, który oblicza się na podstawie czasu koncentracji i przyjętego kroku czasowego obliczeń. W modelu tego typu – symptomatycznym – można jedynie, na podstawie przyjętej koncepcji działania oryginału, określać liczbowe wartości wielkości wyjściowych jako odpowiedź na zadane wartości zmiennych wejściowych (Ozga-Zielińska i Brzeziński, 1997). W dalszej części pracy przedstawiono procedurę obliczeniową modelu SBUH.

Ważnym celem pracy była ocena przydatności modelu SBUH do prognozy przepływów o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia w zlewniach miej-

skich, którą przeprowadzono na podstawie porównania w badanej zlewni przepływów uzyskanych z tego modelu z odpowiednimi przepływami uzyskanymi z modelu SWMM i określeniu stopnia ich zgodności. Porównano również objętości obliczone dla hydrogramów uzyskanych z obu wymienionych modeli. Model SBUH, ze względu na jego prostą procedurę obliczeniową, konieczność identyfikacji tylko jednego parametru modelu (zależnego głównie od czasu koncentracji) oraz relatywnie łatwą adaptację modelu do zlewni niekontrolowanej, może znaleźć powszechne zastosowanie do obliczania przepływów w zlewniach miejskich (w praktyce inżynierskiej), w przypadku pozytywnej weryfikacji modelu w zlewniach badawczych.

Analiza polegała na porównaniu wartości przepływów obliczonych za pomocą modelu SWMM w przekrojach zamykających poszczególne zlewni cząstkowe z uwzględnieniem ich transformacji w kanałach otwartych i zamkniętych, ich redukcji przez zbiorniki retencyjne i przepusty drogowe znajdujące się na obszarze zlewni („przepływów zredukowanych") z wartościami przepływów wygenerowanych na obszarze zlewni w postaci spływu powierzchniowego („przepływów potencjalnych") – obliczonych bez uwzględnienia ich redukcji przez wymienione typy obiektów. Celem tej analizy było wykazanie, że wartości tych przepływów w zlewniach zurbanizowanych mogą znacznie różnić się od siebie, co implikuje konieczność stosowania w tego typu zlewniach modeli, w których da się uwzględnić w obliczeniach wpływ infrastruktury hydrotechnicznej na redukcję spływu powierzchniowego. To warunkuje uzyskanie wiarygodnych wartości przepływów, wykorzystywanych w projektowaniu obiektów inżynierskich. W odniesieniu do wyżej wymienionych przepływów podano wartości współczynnika spływu, za pomocą którego można porównywać rozmiary kulminacji wezbrań w zlewniach o różnej wielkości i charakterystyce.

Przy wykorzystaniu modelu SWMM obliczono czas koncentracji dla poszczególnych zdarzeń o prawdopodobieństwach wystąpienia 10, 2 i 1 % w czterech zlewniach cząstkowych, od którego zależny jest parametr retencji zbiornika K_r w modelu SBUH. Ustalono zależność pomiędzy wartościami czasu koncentracji i czasu krytycznego trwania opadu, który analizowano dla każdego zdarzenia opad–odpływ z użyciem obu wymienionych modeli.

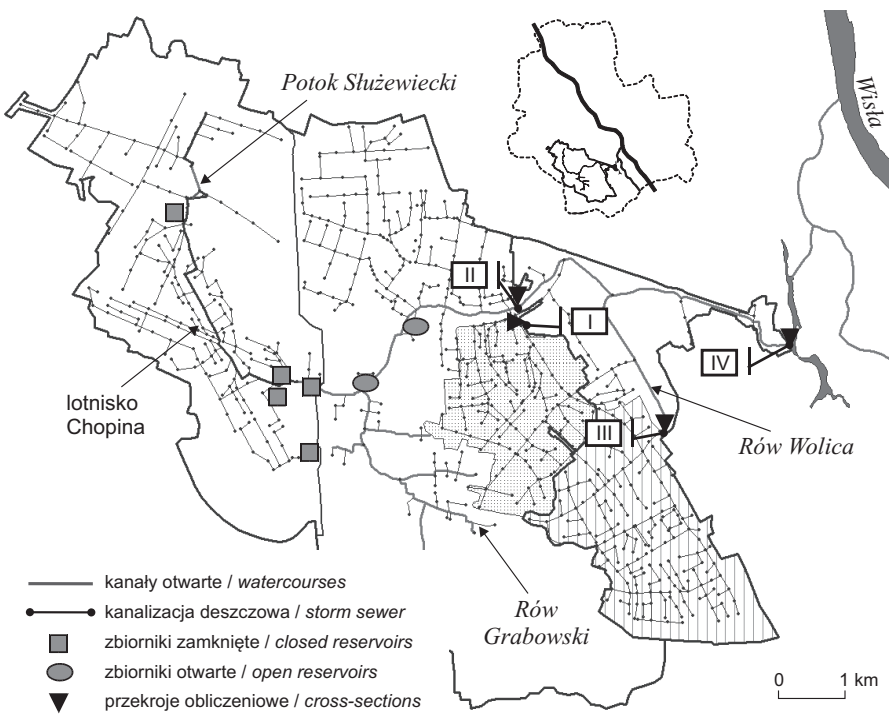
W pracy przedstawiono również wyniki weryfikacji modeli SWMM i SBUH w małej zlewni miejskiej Gray Haven, zlokalizowanej w Baltimore (Stany Zjednoczone). Sprawdzenie poprawności modeli w tej zlewni było uzasadnione tym, że dysponowano danymi dotyczącymi zależności opad–odpływ, a opady charakteryzowała duża wydajność (znacznie większa niż opady pomierzone w zlewni Potoku Służewieckiego, które wykorzystano do weryfikacji modelu SWMM w ramach innej pracy). Oszacowano, że prawdopodobieństwo wystąpienia jednego z opadów jest mniejsze od 1%. Innym uzasadnieniem było to, że ze względu na dużą przepustowość kolektora deszczowego w badanej zlewni, nie miał on wpływu na redukcję przepływów, a zatem możliwa była weryfikacja modeli pod

kątem dokładności obliczania spływu powierzchniowego. Weryfikacja modelu SWMM w zlewni Potoku Służewieckiego, przeprowadzona na podstawie pomierzonych i obliczonych przepływów w przekroju II (ryc. 1), wykazała, że wartość średniego błędu względnego wynosi 10,3% (Barszcz, 2015a).

Obszar analiz

Zlewnia Potoku Służewieckiego, o powierzchni 55,2 km^2, jest położona w południowej części Warszawy. Źródła Potoku znajdują się powyżej lotniska Chopina, a ujście w Jez. Wilanowskim. Na odcinku od źródeł do wylotu z lotniska Potok Służewiecki jest niemal na całej długości kanałem zamkniętym. Całkowita długość cieku wynosi około 15 km, a jego spadek 1,6‰. Głównymi dopływami są Rów Grabowski i Rów Wolica.

