

Błażej DZIEDZIELA\*

## **MODELOWANIE SPŁYWU I SKŁADU ŚCIEKÓW OPADOWYCH DLA RZECZYWISTEJ ZLEWNI MIEJSKIEJ**

W pracy przedstawiono wyniki kalibracji i weryfikacji modelu hydrodynamicznego rzeczywistej zlewni miejskiej. Omówiono podstawowe parametry brane pod uwagę przy modelowaniu matematycznym spływu powierzchniowego. Do badań wykorzystano wyniki pomiarów wykonanych na zlewni „Liściasta” w Łodzi. Dodatkowo określono efektywność oczyszczania osadnika wód deszczowych wraz z określeniem ładunków zanieczyszczeń zrzucanych do odbiornika ścieków – rzeki „Sokolówki”. Symulacje komputerowe (obliczenia numeryczne) wykonano przy użyciu programu EPA SWMM 5.1.007. W toku badań uzyskano wystarczające dopasowanie modelu do rzeczywistych wyników pomiarów zebranych na wylocie ze zlewni.

### **1. WPROWADZENIE**

Urbanizacja miast wraz z rozwojem ich infrastruktury komunikacyjnej wiąże się ze wzrostem powierzchni uszczelnionych. Proces ten bezpośrednio przekłada się to na wzrost strumienia spływu powierzchniowego oraz zwiększenie generowanych stężeń zanieczyszczeń w ściekach deszczowych.

Budowa i modernizacja takich elementów, jak drogi rowerowe, chodniki, czy parkingi powodują zwiększony spływ powierzchniowy, wiążący się ze wzrostem obciążenia hydraulicznego sieci kanalizacji deszczowej. Oprócz stresu hydraulicznego, spływy te generują znaczne ilości splukiwanych zanieczyszczeń stałych ze zlewni. Powoduje to m.in. sedymentację osadów w niektórych elementach sieci kanalizacji deszczowej (np. studniach osadczych) oraz zwiększenie zanieczyszczenia samego odbiornika ścieków (najczęściej są to rzeki). Dodatkowo zawiesiny wnoszą znacznie groźniejsze zanieczyszczenia np. dla ryb - metale ciężkie, czy frakcje biodegradowalne (organiczne).

---

\* Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych, Politechnika Łódzka, ul. Aleja Politechniki 6, 90-924 Łódź, e-mail: blazej.dziedziela@p.lodz.pl.

W związku z tym zasadna jest własciwa ocena iloŝci i składu scieków deszczowych, niezbędna przy podejmowaniu decyzji o inwestowaniu w obiekty ochrony wód przed ich zanieczyszczeniem.

## 2. CEL I ZAKRES BADAŃ

Celem prowadzonych badań jest stworzenie modelu hydrodynamicznego sieci oraz modelu splukiwania zanieczyszczeń na przykladzie miejskiej zlewni o zróżnicowanym charakterze zabudowy. Do tego celu wykorzystano program opracowany przez Amerykańską Agencję ochrony Środowiska (EPA) o nazwie SWMM (Stormwater Managment Model) w wersji 5.1.007. Uzyskane wyniki pozwalają na poznanie dynamiki splywu z rzeczywistej zlewni scieków opadowych wraz z zanieczyszczeniami. Pozwoli to w przyszłości na dokonywanie prognozy obciążenia odbiorników – rzek miejskich oraz planowanie w sposób racjonalny obiektów ochrony wód przed zanieczyszczeniem.

## 3. ZASADY MODELOWANIA CYFROWEGO

W ostatnich dekadach projektanci oraz gestorzy sieci kanalizacyjnych coraz częściej sięgają do narzędzi umożliwiających modelowanie splywu scieków deszczowych oraz modelowanie wskaźników ich zanieczyszczenia. Przede wszystkim ma to na celu poznanie rzeczywistego obciążenia kolektorów kanalizacyjnych oraz określenie dynamiki splywu zanieczyszczeń stałych z analizowanych zlewni. Modelowanie nie jest jednak sprawą prostą i jednoznaczną. Wymaga ono wielu informacji na temat zlewni – od rodzaju gruntu, czy spadku zlewni do np. określenia rodzaju zagospodarowania poszczególnych podzlewni. Dodatkowo do poprawnie wykonanego modelu na etapie jego kalibracji trzeba zaimplementować rzeczywiste dane pluwiometryczne [17, 18].

Zwiększona zawartość zawiesin w sciekach trafiających do odbiornika (np. rzeki) negatywnie wpływa na jego ekosystem, zaburza procesy samooczyszczania, utrudnia dostęp światła czy ogranicza rozpuszczalność tlenu w wodzie. Proces ten jest znacznie niebezpieczniejszy, ponieważ w/w zanieczyszczenia akumulują na swoich cząsteczkach inne, groźniejsze – głównie metale ciężkie (zagrożenie dla ryb) oraz zanieczyszczenia organiczne [1, 4].

Sytuacja ta niejako zmusza projektantów do posilkowania się narzędziami modelującymi dynamikę splywu zanieczyszczeń. Zachowanie takie pozwala na prawidłowe projektowanie systemów ochrony wód (np. separatorów wirowych, osadników itp.) oraz na świadome i przemyślane projektowanie sieci kanalizacji deszczowej na poszczególnych obszarach (m.in. odpowiednie lokalizowanie wpustów deszczowych, prawidłowe utrzymanie czystości na powierzchniach uszczelnionych itp.) [18, 19].