Na rycinie 1 przedstawiono obszar całej zlewni, w którym wyszczególniono dwie zlewnie cząstkowe ograniczone przekrojami I oraz III (obszary zakreskowane). Zaznaczono lokalizację czterech analizowanych przekrojów obliczeniowych.



Ryc. 1. System odprowadzania wód opadowych w zlewni Potoku Służewieckiego (według: Barszcz, 2015)
Wszystkie ryciny i tabele są opracowaniami autorskimi.

The storm drainage system in the catchment of the Służewiecki Stream (after Barszcz, 2015)
All figures and tables are the own work of the author.

Fot. 1. Potok Służewiecki w przekrojach obliczeniowych II i III (foto: *M. Barszcz*)
The Służewiecki Stream at computable cross-sections II and III

Istotny wpływ na kształtowanie się przepływów w górnej części Potoku Służewieckiego mają zbiorniki zamknięte o łącznej pojemności 42 490 m^3, zlokalizowane na obszarze portu lotniczego Chopina. Nie bez znaczenia są też zbiorniki otwarte: Staw Berensewicza i Staw Wyścigi (zlokalizowane w środkowej części zlewni) oraz liczne przepusty drogowe, które mają w wielu przypadkach znacznie mniejszą przepustowość niż koryto cieku.

W tabeli 1 zestawiono dane dotyczące analizowanych zlewni cząstkowych (ograniczonych przekrojami obliczeniowymi I, II, III, IV) – wielkości, jak również udziału powierzchni nieprzepuszczalnych efektywnych (mających bezpośrednie połączenie hydrauliczne z kanałami odwadniającymi poszczególne obszary cząstkowe).

Tabela 1. Podstawowe charakterystyki analizowanych zlewni cząstkowych
Main characteristics of the sub-catchments analysed

Numer przekroju *No. of cross-section*	Symbol podzlewni *Symbol of sub-catch.*	Kilometraż *Kilometers* [km]	Powierzchnia podzlewni *Area of sub-catchment* [km^2]	Powierzchnia nieprzep. *Impervious surfach* [%]
I	A1	4+976	4,51	43,9
II	A2	4+976	43,0	36,2
III	A3	2+318	6,23	38,3
IV	A4	0+000	55,2	32,7

Metody i modele

Metodyka analiz

Przepływy maksymalne o prawdopodobieństwie wystąpienia 10, 2 i 1% obliczono przy zastosowaniu modeli SWMM i SBUH. Wykorzystując modele adaptowane dla badanej zlewni przeprowadzono prognozę przepływów w czterech przekrojach obliczeniowych, w tym w dwóch przekrojach usytuowanych w kanale otwartym Potoku Służewieckiego (II oraz IV), jednym – na wylocie kolektora deszczowego do Potoku (I) i przekroju Rowu Wolica (III) – położonym poniżej wylotu kolektora do kanału otwartego. Za pomocą modelu SWMM obliczono „przepływy zredukowane" oraz „przepływy potencjalne", które zdefiniowano we wprowadzeniu.

W analizach za pomocą modelu SWMM przyjmowano opady o różnych czasach trwania w relacji do określonego prawdopodobieństwa i prognozowano hydrogramy przepływu w poszczególnych przekrojach obliczeniowych, które różniły się wartościami przepływu kulminacyjnego. W ten sposób ustalono czasy krytyczne trwania opadu, które skutkowały przepływami kulminacyjnymi hydrogramów o największej wartości. Analizę czasów krytycznych trwania opadu przeprowadzono w odniesieniu do „przepływów zredukowanych" i „przepływów potencjalnych".

Do obliczania transformacji fali wezbraniowej w kanałach zastosowano model fali dynamicznej (jedną z trzech opcji obliczeniowych w programie). Taką nazwą określa się układ równań przepływu nieustalonego (układ równań de Saint-Venanta), który składa się z równania ciągłości i równania dynamicznego.

Wykorzystując model SWMM obliczono również czasy koncentracji dla poszczególnych zdarzeń o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia w czterech zlewniach cząstkowych. Przyjęto, że czas koncentracji to czas przepływu kropli wody z najdalszych miejsc określonej zlewni cząstkowej do przekroju zamykającego (Szymkiewicz i Gąsiorowski, 2010). Uwzględniono spływ po powierzchni terenu oraz w sieci kanalizacyjnej i kanałach otwartych. W celu ustalenia czasu koncentracji, określano najdłuższą drogę przepływu wody w badanych zlewniach cząstkowych oraz średnie arytmetyczne prędkości przepływu w odniesieniu do poszczególnych zdarzeń opadowych, obliczane na podstawie prędkości średnich w poszczególnych kanałach sieci kanalizacyjnej i Potoku Służewieckiego uzyskanych z modelu SWMM.

W analizach za pomocą modelu SBUH, tak samo jak w modelu SWMM, przyjmowano opady o różnych czasach trwania w celu ustalenia wartości czasu krytycznego trwania opadu. Na podstawie opadów, które wyznaczono dla tych czasów krytycznych, obliczono przepływy o prawdopodobieństwach 10, 2 i 1%.

Do obliczenia wysokości opadów o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia wykorzystano formułę podaną przez E. Bogdanowicz i J. Stachý'ego

(1997). Przyjęto stały rozkład opadu w czasie. Do ustalenia wysokości opadu efektywnego dla obszarów przepuszczalnych zastosowano metodę NRCS (Natural Resources Conservation Service) – Curve Number (CN) – wcześniej występującą pod nazwą SCS (USDA-SCS, 1975; SCS, 1986). Dla parametru CN przyjęto wartość 77,0. Opad efektywny (odpływ) dla obszarów nieprzepuszczalnych był obliczany jako różnica pomiędzy wysokością opadu całkowitego i wysokością strat początkowych: retencji terenowej.

Krok czasowy obliczeń w modelu SBUH wynosił 10 minut, natomiast w modelu SWMM przyjęto krok obliczeniowy wynoszący 1 sekundę, a czas symulacji 24 godziny.

Adaptacja modelu SWMM

Zastosowano SWMM w wersji 5.0.022, opracowany przez Agencję Ochrony Środowiska w Stanach Zjednoczonych (Environmental Protection Agency – EPA). Adaptacja modelu SWMM dla zlewni Potoku Służewieckiego polegała na utworzeniu w oknie programu komputerowego obiektów, które reprezentują obiekty rzeczywistego systemu, a następnie na określeniu zależności pomiędzy nimi oraz wartości ich parametrów.

Obszar zlewni został podzielony w modelu na zbiór zlewni (obszarów) cząstkowych, aby uwzględnić przestrzenną zmienność modelowanych procesów hydrologicznych. Opad przyporządkowany do poszczególnych obszarów cząstkowych był transformowany w spływ powierzchniowy, a następnie przekazywany do sąsiednich obszarów i/lub do systemu hydraulicznego zlewni. W badanej zlewni system hydrauliczny składał się między innymi z przewodów sieci kanalizacyjnej, kanałów otwartych, zbiorników retencyjnych, przepustów, pompowni i zastawek.