Problemy te oraz trudności obliczeniowe (np. ich złożoność i czasochłonność) powodują potrzebę użycia odpowiednich programów do modelowania cyfrowego. Na rynku oprogramowania dostępnych jest wiele programów (np. Storm, Bentley SewerCAD, HYDROWORKS, Mike Urban), jednak w większości są one płatne, co ogranicza ich szerokie zastosowanie. Istnieją jednak programy (np. EPA SWMM), będące aplikacjami zarówno darmowymi i ogólnodostępnymi [9, 19].

Do modelowania hydrodynamicznego sieci kanalizacji deszczowej w niniejszej pracy wykorzystano program EPA SWMM 5.1. Tworzy on model cyfrowy bilansu „opad-odpływ” dla danej zlewni, traktowanej jako zbiornik nieliniowy [5, 14]. W znacznym stopniu bilans ten zależy od natężenia jednostkowego opadu atmosferycznego oraz charakterystyki podstawowych parametrów zlewni (np. spadku terenu, szerokości pasa spływu itp.). Wymaga on dokładnego rozpoznania terenu, jego budowy geologicznej, pokrycia, ukształtowania oraz źródeł zasilania.

Zastosowany w badaniach program SWMM wyznacza tzw. bilans szczegółowy, który oprócz opadu i odpływu bierze pod uwagę również straty spowodowane parowaniem, infiltracją do gruntu oraz retencją terenową. W obliczeniach inżynierskich najważniejszą kwestią jest określenie rzeczywistego spływu ścieków ze zlewni do odbiornika, co w pełni umożliwia wyżej opisywany program.

Model odpływu ścieków opadowych w programie EPA SWMM wyraża równanie [5, 9 13, 14]:

$$Q_o = W \frac{(d - d_p)^{5/3}}{n} i^{0.5} \quad (1)$$

gdzie:

$Q_o$  – odpływ ścieków deszczowych ze zlewni [ $m^3/s$ ],

$W$  – hydrologiczna szerokość pasa spływu [m],

$n$  – współczynnik szorstkości wg Manninga dla określonej powierzchni spływu [ $s/m^{1/3}$ ],

$d$  – głębokość strumienia spływu [m],

$d_p$  – wysokość retencji terenowej w nierównościach terenu [m],

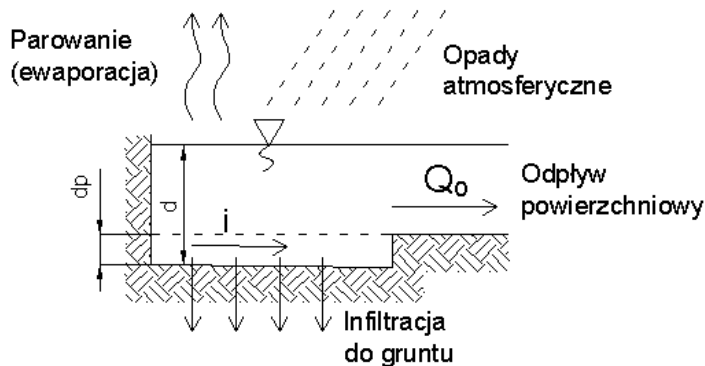
$i$  – spadek terenu danej podzlewni [%].

Taki model pozwala określić odpływ powierzchniowy do systemu kanalizacji czy odbiornika ścieków. Schemat obliczeniowy programu obrazuje rys. 1.

Wyniki symulacji numerycznej zależą m.in. od opcji prowadzonych obliczeń. Podczas analiz, obliczenia numeryczne w programie SWMM przeprowadzono metodą fali dynamicznej, gdyż można ją uznać za najdokładniejszą i najlepiej odwzorowującą rzeczywistą pracę kanalizacji deszczowej [14]. Uwzględnia ona takie elementy jak:

- a) pracę kanałów deszczowych pod ciśnieniem,
- b) zmianę kierunku przepływu ścieków w kanale (tzw. cofki),
- c) retencję kanałową ścieków,

- d) miejscowe wylewania ponad teren (wynikające z przeciążenia systemu kanalizacyjnego).



Rys. 1. Model zbiornika nieliniowego używany w programie SWMM

Model hydrodynamiczny, wykorzystywany w programie SWMM, zawiera szereg parametrów, których wartości mogą być określone tylko w wyniku kalibracji, gdyż nie da się ich wyznaczyć z pomiarów bezpośrednich. Są one często wielkościami umownymi lub uśrednionymi w skali podzlewni [5, 14]. Można je podzielić następująco:

- parametry splywu powierzchniowego – średni spadek powierzchni zlewni, szerokość splywu, szorstkość powierzchni jako miara oporów przeplywu,
- wielkość retencji terenowej – wysokość opadu przechwytywana na powierzchni,
- parametr infiltracji opadu do gruntu – maksymalna i minimalna szybkość infiltracji do gruntu, parametr obniżania się tej szybkości w czasie zgodnie z równaniem Horton oraz okres wysychania gruntu,
- parametry retencji nadmiaru wód opadowych na powierzchni – powierzchnia objęta zalewem w rejonie przeciążonej studzienki kanalizacyjnej.

Do parametrów modelu zalicza się czasami także efektywny stopień uszczelnienia zlewni. Większość opracowań naukowych określa tę wartość w oparciu o zagospodarowanie zlewni i w takim wypadku nie powinna być ona poddawana kalibracji [18, 19].

W niniejszej pracy przy przygotowywaniu danych do symulacji komputerowej wykorzystano zarówno plan zagospodarowania przestrzennego zlewni, jak i wizję lokalną. Pozwoliło to na dość precyzyjne określenie stopnia uszczelnienia poszczególnych podzlewni. W razie braku możliwości zinventaryzowania danej powierzchni (np. ze względu na jej powierzchnię czy złożony charakter), ocena w/w stopnia opiera się wyłącznie o plany zagospodarowania przestrzennego danego obszaru.

W badaniach przyjęto również takie założenia obliczeniowe jak:

- typ splywu – OUTLET - splyw realizowany jest zarówno ze zlewni uszczelnionych jak i nieuszczelnionych wprost do kanalizacji deszczowej,

- b) infiltrację wód opadowych do warstw gruntu wg modelu Hortona,
- c) współczynnik szerokości spływu  $k = 0,5$ , niezbędny do określenia szerokości pasa spływu zlewni ( $W$ ).

#### 4. PROBLEMY MODELOWANIA SPŁUKIWANIA ZANIECZYSZCZEŃ

Jako podstawowy parametr definiujący stopień zanieczyszczenia zlewni traktuje się zawiesinę ogólną. Badania wykonane przez wielu autorów potwierdzają, że największy udział w spływie powierzchniowym mają zawiesiny [17, 18]. Jednakże w prowadzonych badaniach oznaczeniu podlega również mętność prób, ich chemiczne zapotrzebowanie tlenu oraz zawiesina mineralna i lotna. W przyszłości pozwoli to na wykazanie korelacji między w/w wskaźnikami zanieczyszczenia i porównania ich z danymi literaturowymi. Naukowcy są zgodni co do tego, że wzrost stężenia zawiesin przenosi się na wzrost BZT<sub>5</sub> i ChZT [2]. W innych eksperymentach udowodniono, że zawiesina jest odpowiedzialna za transport zanieczyszczeń np. WWA (wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych) do systemu kanalizacyjnego [6].

Oznaczenia wykonano się zgodnie z normą PN-EN 872: 2007 - Jakość wody - Oznaczenie zawiesin – Metoda z zastosowaniem filtracji przez sączi z włókna szklanego [11]. W badaniach, chemiczne zapotrzebowanie na tlen (ChZT) w ściekach deszczowych oznaczono wg zaleceń normy PN-74/C-04578/03 [12].

Dotychczasowe badania wykazały, iż stężenie dopuszczalne zawiesin ( $100 \text{ mg/dm}^3$ ), określone przez ówczesnie obowiązujące Rozporządzenie Ministra Środowiska [15], na odpływie ze zlewni jest permanentnie przekraczane, średnio dwukrotnie. Podczas opadów nawalnych sytuacja znacznie się pogarsza i wówczas wskaźnik ten przekroczony jest kilkukrotnie.

Niestety, trudno jest ustalić jednoznaczne korelacje między zanieczyszczeniami podczas pogody mokrej, z uwagi na wiele cech indywidualnych danych systemów, rodzajów zlewni, jakości ścieków suchej pogody itp. Jednakże w dalszym toku badań będą prowadzone prace pozwalające na wykazanie zależności między poszczególnymi wskaźnikami zanieczyszczeń.

W prowadzonych badaniach do modelowania spłukiwania zanieczyszczeń ze zlewni został wykorzystany program SWMM, który opiera się na modelu obliczeniowym definiowanym jako deterministyczny. Oznacza to iż, wyniki są otrzymywane na podstawie określonych równań i parametrów. Model ten oparty jest na stałych zmiennych deterministycznych o wartości znanej w każdym momencie symulacji. Innymi słowy jest to model, w którym wielkości wejściowej przypisano jednoznacznie wielkość wyjściową za pomocą określonej zależności funkcyjnej. Modele te nie uwzględniają losowego rozrzutu wartości zmiennych.

Model SWMM oparty jest na zasadzie tzw. „białej skrzynki” (ang. *white-box*), czyli takim, co do którego działania mamy pełną wiedzę i jesteśmy w stanie opisać go odpowiednim modelem matematycznym. Jeżeli mamy możliwie dużą wiedzę przed symulacją, to jesteśmy w stanie otrzymać znacznie dokładniejsze wyniki, które powinny być zgodne z rzeczywistością.

Program SWMM składa się z dwóch modułów obliczeniowych [14]:

- a) modelu akumulacji zanieczyszczeń w okresie pogody suchej, który bierze pod uwagę m.in.:
  - tempo (szybkość) nagromadzenia zanieczyszczeń stałych na zlewni,
  - efektywność zmiatania zanieczyszczeń na zlewni przez wiatr, ruch kołowy,
- b) modelu splukiwania zanieczyszczeń stałych ze zlewni przez opady atmosferyczne, który wykorzystuje do symulacji:
  - natężenie opadu atmosferycznego,
  - spadek zlewni,
  - podatność zanieczyszczeń na splukiwanie.

W trakcie dalszych badań planowane jest stworzenie modelu nagromadzenia i splukiwania zanieczyszczeń z analizowanej zlewni.

Z przeprowadzonego przeglądu literatury jednoznacznie wynika, iż tempo nagromadzenia zanieczyszczeń znacznie się różni i zależy od rodzaju zlewni referencyjnej [2, 3]. Rozrzut przyjmowanych wartości parametru szybkości nagromadzenia jest znaczny i wynosi wg literatury przedmiotu od 0,16 [3] do 18,0 [4] kg/(ha x d).