Model SWMM adaptowano dla badanej zlewni w dwóch scenariuszach obliczeniowych, które uwzględniają obliczanie przepływów o prawdopodobieństwach 10% (scen. 1) oraz 2 i 1% (scen. 2). Obszarową zmienność parametrów modelu uzyskano poprzez podział zlewni na 3386 obszary cząstkowe (podzlewnie) oraz utworzenie 2265 odcinków kanałów otwartych i zamkniętych. Szczegółowe informacje dotyczące adaptacji modelu dla badanej zlewni przedstawiono w innej pracy (Barszcz, 2015a).

Procedura obliczeniowa modelu SBUH

Koncepcja modelu SBUH – Santa Barbara Urban Hydrograph (Stubchaer, 1975) opiera się na zbiorniku liniowym, którego parametr K_r, określany mianem współczynnika retencji zbiornika, oblicza się na podstawie czasu koncentracji t_c [h] i przyjętego kroku czasowego obliczeń Δt [h] (w tej pracy przyjęto do obliczeń Δt = 0,167 h). Metodykę wyznaczania czasu koncentracji opisano we wcześniejszym rozdziale, a jego wartości dla poszczególnych zdarzeń podano w tabeli 3.

$$K_r = \frac{\Delta t}{(2t_c + \Delta t)} \tag{1}$$

Procedura obliczeniowa modelu SBUH składa się z dwóch głównych etapów: wyznaczenia hydrogramu jednostkowego oraz hydrogramu przepływów.

Funkcja hydrogramu jednostkowego jest uzależniona od powierzchni zlewni A [km^2] (wartości tej charakterystyki podano w tabeli 1), kroku czasowego obliczeń Δt [h] oraz wysokości opadu efektywnego w kolejnych przedziałach czasu $R(\Delta t)$ [mm].

$$I(t) = 0{,}275\,\frac{R(t)A}{\Delta t} \tag{2}$$

Rzędne hydrogramu przepływów ustala się na podstawie zależności:

$$Q(t) = Q(t - \Delta t) + K_r[I(t-\Delta t) + I(t) - 2Q(t-\Delta t)] \tag{3}$$

gdzie:
$Q(t)$ – rzędne hydrogramu przepływów (m^3·s^{-1}),
$I(t)$ – rzędne hydrogramu jednostkowego (m^3·s^{-1}).

Szczegółowe informacje na temat metodyki obliczania przepływów za pomocą modelu SBUH podano w innej pracy (Barszcz, 2014) – błędnie używano w niej innej nazwy dla tego samego modelu: Santa Barbara Unit Hydrograph.

W tych analizach zastosowano modyfikację metodyki obliczania opadu efektywnego, od którego jest uzależniona funkcja hydrogramu jednostkowego w modelu SBUH, w odniesieniu do metodyki przedstawionej w pracy M. Barszcza (2014). W poprzednich analizach do obliczania opadu efektywnego zastosowano metodę NRCS – CN łącznie w odniesieniu do terenów nieprzepuszczalnych i przepuszczalnych, przyjmując jedną wartość parametru CN, odczytaną z tabeli w podręczniku do modelu SWMM (Rossman, 2005) dla określonego obszaru cząstkowego, np. zabudowy mieszkaniowej wielorodzinnej. W tych analizach wymienioną metodę obliczania opadu efektywnego zastosowano tylko wobec terenów przepuszczalnych. Przyjęto CN = 77,0. Wysokość opadu efektywnego dla obszarów nieprzepuszczalnych była obliczana jako różnica pomiędzy opadem całkowitym $P(\Delta t)$ w interwale czasowym Δt i wysokością warstwy wody $D(\Delta t)$ zatrzymanej na ich powierzchni (warstwy retencji terenowej). Gdy wielkość opadu przekroczyła wysokość warstwy wody zatrzymanej w wyniku retencji powierzchniowej (wysokość straty początkowej), to w określonych interwałach czasowych warstwa opadu efektywnego była równa wielkości opadu całkowitego. Przyjęto wysokość retencji terenowej dla obszarów nieprzepuszczalnych 1,7 mm (inni autorzy założyli 1,6 mm –Tholin i Keifer, 1960 lub 1,5 mm – Skotnicki i Sowiński, 2015). Według ASCE (1992) wartość tego parametru zawiera się w przedziale od 1,27 do 2,54 mm. W wyniku modyfikacji metodyki wyznaczania opadu efektywnego, uzyskuje się za pomocą modelu SBUH znacząco inne war-

tości przepływów niż przy zastosowaniu metody NRCS - CN łącznie w odniesieniu do terenów nieprzepuszczalnych i przepuszczalnych.

Wysokość opadu efektywnego (cząstkowego) w kolejnych interwałach czasowych Δt była obliczana za pomocą następujących równań (Wanielista i inni, 1997):

$$R_I(\Delta t) = d' \, [P(\Delta t) - D(\Delta t)] \tag{4}$$

$$R_P(\Delta t) = (1 - d') \, [P(\Delta t) - F(\Delta t)] \tag{5}$$

$$R(\Delta t) = R_I(\Delta t) + R_P(\Delta t) \tag{6}$$

gdzie:
$R_I(\Delta t)$ – opad efektywny dla obszarów nieprzepuszczalnych (mm),
$R_P(\Delta t)$ – opad efektywny dla obszarów przepuszczalnych (mm),
$P(\Delta t)$ – opad całkowity (mm),
$D(\Delta t)$ – wysokość retencji terenowej dla obszarów nieprzepuszczalnych (mm),
d' – udział obszarów nieprzepuszczalnych w zlewni, które mają bezpośrednie (hydraulicznie) połączenie z kanałami odwadniającymi zlewnię (-),
$F(\Delta t)$ – wysokość warstwy wody zatrzymanej na obszarach przepuszczalnych w wyniku intercepcji, retencji powierzchniowej i infiltracji (obliczana metodą NRCS - CN) (mm).
$R(\Delta t)$ – całkowita wysokość opadu efektywnego w przedziale czasu Δt (mm).

Wyniki i dyskusja

Weryfikacja modeli w zlewni Gray Haven

We wprowadzeniu podano uzasadnienie weryfikacji modeli SWMM i SBUH w zlewni Gray Haven, położonej w Baltimore (Maryland, USA). Powierzchnia tej zlewni, użytkowanej jako teren zabudowy mieszkaniowej, wynosi 9,40 ha. Wody opadowe są odprowadzane ze zlewni za pomocą 379-metrowego kolektora deszczowego o dużej przepustowości. Udział powierzchni nieprzepuszczalnych w zlewni wynosi 44,5%.