Oprócz tego trzeba wziąć pod uwagę kontinuum opadowe przy obliczeniach w SWMM dla dłuższego przedziału czasu - np. danego roku czy sezonu, aby zachować ciągłość akumulacji, ponieważ nieodzownie łączy się to z modelowaniem ładunku nagromadzonych zanieczyszczeń na zlewni przed opadem. Problemem również okazało się szacowanie częstotliwości i skuteczności procesu zmiatania ulic, który to może kształtować się w dość szerokim spektrum wartości.

W programie SWMM ilość nagromadzonych zanieczyszczeń jest funkcją liczby poprzedzających dni pogody suchej. Szybkość akumulacji w modelu SWMM można wyrazić przy pomocy kilku formuł [14]:

- a) funkcja potęgowa – aktualne nagromadzenie zanieczyszczeń jest proporcjonalnie do czasu,
- b) funkcja wykładnicza (wykorzystana w niniejszej pracy),

$$B = C_1(1 - e^{-C_2t}) \quad (2)$$

gdzie:

$B$  – nagromadzenie zanieczyszczeń [kg/ha],

$C_1$  – maksymalne graniczne nagromadzenie zanieczyszczeń (do wyboru masa zanieczyszczeń na jednostkę powierzchni lub na długość linii krawężnika), [kg/ha],

$C_2$  – szybkość ubywania zanieczyszczeń (w wyniku wiatru i wynoszenia przez pojazdy) [ $d^{-1}$ ].

c) funkcja nasycenia nagromadzenia zanieczyszczeń.

Model splukiwania zanieczyszczeń w programie SWMM można przedstawić w postaci kilku formuł empirycznych:

a) formuła wykładnicza w funkcji strumienia spływu efektywnego ścieków (wykorzystana w niniejszych badaniach):

$$W = C_1 q^{C_2} B \quad (3)$$

gdzie :

$W$  – splukany ładunek zanieczyszczeń [kg/ha],

$C_1$  – współczynnik szybkości splukiwania zanieczyszczeń,

$C_2$  – współczynnik potęgowy,

$q$  – intensywność spływu powierzchniowego [mm/h],

$B$  – nagromadzenie zanieczyszczeń [kg/ha].

b) formuła krzywej wzorcowania w funkcji strumienia przepływu ścieków,

c) formuła określające stałe stężenie splukiwanych zanieczyszczeń (brana jest pod uwagę średnia z poszczególnego opadu).

Niestety wyżej wymienione modele akumulacji i splukiwania zanieczyszczeń mają pewne ograniczenia:

- nie wnikają w istotę procesów rzeczywistych zachodzących na zlewni, opierają się wyłącznie o formuły matematyczne,
- nie mają rozgraniczenia grubości frakcji (wymiarów charakterystycznych) zanieczyszczeń,
- aby przypisać konkretne tempo nagromadzenia zanieczyszczeń lub ich splukiwanie dla danej podzlewni trzeba dysponować odpowiednimi danymi pomiarowymi,
- stały charakter współczynników  $C_1$  i  $C_2$ , który wyklucza określenie sezonowości w procesie akumulacji zanieczyszczeń,
- trudność w określeniu efektywności oraz częstotliwości zmiatania zlewni, zarówno przez ruch pojazdów, jak i przez działanie wiatru,
- problem dostępu do wiarygodnych danych dotyczących opadu pyłu z atmosfery.

W dalszym toku badań będą prowadzone analizy dotyczące określenia zróżnicowania tempa akumulacji w zależności od okresu czasowego, branego pod uwagę.

Program SWMM umożliwia modelowanie stężenia zanieczyszczeń skojarzonych z parametrem zawiesin ogólnych, takich jak np. metale ciężkie, czy ChZT. W razie potrzeby podaje się wyłącznie ich udział w zawiesinie (tzw. „*co-pollutant*”)[7]. Obliczenia w programie SWMM sprowadzają się do określenia rodzaju analizowanych zanieczyszczeń oraz tempa ich nagromadzenia na poszczególnych rodzajach zlewni. Każdemu z opisanych wcześniej zanieczyszczeń można przypisać inny wskaźnik skojarzony, np. dla zawiesin

– metale ciężkie, jako drobną frakcją zawieszin (podajemy nazwę tego wskaźnika i jego udział). Następnie dla każdego ze wskaźników głównych należy podać typ funkcji modelowej i współczynniki do modelu nagromadzenia (*buildup*) oraz spłukiwania (*washoff*).

Dla każdej ze zlewni cząstkowych należy zadeklarować udział powierzchni o różnym stopniu zanieczyszczenia („*Land uses*”) oraz ewentualnie początkowe nagromadzenie zanieczyszczeń np. TSS w [kg/ha] (o ile jest ono znane). Następnie należy określić częstotliwość zmiatania, jego skuteczność oraz okres od ostatniego zmiatania. Dodatkowo w opcji programu: „*Options/dates*” należy podać okres suchej pogody przed pierwszym opadem (*antecedent dry days*) oraz okres zmiatania (*start sweeping, end sweeping*). Wynikiem modelowania w/w programie jest przebieg zmian ładunku danego zanieczyszczenia w czasie.

W modelu spłukiwania zanieczyszczeń parametrem podlegającym w badaniach kalibracji był współczynnik szybkości spłukiwania. Natomiast w modelu nagromadzenia zanieczyszczeń parametrem podlegającym kalibracji był współczynnik akumulacji. Wstępne wyniki kalibracji modelu przedstawiono w tabeli 1. Natomiast klasyfikację poszczególnych typów podzlewni pod kątem stopnia nagromadzenia zanieczyszczeń przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 1. Wyniki kalibracji modelu akumulacji i spłukiwania zanieczyszczeń w programie SWMM

Parametr kalibrowany	Symbol	Jedn.	Wartość
Graniczne nagromadzenie zanieczyszczeń dla powierzchni bardzo zanieczyszczonych	$C_1$	kg/ha	100
Efektywność zmiatania ulic	$\eta$	%	80
Okres pomiędzy zmiataniem ulic	$t_z$	d	14
Okres pogody suchej przed opadem	$t_o$	d	5
Graniczne nagromadzenie zanieczyszczeń dla powierzchni mało zanieczyszczonych	$C_1$	kg/ha	30
Współczynnik ubytku zanieczyszczeń wg literatury	$C_2$	1/d	0,1
Współczynnik spłukiwania zanieczyszczeń	$C_1$	-	0,1
Współczynnik potęgowy	$C_2$	-	1,7

Tabela 2. Udział poszczególnych rodzajów powierzchni wchodzących w skład analizowanej zlewni

Przyjęte nagromadzenie zanieczyszczeń	Znaczne – 100 kg/ha					Niskie – 30 kg/ha		
	Kostka brukowa	Chodnik	Asfalt	Dachy	Półprzepuszczalna	Zieleń	Dachy zielone	Grunt rodzimy
Powierzchnia [ha]	1.05	1.34	0.82	1.99	0.46	5.92	0.16	0.15
Stopień uszczelnienia [%]	80	70	95	99	50	3	10	10

Z tabeli 2 wynika jednoznacznie, że stosunek powierzchni uszczelnionych do nieuszczelnionych jest korzystny dla gospodarki wodno-ściekowej badanego obszaru. Powierzchnie nieuszczelnione stanowią aż ok. 56%, co zmniejsza strumień spływają-



cych ścieków deszczowych do rzeki Sokołówki. Ponadto tak znaczny stopień powierzchni nieuszczelnionych powoduje większą retencję terenową i opóźnienie czasowe spływu ścieków deszczowych.

Tak więc, z praktycznego punktu widzenia model deterministyczny programu SWMM wymaga wielu trudnych do zdobycia lub wyznaczenia danych:

- a) częstości i efektywności zmiatania zanieczyszczeń na zlewni,
- b) natężenia ruchu kołowego,
- c) ilości pyłu opadającego na teren zlewni,
- d) kontinuum opadowego z wielolecia.

Otrzymane dotąd wyniki dotyczące modelowania ładunku splukiwano ze zlewni potwierdzają niewielkie nagromadzenie zanieczyszczeń, co potwierdza charakter analizowanego obszaru miejskiego.

Dotychczas określono wstępne ładunki zawiesin ogólnych zrzucanych do odbiornika ścieków (rzeki „Sokołówki”). Zostały one ustalone w odniesieniu do powierzchni zredukowanej (uszczelnionej) i kształtują się one na poziomie od ok. 15,0 do nawet 170 kg/ha. Tak zmienne spektrum otrzymanych wyników zależy od wielu czynników – m.in. natężenia opadu, jego wysokości czy liczby dni suchej pogody przed opadem.

Na podstawie przeprowadzonych analiz ścieków pobranych z osadnika ścieków deszczowych na jego dopływie i odpływie obliczono jego sprawność oczyszczania biorąc pod uwagę zawiesinę ogólną jako wskaźnik zanieczyszczenia ścieków opadowych. Efektywność technologiczna zbiornika retencyjno-sedymentacyjnego okazała się zadowalająca i wyniosła średnio aż 65%.

## 5. CHARAKTERYSTYKA ZLEWNI REFERENCYJNEJ

Do wykonania poprawnego modelu matematycznego wykorzystano wyniki pomiarów na zlewni „Liściasta” w Łodzi, przeprowadzonych w latach 2012–2015. Analizowany obszar miejski, określany jako zlewnia „Liściasta”, znajdujący się w północnej części Łodzi. Nazwa zlewni pochodzi od ulicy i osiedla mieszkaniowego. Zlewnia referencyjna należy do dzielnicy Bałuty i ma charakter mieszkaniowy. Na jej terenie nie znajdują się zakłady przemysłowe, występują jedynie małe obiekty handlowe i administracyjne.

Projekt modelu kanalizacji deszczowej wykonano dla obszaru obejmującego powierzchnię ok. 11,9 ha. Jest on przedzielony ul. Liściastą na dwa rejony:

- a) w kierunku północnym ograniczonym ul. Czeręśniową – występuje zabudowa jednorodzinna – dwukondygnacyjne budynki mieszkalne;
- b) w kierunku południowym ograniczonym rzeką Sokołówką (wraz ze zbiornikiem retencyjnym) – występuje zabudowa wielorodzinna – 5 kondygnacyjne bloki mieszkaniowe.

Na podstawie atlasu geologicznego miasta Łodzi [10], przyjęto, że zlewnię stanowią gleby typu gliny zwałowe oraz piaski wodnolodowcowe, charakteryzujące się niską zdolnością infiltracji. W/w gleby zalegają na głębokości do 4 m (większe głębokości są nieistotne dla prowadzonych analiz). Wysokość zalegania wód podziemnych występuje powyżej 2 m p.p.t. Średnie zagłębienie kanalizacji deszczowej na zlewni referencyjnej wynosi od 2,0 do 3,0 m.