Adaptacja modelu SWMM dla zlewni Gray Haven została przeprowadzona na podstawie informacji o zlewniach cząstkowych (powierzchnia, spadki terenu i udział obszarów nieprzepuszczalnych) oraz kanałach deszczowych (długość, spadki i średnica poszczególnych kanałów), zaczerpniętych z pracy Ć. Maksimovića i M. Radojkovića (1986, za: Wenzel i Voorhees, 1980). Adaptacji dokonano na podstawie danych dotyczących wielkości powierzchni zlewni i udziału powierzchni nieprzepuszczalnych. Do weryfikacji modeli wykorzystano dane opad–odpływ zarejestrowane w tej zlewni dla trzech zdarzeń w przedziałach jednominutowych, pochodzących z EPA Data Base (Hubner i inni, 1981) – dane pomiarowe pochodzą z tej samej instytucji (EPA), w której opracowano model SWMM.

Czas koncentracji, od którego uzależniony jest parametr K_r w modelu SBUH, wyznaczono w badanej zlewni dwiema metodami: (1) za pomocą wzoru Manninga obliczono prędkość przepływu w poszczególnych kanałach, a następnie obliczono czas przepływu w kolektorze deszczowym o znanej długości (t_c = 2,22 min); (2) czas przepływu wody w kolektorze ustalono za pomocą modelu SWMM na podstawie maksymalnych prędkości przepływu w poszczególnych kanałach (t_c = 2,42 min). Uzyskano bardzo zbliżone wartości koncentracji. Ze względu na powszechną znajomość wzoru Manninga i łatwość jego zastosowania w tego typu analizach, przyjęto do obliczania przepływów wartość czasu koncentracji ustaloną przy jego zastosowaniu.

Do obliczenia opadu efektywnego w zlewni Gray Haven przyjęto dla obszarów przepuszczalnych wartość parametru CN = 77,0, natomiast dla obszarów nieprzepuszczalnych wysokość retencji terenowej 1,7 mm.

W tabeli 2 zestawiono podstawowe charakterystyki analizowanych zdarzeń opad-odpływ oraz wartości przepływów kulminacyjnych uzyskanych z modeli SWMM i SBUH. Za pomocą modelu SWMM obliczono „przepływy zredukowane" (w tabeli *outflow*) i „przepływy potencjalne" (*runoff*), które zdefiniowano we wprowadzeniu. Odpowiednie przepływy miały niemal takie same wartości; nieco mniejsze wartości przepływu zredukowanego niż potencjalnego są jedynie wynikiem jego transformacji na długości przewodu kolektora.

Tabela 2. Charakterystyki zdarzeń opad-odpływ i przepływy obliczone w zlewni Gray Haven
Characteristics of rainfall-runoff events and calculated flows in the Gray Haven catchment

Data *Date*	Wysokość opadu *Rainfall* [mm]	Czas opadu *Time of rainfall* [min]	Przepływy / *Flows* [$m^3 \cdot s^{-1}$]				Błąd względny *Relative error* [%]	
			obserw. *measured*	SWMM obl. *calc. - Outflow*	SWMM obl. *calc. - Runoff*	SBUH obl. *calc.*	SWMM	SBUH
5.06.1963	55,88	53	2,261	2,076	2,076	2,030	–8,2	–10,2
14.06.1963	36,32	62	0,864	1,018	1,087	0,911	17,9	5,5
20.06.1963	37,08	72	0,828	1,025	1,078	0,944	23,8	14,0

Wartości najmniejszego i największego błędu względnego, ustalone na podstawie pomierzonych i obliczonych przepływów za pomocą modeli SWMM i SBUH, wynosiły odpowiednio 5,5 i 23,8% (tab. 2). Lepszą zgodność pomiędzy przepływami uzyskano przy użyciu modelu SBUH – wartości błędów względnych wynosiły poniżej 15%. Wartości błędów symulacji przepływów mniejsze od 25% świadczą o przydatności obu modeli do obliczeń w zlewniach zurbanizowanych.

Wyniki analiz w zlewni Potoku Służewieckiego

W tej części pracy przedstawiono wyniki obliczeń między innymi czasów koncentracji, czasów krytycznych trwania opadu oraz przepływów o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia, które prognozowano w czterech zlewniach cząstkowych Potoku Służewieckiego za pomocą dwóch rodzajów (klas) modeli: modelu SWMM i modelu SBUH.

Ustalone za pomocą modelu SWMM wartości czasu koncentracji t_c były różne nie tylko dla analizowanych zlewni cząstkowych, ale również dla poszczególnych zdarzeń o określonym prawdopodobieństwie (tab. 3). W obliczeniach przepływów zazwyczaj przyjmuje się stałą wartość czasu koncentracji dla określonej zlewni. W rzeczywistości ten parametr jest zmienny dla różnych zdarzeń opad–odpływ, bowiem zmianie ulega prędkość przepływu wody, a zatem zmienia się czas dopływu wody do profilu zamykającego. W tych analizach najmniejsze wartości czasu koncentracji ustalono dla zdarzeń o prawdopodobieństwie 1%,

Tabela 3. Wartości czasu koncentracji oraz czasu krytycznego trwania opadu ustalone w badanej zlewni

Values for time of concentration and critical storm duration established for the catchment studied

Numer przekroju *No. of cross-section*	Prawdopodob. *Probability* [%]	Czas koncentracji *Time of conc.* – t_c [min]	Czas krytyczny / *Critical time* [min]		
			SBUH – $t_{kr\,1}$	SWMM – $t_{kr\,2}$	SWMM – $t_{kr\,3}$
I	10	122	100	20	40
	2	110	90	20	30
	1	103	90	20	30
II	10	161	140	20	120
	2	149	130	20	150
	1	139	120	20	150
III	10	119	110	40	80
	2	104	100	50	80
	1	97	90	50	80
IV	10	370	170	20	260
	2	365	170	20	240
	1	343	140	20	240

Czas krytyczny trwania opadu / Critical storm duration:
$t_{kr\,1}$ – według modelu SBUH / calculated using the SBUH model;
$t_{kr\,2}$ – według modelu SWMM dla przepływu potencjalnego / calculated using the SWMM model for the potential flow;
$t_{kr\,3}$ – dla przepływu zredukowanego / for the reduced flow.

w każdej ze zlewni cząstkowych. W stosunku do zdarzeń o prawdopodobieństwie 10% ten czas był krótszy o około 20-30 minut.

Czasy krytyczne trwania opadu t_{kr} ustalono dla poszczególnych zdarzeń o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia za pomocą dwóch modeli (tab. 3). Stosując model SWMM wyznaczono te czasy w odniesieniu do „przepływów potencjalnych" i „przepływów zredukowanych". Czasy krytyczne opadów, dla których obliczono przepływy potencjalne ($t_{kr\,2}$) są bardzo krótkie we wszystkich zlewniach cząstkowych, niezależnie od prawdopodobieństwa tych przepływów; przeważnie wynosiły one 20 minut.