Stosunkowo mała powierzchnia zlewni umożliwiła dokładną jej inwentaryzację, w celu zwiększenia dokładności przeprowadzonych obliczeń. W ten sposób określono nie tylko rodzaj zagospodarowania terenu, ale również jego spadek. Z przeprowadzonej inwentaryzacji terenowej zlewni wynika, że ścieki deszczowe pochodzą z:

- a) dachów zabudowy jednorodzinnej pokrytych papą smołową, blachą z arkuszy ocynkowanych, blachodachówki i dachówki ceramicznej,
- b) dachów zabudowy wielorodzinnej pokrytych głównie papą smołową,
- c) chodników betonowych, brukowych i asfaltowych,
- d) dróg asfaltowych kategorii 3 (szerokości 5–10 m) oraz uliczek wewnątrzsiedlowych wykonanych z asfaltu oraz betonu,
- e) parkingów zbudowanych z płyt betonowych, trylinki, kostki brukowej oraz nawierzchni asfaltowych.

Dane dla tej zlewni, tj. przebieg sieci kanalizacyjnej oraz zlewnie cząstkowe poszczególnych kanałów, zostały zaczerpnięte z planów budowy kanałów kanalizacji (lata 80-tych XX wieku) oraz z map cyfrowych.

W wyniku wizji lokalnej oraz planu przestrzennego zagospodarowania określono typy poszczególnych powierzchni zlewni pod kątem ich stopnia uszczelnienia oraz zanieczyszczenia. Udział poszczególnych powierzchni uszczelnionych wchodzących w skład analizowanej zlewni, stopnie ich uszczelnienia oraz ich klasyfikacja pod kątem stopnia nagromadzenia zanieczyszczeń przedstawia tabela 2.

Spadek zlewni ukształtowany jest w kierunku rzeki „Sokołówki”, dlatego wszystkie wody opadowe można odprowadzać systemem kanalizacyjnym w sposób grawitacyjny. Sieć kanalizacji deszczowej ze względu na małą powierzchnie zlewni wykonana jest w znacznym stopniu z kanałów kołowych o małych średnicach (K do 0,5 m). Natomiast ścieki bytowo-gospodarcze odprowadzane są do Grupowej Oczyszczalni Ścieków w Łodzi. Analizom podlegała wyłącznie kanalizacja deszczowa. Ścieki deszczowe z powierzchni uszczelnionych w znacznym stopniu spływają w/w siecią do zbiornika retencyjno-sedymentacyjnego (zwanego dalej Oczyszczalnią Wód Deszczowych – OWD) kolektorem K 0,5 m. Następnie podczyszczone ścieki wpływają do rzeki Sokołówki. Na podstawie obserwacji wywnioskowano, iż kanalizacja deszczowa na nie ma połączeń z kanalizacją bytowo-gospodarczą a dopływ infiltracyjny, widoczny podczas pogody suchej, jest znikomo mały (ok. 0,5 dm<sup>3</sup>/s).

## 6. OPIS STANOWISKA BADAWCZEGO

Stanowisko badawcze zostało stworzone do pomiarów dynamiki spływu ścieków i zanieczyszczeń ze zlewni „Liściasta”.

W celu weryfikacji stworzonego modelu w 2012 roku podjęto decyzję o opomiarowaniu zbiornika retencyjno-sedymentacyjnego, który stanowi ochronę odbiornika ścieków – rzeki Sokołówki. W połowie 2012 roku rozpoczęto regularne pomiary. Stanowisko na dopływie do osadnika i odpływie do odbiornika przystosowano do zamierzonych planów badań, a obiekt został wyposażony w odpowiednią aparaturę kontrolno-pomiarową.

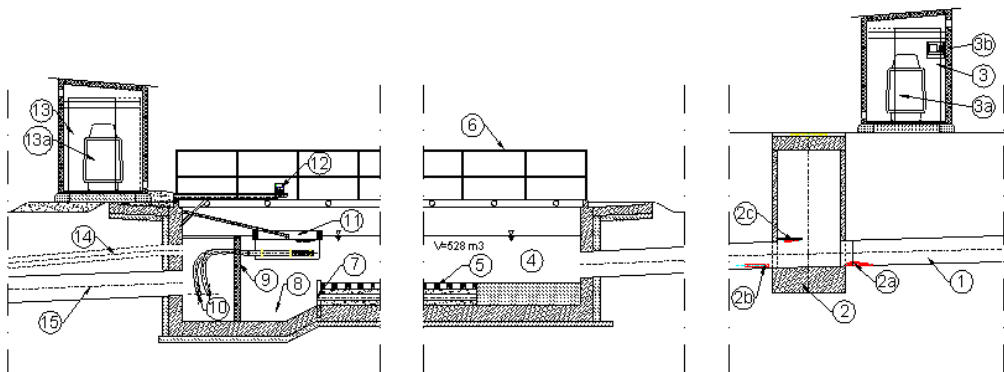
Stanowisko na wlocie zaopatrzone w zintegrowany zestaw pomiarowy do rejestracji strumienia przepływu - ultradźwiękową sondę napęnlennia i prędkości firmy NIVUS GmbH, zainstalowaną w kolektorze dopływowym do osadnika ścieków deszczowych. Ponadto na dopływie do osadnika umieszczono panel sterowniczy OCM PRO CF firmy NIVUS GmbH oraz aparat do automatycznego poboru prób – sampler typu 6712FR w obudowie całorocznej, firmy TELEDYNE ISCO, współpracujący bezpośrednio z systemem pomiaru przepływu. Pobór reprezentatywnej objętości ścieków deszczowych na wlocie następuje po przekroczeniu określonego progu czułości sondy napęnlennia, z objętościowym interwałem poboru, określanym w zależności od prognozowanej intensywności opadów. Pomiary ciągle realizowane przez te urządzenia posiadają wymaganą dokładność.