Wartości czasu krytycznego opadów ustalone za pomocą modeli SBUH ($t_{kr\,1}$) i modelu SWMM w odniesieniu do przepływów zredukowanych ($t_{kr\,3}$) są przeważnie znacznie dłuższe od tych dla przepływów potencjalnych. Czasy krytyczne trwania opadu są w większości przypadków krótsze od czasów koncentracji i zawierają się w przedziałach $(0{,}4\div1)t_c$ (przy medianie 0,9) oraz $(0{,}3\div1{,}1)t_c$ (przy medianie 0,7), odpowiednio w modelach SBUH i SWMM. Czasy krytyczne trwania opadu, obliczone za pomocą modelu SBUH dla zlewni cząstkowych ograniczonych przekrojami I, II i III, są w największym stopniu podobne do adekwatnych czasów koncentracji. Zależność pomiędzy analizowanymi czasami wynosi $(0{,}8\div1{,}0)t_c$ (przy medianie 0,9).

Niemieckie Stowarzyszenie Gospodarki Wodnej (DVWK, 1984) sugeruje, że krytyczna długość czasu trwania deszczu zawiera się w przedziale między długością czasu koncentracji a jego dwukrotnością $(1{,}0\div2{,}0)t_c$. K. Weinerowska-Bords (2010) stwierdziła, że wspomniana uwaga może być słuszna w zlewniach naturalnych. W swojej pracy przytacza również, że w przypadku zlewni zurbanizowanych za krytyczny czas trwania deszczu przyjmuje się czas koncentracji, a niekiedy jeszcze mniejszą wartość. Taką zależność potwierdziły wyniki analiz w niniejszej pracy, w których czasy krytyczne trwania deszczu były przeważnie mniejsze niż wartości czasu koncentracji.

W tabeli 4 zestawiono wartości przepływów o prawdopodobieństwach 10, 2 i 1%, prognozowanych za pomocą dwóch modeli w reakcji na przyjęte opady obliczeniowe. Uzyskane z modelu SWMM przepływy potencjalne (Q_2) są dużo większe od przepływów zredukowanych (Q_1) w poszczególnych przekrojach obliczeniowych. Wartości tych ostatnich zostały uwzględnione w koncepcji zabezpieczenia przeciwpowodziowego zlewni Potoku Służewieckiego (Waga-Bart, 2014).

Przepływ potencjalny dla poszczególnych zlewni cząstkowych był obliczany dla oddzielnych modeli zlewni utworzonych w programie SWMM, uwzględniających tylko obszar jednej z czterech analizowanych zlewni cząstkowych (utworzono w ten sposób 4 niezależne modele zlewni). Wartości spływu powierzchniowego (przepływu potencjalnego) z całego obszaru zlewni cząstkowych, ograniczonych poszczególnymi przekrojami obliczeniowymi, były odczytywane bezpośrednio w modelu za pomocą narzędzia do generowania raportu statystycznego. Przepływ potencjalny, który jest wynikiem spływu powierzchniowego z obsza-

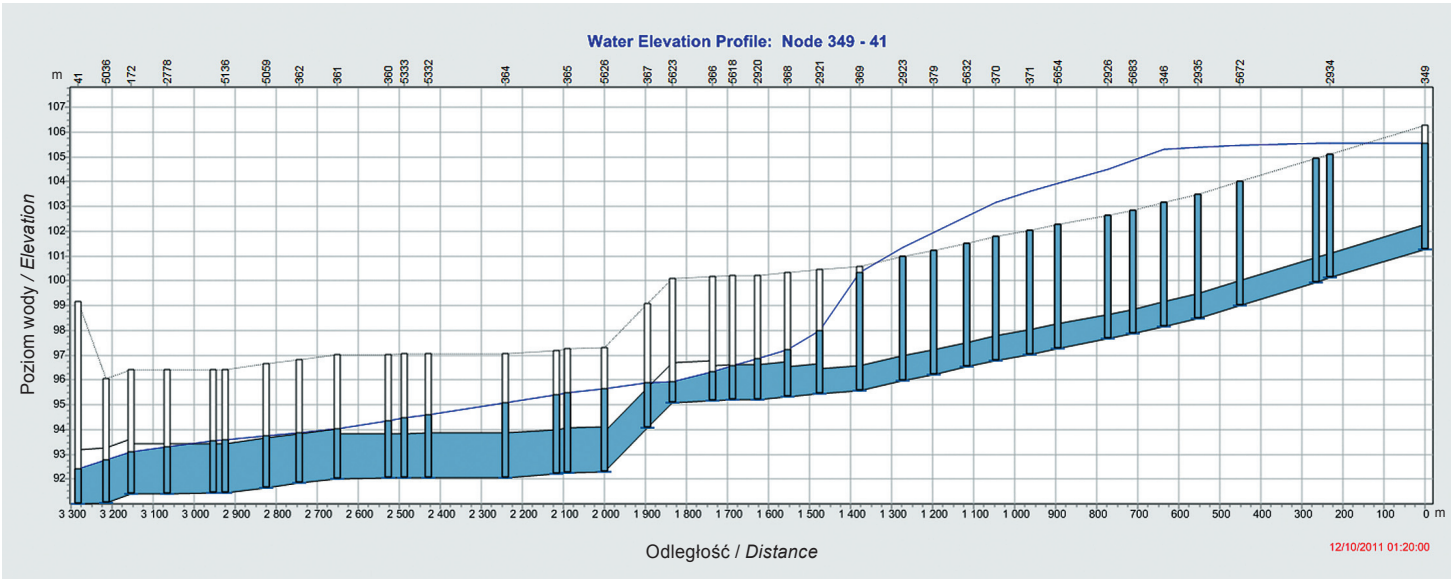
Tabela 4. Wartości przepływów maksymalnych obliczone w zlewni Potoku Służewieckiego
Calculated values for maximum flows in the catchment of the Służewiecki Stream

Numer przekroju *No. of cross-section*	Prawdo-pod. *Probabil.* [%]	Obliczone przepływy / *Calculated flows* [$m^3 \cdot s^{-1}$]				Współczynnik spływu *Runoff coefficient*	
		SWMM Q_1	SWMM Q_2	SBUH Q_3	SBUH Q_4	Ψ_1	Ψ_2
I	10	11,6	28,0	8,6	8,6	0,20	0,30
	2	13,3	41,3	13,1	13,1	0,14	0,34
	1	13,9	46,3	15,3	15,3	0,14	0,35
II	10	22,5	153,3	61,3	53,0	0,09	0,17
	2	27,8	226,9	93,7	93,5	0,10	0,19
	1	29,4	255,6	110,2	110,0	0,10	0,20
III	10	9,8	15,7	11,1	11,1	0,20	0,19
	2	12,0	19,8	17,5	17,5	0,19	0,22
	1	12,4	22,3	20,2	20,2	0,18	0,23
IV	10	13,1	180,6	41,0	37,8	0,08	0,16
	2	17,8	262,9	60,7	55,2	0,08	0,17
	1	18,4	296,3	69,9	65,1	0,07	0,18

Q_1, Q_2 – odpowiednio przepływy zredukowane i potencjalne / respectively the reduced and potential flows; Q_3 – przepływ obliczony dla czasu krytycznego trwania opadu / flow calculated in relation to the critical storm duration; Q_4 – przepływ obliczony dla czasu koncentracji / flow calculated in relation to the time of concentration; Ψ_1, Ψ_2 – współczynniki spływu dla przepływów Q_1 i Q_2 / runoff coefficients for flows Q_1 and Q_2

rów przepuszczalnych i nieprzepuszczalnych w poszczególnych zlewniach cząstkowych, zanim dotrze do przekroju zamykającego jest transformowany (redukowany) przez obiekty inżynierskie (przepusty, zbiorniki retencyjne, sieć kanalizacyjną, regulatory przepływu, pompownie, itd.) w badanej zlewni oraz w wyniku przepływu w ciekach. To powoduje, że wartości przepływu obliczonego w przekroju zamykającym (zredukowanego) są dużo mniejsze niż przepływu potencjalnego.