Ponadto stanowisko na odpływie z osadnika zaopatrzone w czujnik NivuCompact firmy Nivus GmbH do pomiaru napęnlennia zbiornika współpracujący z drugim samplerem typu 6712FR firmy TELEDYNE ISCO. Układ tych urządzeń pozwala na pobór prób do badań analitycznych z określonym interwałem czasowym na wylocie z osadnika ścieków deszczowych, po wystąpieniu spływu ścieków opadowych z danej zlewni.

W toku kalibracji sond napotkano wiele problemów dotyczących m.in. interwału poboru prób, czasu jednostkowego poboru czy objętości prób. Problemy te udało się na bieżąco rozwiązywać.

Umieszczenie sond w kanale również podlegało częstym modyfikacjom, głównie ze względu na charakter kanalizacji – rzadkie, ale gwałtowne przepływy, nierównomierność w czasie i szybko zmienny w czasie strumień przepływu.

Schematyczny system opomiarowania stanowiska badawczego uwidoczniony jest na rys. 2.



Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego zlewni referencyjnej „Liściasta”

## Oznaczenia:

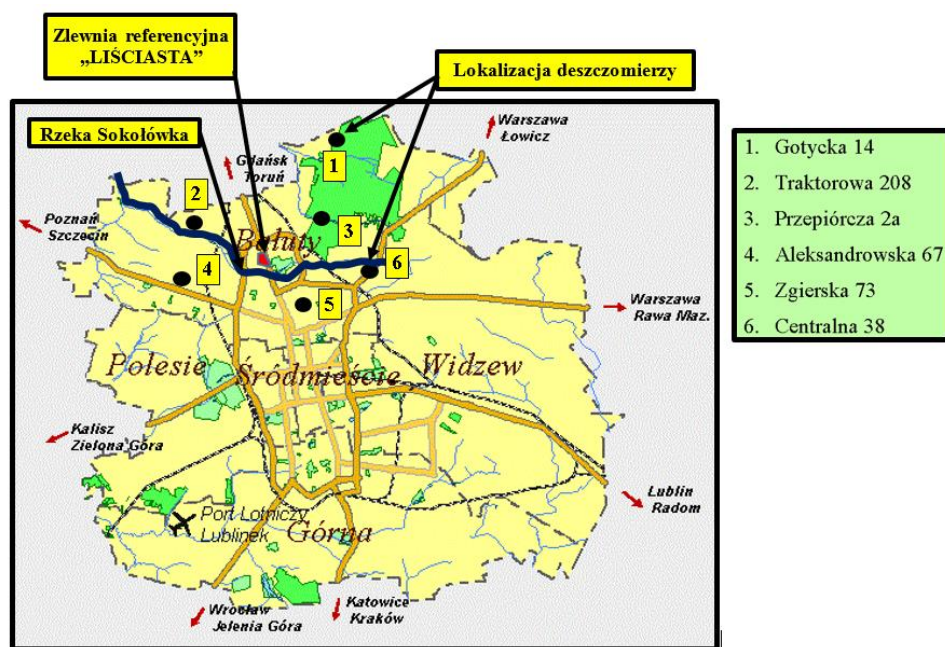
1. Kanał dopływowy K 0,5 m do osadnika ścieków opadowych;
2. Studnia pomiarowa Dn1800 z:
  - sondą prędkości przepływu (2a);
  - koszem ssawnym pobieraka próbek (2b);
  - sondą napelnienia w kanale (2c);
3. Szafka na aparaturę kontrolno-pomiarową (na dopływie) zawierająca:
  - sampler 6712FR (3a);
  - przepływomierz OCM PRO CF (3b);
4. Zbiornik retencyjno-sedymentacyjny o pojemności ok. 528 m<sup>3</sup>;
5. Płyty ażurowe 900x600 mm;
6. Bariierka ochronna;
7. Rury drenażowe Ø100 mm;
8. Niecka odpływowa zbiornika wód opadowych;
9. Ścianka przelewowa z cegły ceramicznej pełnej;
10. Otwory odpływowe ze zbiornika 4 x Ø80;
11. Pobierak (dekanter) na ramieniu uchylnym;
12. Czujnik ultradźwiękowy napelnienia - NivuCompact na stałym wsporniku;
13. Szafka na aparaturę kontrolno-pomiarową (na odpływie) zawierająca:
  - sampler 6712FR (13a);
14. Przelew awaryjny osadnika wód deszczowych K 0,3 m;
15. Kanał odpływowy K 0,5 m z osadnika ścieków opadowych.

System pomiarowy wieńczy sieć 6 pluwiometrów, a najbliższy z nich oddalony jest od zlewni ok. 1,5 km (jest on zlokalizowany na terenie Instytutu Przemysłu Skórzanego przy ul. Zgierskiej).

Pluwiometr typu SEBA RG-50 na bieżąco monitoruje wysokość opadów. Ponadto do dyspozycji dostępne są inne pobliskie stanowiska pomiaru opadów, włączone w miejską sieć pluwiometryczną łódzkiej Spółki Infrastrukturalnej (ŁSI) oraz częściowo Uniwersytetu Łódzkiego (UŁ), a mianowicie:

- przy ul. Centralnej – teren hydroforni,
- przy ul. Gotyckiej – okolice klasztoru w Łagiewnikach,
- przy ul. Traktorowej – SUW,
- przy ul. Aleksandrowskiej 67,
- przy ul. Przepiórczej – pluwiometr UŁ.