Na rycinie 2 przedstawiono profil podłużny kolektora deszczowego odwadniającego zlewnię cząstkową A_1 (ograniczoną przekrojem I) z widoczną linią ciśnień oraz poziomem wody w kolektorze i studzienkach rewizyjnych, które uzyskano z modelu SWMM w reakcji na opad o prawdopodobieństwie 1%. W górnym odcinku kolektora wody opadowe nie mieszczą się w kanałach i wylewają poprzez studzienki kanalizacyjne na powierzchnię terenu. W ten sposób zobrazowano jedną z przyczyn redukcji przepływów potencjalnych w badanej zlewni. W obliczeniach za pomocą modelu SWMM wybrano opcję, która uwzględnia



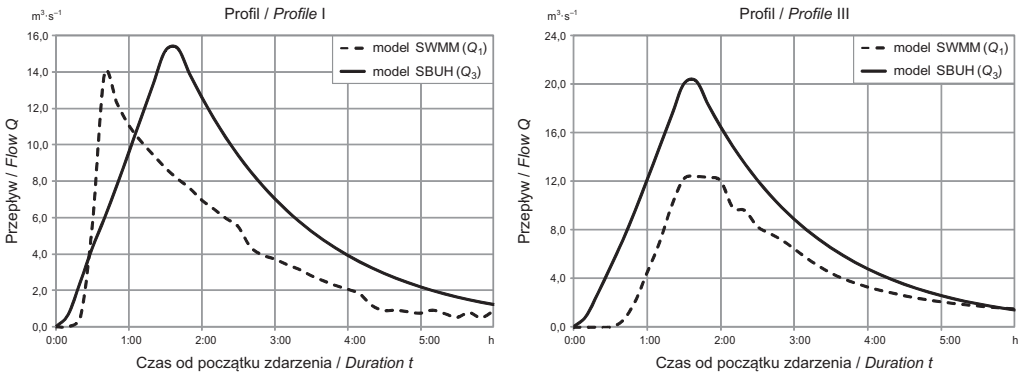
Ryc. 2. Linia ciśnienia i poziom wody w kolektorze obliczone w zlewni cząstkowej A1 (prawdopodobieństwo 1%)
The sewer pressure line and water level calculated for sub-catchment A1 (1% probability)

możliwość wypływu wód opadowych z kanałów deszczowych na powierzchnię terenu w wyniku przeciążenia kanałów i ich czasowej retencji do momentu systematycznego opróżniania kanałów. Arbitralnie przyjęto w modelu dla każdej studzienki kanalizacyjnej, że powierzchnia terenu objętego zalewem może wynosić 350 m^2. Zasięg zalewu i głębokość wody na powierzchni terenu nie były w tej pracy przedmiotem kalibracji i analiz.

Przyjmując do obliczeń w modelu SBUH czasy trwania opadu równe czasom koncentracji i czasom krytycznym trwania opadu (tab. 3), uzyskano w odniesieniu do poszczególnych zdarzeń identyczne lub podobne wartości przepływów o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia Q_3 i Q_4 (tab. 4). Największa różnica pomiędzy przepływami wynosiła 8,3 $m^3 \cdot s^{-1}$ (13,5%).

Aby ocenić przydatność modelu SBUH do prognozy przepływów o określonych prawdopodobieństwach w zurbanizowanej zlewni Potoku Służewieckiego, obliczone za pomocą tego modelu przepływy porównano z adekwatnymi przepływami uzyskanymi z modelu SWMM (tab. 4). Okazało się, że przepływy potencjalne obliczone za pomocą modelu SWMM (Q_2) są dużo większe od przepływów obliczonych w modelu SBUH (Q_3, Q_4). Z kolei przepływy zredukowane (Q_1) są dużo mniejsze niż uzyskane z modelu SBUH, ale tylko w odniesieniu do dwóch zlewni cząstkowych (A_2, A_4), ograniczonych przekrojami II i IV (zamykających zlewnie o powierzchniach 43,0 i 55,2 km^2). Lepszą zgodność pomiędzy tymi przepływami uzyskano dla zlewni cząstkowych ograniczonych przekrojami I oraz III, które mają niewielkie powierzchnie (4,51 i 6,23 km^2). Największa i najmniejsza różnica pomiędzy przepływami obliczonymi w tych przekrojach za pomocą modeli SWMM i SBUH (Q_1, Q_3) wynosiła odpowiednio 0,2 i 7,8 $m^3 \cdot s^{-1}$. Na rycinie 3 przedstawiono przykładowe hydrogramy przepływów, które prognozowano w wymienionych przekrojach obliczeniowych za pomocą obu modeli w reakcji na opad o prawdopodobieństwie 1%.

W zlewniach cząstkowych A_2 i A_4, w których stwierdzono dużą rozbieżność pomiędzy analizowanymi przepływami z modeli SWMM i SBUH, występują zbiorniki retencyjne (w tym zbiorniki na obszarze lotniska Chopina, współpracujące z zastawkami i pompami), jak również przepusty drogowe, które redukują przepływy kulminacyjne i jednocześnie znacząco opóźniają odpływ wód opadowych ze zlewni. Występowanie takich obiektów w zlewni stwarza trudność w ustaleniu właściwej wartości czasu koncentracji, od którego uzależniony jest parametr retencji zbiornika K_r w modelu SBUH. To z kolei ma wpływ na dokładność obliczania przepływów za pomocą tego modelu. Wyniki tych analiz można podsumować stwierdzeniem, że model SBUH, którego koncepcja opiera się na pojedynczym zbiorniku liniowym, może mieć ograniczone zastosowanie do obliczania przepływów w zlewniach miejskich o relatywnie dużej powierzchni oraz takich, w których znajdują się obiekty retencyjne powodujące znaczne opóźnienie odpływu (ze względu na trudności w wyznaczeniu właściwej wartości czasu koncentracji w takich zlewniach). Przyszłe analizy mogą być ukierunkowane



Ryc. 3. Hydrogramy obliczone w przekrojach I i III w reakcji na opad o prawdopodobieństwie 1%
Hydrographs calculated for profile I and III in response to rainfall of a 1% probability of occurrence

na uzyskanie większej zgodności pomiędzy przepływami obliczanymi za pomocą modeli SBUH i SWMM w odniesieniu do relatywnie dużych zlewni o dużej retencyjności, poprzez dostosowanie parametrów pierwszego z tych modeli.

Opisane analizy można odnieść do wyników prac innych autorów (Rao i inni, 1972), prowadzących badania nad zastosowaniem w zlewniach zurbanizowanych modeli konceptualnych składających się z kaskady zbiorników liniowych lub pojedynczego zbiornika liniowego. Wyniki ich badań wykazały, że współczynnik retencji pojedynczego zbiornika *K* jest zróżnicowany dla każdego ze zdarzeń obliczanych w określonym przekroju obliczeniowym. Autorzy stwierdzili także, że model składający się z pojedynczego zbiornika liniowego odpowiednio opisuje proces opad–odpływ tylko w małych zlewniach miejskich o powierzchni poniżej 13 km^2. R. Szymkiewicz i D. Gąsiorowski (2010) również twierdzą, że w większości praktycznych zagadnień pojedynczy zbiornik liniowy nie wystarcza do symulacji zachowania się obiektu rzeczywistego, jakim jest zlewnia powierzchniowa lub odcinek rzeki (efekt transformacji dopływu zwykle odbiega od efektów obserwowanych w warunkach rzeczywistych).

Na podstawie przepływów potencjalnych (Q_1) i zredukowanych (Q_2), wyznaczonych za pomocą modelu SWMM, obliczono współczynniki spływu (tab. 4). Przyjęto za R. Edelem (2009) i Z. Heidrichem (2009), że współczynnik spływu wyraża stosunek ilości wody deszczowej, która spłynie z danej powierzchni (w m^3·s^{-1}), do ilości, która spadła na tę powierzchnię (m^3·s^{-1}). Wartości współczynnika spływu dla przepływów potencjalnych (Ψ_2) zawierały się w zakresie od 0,16 do 0,35, a dla zredukowanych od 0,07 do 0,20. Największe wartości tej miary odpływu obliczono dla zlewni cząstkowych ograniczonych profilami I oraz III, znacznie mniejszych niż dwie pozostałe. Ponadto charakteryzuje je relatywnie

wysoki udział obszarów nieprzepuszczalnych, odpowiednio 43,9 i 38,3%. Odpływ z tych zlewni odbywa się za pośrednictwem gęstej sieci kanalizacji deszczowej.

Wyniki tej analizy są zgodne z informacją podaną przez R. Edela, że z reguły współczynnik spływu rozpatrywany dla danego cieku wodnego maleje wraz ze wzrostem powierzchni zlewni. Wyznaczone współczynniki spływu dla przepływów potencjalnych są stosunkowo małe i odpowiadają wartościom podawanym w literaturze dla zabudowy willowej lub luźnej (Edel, 2009). Współczynniki spływu dla przepływów zredukowanych mają jeszcze mniejsze wartości.

Przedmiotem analizy były również objętości, które obliczono dla poszczególnych hydrogramów o prawdopodobieństwie wystąpienia 10, 2 i 1% (przyjmując dla wszystkich zdarzeń jednakowy czas trwania wezbrania, wynoszący 24 godziny), uzyskanych z modeli SWMM i SBUH w odniesieniu do przepływów oznaczonych symbolami Q_1 i Q_3 (tab. 5). Wartości objętości fal wezbraniowych uzyskanych z modelu SBUH (V_2) są w każdym przypadku dużo większe od analogicznych obliczonych za pomocą modelu SWMM (V_1). Stosunek objętości V_2/V_1 wynosił od 1,3 do 2,0 (średnio 1,7).

Tabela 5. Wartości objętości obliczone dla hydrogramów uzyskanych z modeli
Volume values calculated for hydrographs obtained from the models

Numer przekroju *No. of cross-section*	Prawdopod. *Probability* [%]	Obliczone objętości *Calculated volumes* [tys. m³] [‘000 m³]	
		SWMM V_1	SBUH V_2
I	10	63,6	92,9
	2	80,1	126,9
	1	89,0	141,7
II	10	435,3	865,8
	2	628,5	1221,3
	1	687,5	1337,4
III	10	87,2	120,4
	2	120,2	167,6
	1	134,6	177,5
IV	10	594,6	1082,4
	2	832,7	1581,7
	1	884,4	1686,0

Wnioski

1. Weryfikacja modeli SWMM i SBUH w małej miejskiej zlewni położonej w Baltimore (USA) wykazała, że wartości błędów względnych symulacji przepływów były mniejsze od 25%. Lepszą zgodność pomiędzy przepływami pomierzonymi i symulowanymi uzyskano dla modelu SBUH – wartości błędów względnych wynosiły poniżej 15%.
2. Wartości czasu koncentracji, obliczone za pomocą modelu SWMM, były różne nie tylko dla analizowanych zlewni cząstkowych Potoku Służewieckiego, ale również dla poszczególnych zdarzeń o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia. Najmniejsze wartości czasu koncentracji ustalono dla zdarzeń o prawdopodobieństwie 1%.
3. Czasy krytyczne trwania opadu były krótsze od czasów koncentracji dla większości analizowanych zdarzeń o określonym prawdopodobieństwie i zawierały się w przedziałach $(0{,}4 \div 1{,}0)t_c$ (przy medianie 0,9) oraz $(0{,}3 \div 1{,}1)t_c$ (przy medianie 0,7), odpowiednio dla wartości czasu krytycznego uzyskanych z modeli SBUH i SWMM.
4. Przyjmując do obliczeń w modelu SBUH czasy trwania opadu równe czasom koncentracji i czasom krytycznym trwania opadu, uzyskano dla analizowanych zdarzeń identyczne lub zbliżone do siebie wartości przepływów maksymalnych.
5. Wartości przepływów zredukowanych (obliczone w czterech przekrojach dla zdarzeń o prawdopodobieństwie wystąpienia 10, 2 i 1 % z uwzględnieniem redukcji przepływów potencjalnych przez obiekty inżynierskie: zbiorniki, przepusty, kanalizacja deszczowa), które prognozowano za pomocą modelu SWMM, były dużo mniejsze niż wartości przepływów potencjalnych (spływu powierzchniowego) uzyskanych z tego modelu.
6. Dość dobrą zgodność pomiędzy przepływami obliczonymi za pomocą modeli SBUH i SWMM (przepływami Q_1, Q_3) uzyskano tylko dla małych zlewni cząstkowych ograniczonych przekrojami I oraz III (odpowiednio 4,51 i 6,23 km^2). Można wnioskować, że model składający się z pojedynczego zbiornika liniowego odpowiednio opisuje proces opad–odpływ jedynie w małych zlewniach miejskich.
7. Wartości współczynnika spływu dla przepływów potencjalnych i zredukowanych wyznaczonych za pomocą modelu SWMM, zawierały się w zakresie odpowiednio 0,16 ÷0,35 oraz 0,07÷0,20. Największe wartości tej miary odpływu obliczono dla zlewni cząstkowych ograniczonych profilami I oraz III, o małych powierzchniach.

Piśmiennictwo / References

ASCE, 1992, *Design & Construction of Urban Stormwater Management Systems*, ASCE, New York, NY.

Barco J., Wong K.M., Stenstrom M.K., 2008, *Automatic calibration of the U.S. EPA SWMM model for a large urban catchment*, Journal Hydraulic Engineering, 134, 4, s. 466-474.

Barszcz M., 2009, *Prognoza maksymalnych przepływów prawdopodobnych wywołanych ulewami w zurbanizowanej zlewni Potoku Służewieckiego*, Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, 4(46), s. 3-23.

Barszcz M., 2014, *Zastosowanie modelu Santa Barbara Unit Hydrograph do symulacji hydrogramu przepływów w zlewniach zurbanizowanych*, Przegląd Geograficzny, 86, 3, s. 295-306.

Barszcz M., 2015a, *Zastosowanie modelu SWMM do prognozy przepływów prawdopodobnych w zlewni miejskiej*, Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, 24(3), 69, s. 209-223.

Barszcz M., 2015b, *Influence of applying infiltration and retention objects on the runoff of rainwater on a plot and catchment scale – case study of the Służewiecki Stream subcatchment in Warsaw*, Polish Journal of Environmental Studies, 24, 1, s. 57-65.

Beven K., 2001, *Rainfall-Runoff Modelling*, *The Primer*, John Wiley & Sons, Ltd., England.

Bielawski Z., 1994, *Określenie charakterystyk odpływu z terenów zurbanizowanych na podstawie cech fizycznych zlewni i opadu*, Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, 5.

Bogdanowicz E., Stachý J., 1997, *Maksymalne opady deszczu w Polsce, charakterystyki projektowe,* Materiały badawcze IMGW, 23, Hydrologia i Oceanologia, 85.

DVWK, 1984, *Arbeitsanleitung zur Anwendung Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten*, Regeln zur Wasserwirtschaft, 113.

Edel R., 2009, *Odwodnienie dróg*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.

Gutry-Korycka M., 2007, *Odpływ ze zlewni zurbanizowanych*, Prace i Studia Geograficzne, UW, 38, s. 37-56.

Heidrich Z., 2009, *Kanalizacja deszczowa i oczyszczanie wód opadowych*, [w:] *Informacje Naukowe i Techniczne, 14, 1'05 (materiały konferencyjne), „Kształtowanie środowiska wodnego na terenach zurbanizowanych"*, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Wodnych i Melioracyjnych, Warszawa, s. 17-20.

Hubner W.C., Heaney D.A., Aggidis D.A., Dickinson R.E., Walace R.W., 1981, *Urban Rainfall-Runoff-Quality Data Base*, Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.

Maksimović Ć., Radojković M., 1986, *Urban Drainage Catchments. Selected Worldwide Rainfall-Runoff Data from Experimental Catchments*, Pergamon Press, A. Wheaton & Co., Exeter.

Oksiuta M., 2007, *Ocena odpływu wezbraniowego ze zlewni Potoku Służewieckiego w Warszawie*, Prace i Studia Geograficzne, UW, 38, s. 57-71.

Ozga-Zielińska M., Brzeziński J., 1997, *Hydrologia stosowana*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

Rao A.R., Delleur J.W., Sarma B.S.P., 1972, *Conceptual hydrologic models for urbanizing basins*, Proceedings of American Society CII. Engineers, Journal Hydraulic Division, 98(HY7), s. 1205-1220.

Rossman L.A., 2005, *Storm Water Management Model User's Manual version 4*, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati.

SCS, 1986, *Urban Hydrology for Small Watersheds*, Technical Release, 55, SCS (Soil Conservation Service), Washington, D.C.
Singh V.P., 1995, *Computer Models of Watersheds Hydrology*, Water Resources Publication, Colorado, USA.
Skotnicki M., Sowiński M., 2015, *The influence of depression storage on runoff from impervious surface of urban catchment*, Urban Water Journal, 12, 3, s. 207-218.
Stubchaer J.M., 1975, *The Santa Barbara urban hydrograph method*, [w:] *Proceedings of National Symposium on Urban Hydrology and Sediment Control. Univeristy of Kentucky, July 28-31*, Lexington, s. 131-141.
Szymkiewicz R., Gąsiorowski D., 2010, *Podstawy hydrologii dynamicznej*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
Tholin A.L., Keifer C.J., 1960, *The hydrology of urban runoff*, Transaction of American Society on Civil Engineers, 125, s. 1308-1379.
USDA-SCS, 1975, *National Engineering Handbook. Section 4*, U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, D.C.
Waga-Bart, 2014, *Przebudowa układu hydrologicznego obejmującego Potok Służewiecki i Rów Wolica w celu zabezpieczenia przeciwpowodziowego rejonu dolnego biegu Potoku Służewieckiego. Etap II*, Waga-Bart Specjalistyczna Pracownia Projektowa, Warszawa.
Wanielista M.P., Kersten R., Eaglin R., 1997, *Hydrology: Water Quantity and Quality Control*, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 2 wyd.
Warwick J.J., Tadepalli P., 1991, *Efficacy of SWMM application*, Journal Water Resources Planning Management, 117, s. 352-366.
Weinerowska-Bords K., 2010, *Czas koncentracji w uproszczonych obliczeniach odpływu ze zlewni zurbanizowanej*, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, 68, 1, s. 367-378.
Wenzel G.H., Voorhees M.L., 1980, *Adaptation of ILLUDAS for continuous simulation*, Journal ASCE, 106, HY11, Nov.
WMO (World Meteorological Organization), 1994, *Guide to Hydrological Practices*, WMO--No. 168, Geneva, Switzerland, 5 wyd.

[Wpłynęło: lipiec; poprawiono: listopad 2016 r.]

MARIUSZ BARSZCZ

COMPARISON OF FLOWS OF DEFINED PROBABILITIES OF OCCURRENCE CALCULATED IN AN URBAN CATCHMENT USING SWMM AND SBUH MODELS

This paper details work to estimate flows of defined probabilities of occurrence in the catchment of Warsaw's Służewiecki Stream, using the dynamic model known as the SWMM (Storm Water Management Model) and the conceptual model called the SBUH (Santa Barbara Urban Hydrograph). The comparability of flows calculated using the two different types of model was assessed in relation to four cross-sections. Relatively good agreement was only obtained for two sub-catchments covering relatively small areas. The SWMM model was used to calculate flows in cross-sections closing off particular sub-catchments, with account taken of transformation in open and closed channels, reduction by the presence of bodies of water and culverts ("reduced flows") and surface

runoff ("potential flows"). The values of these flows determined using the two methods proved similar in the two aforementioned sub-catchments characterised by small areas. Values for time of concentration were calculated using the SWMM model for individual events of defined probabilities of occurrence in the four sub-catchments, and it is likewise on this that the parameter of the routing constant K_r in the SBUH model depends. Comparisons with values relating to critical storm duration, as determined using the two models, were then made. These values in most cases indicated shorter periods than those relating to time of concentration. Results verifying the above models in a small urban catchment in Baltimore (USA) are also presented.

http://rcin.org.pl