Rozmieszczenie przestrzenne deszczomierzy w obrębie analizowanej zlewni ukazuje rys. 3.

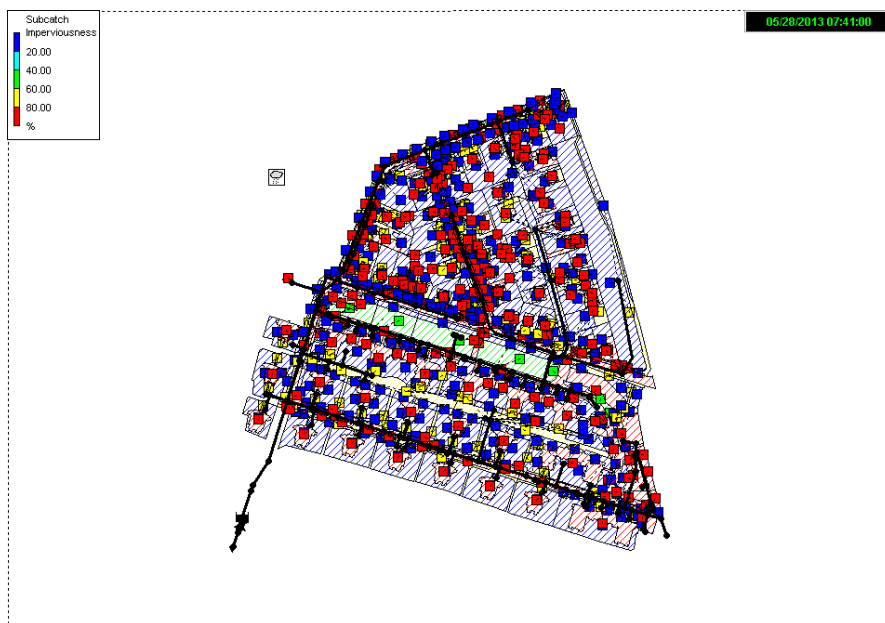


Rys. 3. Rozmieszczenie pluwiometrów w obrębie analizowanej zlewni „Liściasta”

Pluwiometry umożliwiają porównanie zapisów opadów, a także korektę zapisów z ul. Zgierskiej przez uwzględnienie poprawek dla środka ciężkości zlewni „Liściasta” metodą przestrzennej interpolacji wyników, którą dla poszczególnych opadów wykonano przy pomocy programu SURFER v.10, firmy Golden Software, na siatce o rozdzielczości przestrzennej – 40 x 40 m, przy życiu algorytmu liniowego (*linear kriging*). Interpolacja pozwoliła na dokładniejsze określenie rzeczywistych opadów nad analizowaną zlewnią.

## 7. CYFROWY MODEL ZLEWNI

W celu oceny poprawności danych pomiarowych oraz umożliwienie prognozowania sypływów kanalizacją deszczową, przy użyciu programu SWMM, opracowano cyfrowy model zlewni „Liściasta” wraz z siecią kanalizacji deszczowej. Na rys. 4 przedstawiono schemat zlewni wg formatu programu SWMM z zaznaczeniem stopnia uszczelnienia zlewni cząstkowych oraz sieci kanalizacji deszczowej wraz z OWD „Liściasta”.



Rys. 4. Schemat zlewni referencyjnej wg formatu programu SWMM

Model ten został następnie skalibrowany na podstawie danych pomiarowych z lat 2012–2014 – pomiarów pluwiometrycznych oraz pomiarów strumienia dopływu do OWD. Dane opadowe zostały sprowadzone na środek rozpatrywanej zlewni przez interpolację pomiarów z wymienionych wcześniej stanowisk pluwiometrycznych.

Proces kalibracji przeprowadzono etapami. W pierwszym etapie przyjęto wartości parametrów na podstawie kalibracji modelu SWMM na bazie badań terenowych, wykonanych w latach 1987–1991 dla zlewni „Dąbrowa Przemysłowa” w Łodzi [17], a następnie parametry te kilkakrotnie zmieniano stosownie do wyników obliczeń, dopasowując zgrubnie do siebie pomierzone i modelowane strumienie przepływu na odpływie ze zlewni.

Etap drugi polegał na minimalizacji błędu dopasowania obliczeń do pomiarów poprzez dobór jednego tylko parametru – szerokości spływu powierzchniowego, który okazał się parametrem najbardziej wrażliwym.

Obliczenia w programie SWMM zostały przeprowadzone z krokiem symulacji równym 15 sek., metodą fali dynamicznej, gdyż uznano ją za najdokładniejszą i najlepiej odwzorowującą rzeczywistą pracę kanalizacji deszczowej. Wyniki obliczeń zapisywane były z krokiem 1 minuty.

Infiltrację wód opadowych do gruntu w modelu obliczeniowym przyjęto wg dynamicznej formuły Hortona. W obliczeniach przyjęto, iż spływ nadmiarowy z powierzchni uszczelnionych oraz nieuszczelnionych kierowany jest bezpośrednio do kanalizacji deszczowej.

Tabela 3 przedstawia uzyskane wartości kalibrowanych oraz przyjętych zgodnie z literaturą przedmiotu [17, 18, 19] parametrów użytych do symulacji komputerowej.

Tabela. 3. Parametry modelu SWMM uzyskane w wyniku kalibracji oraz przyjęte wg literatury dla zlewni „Liściasta”.

<b>Parametry kalibrowane</b>	<b>Oznaczenie</b>	<b>Wartość</b>	<b>Jedn.</b>
Współczynnik szerokości pasa spływu	<i>k</i>	0,5	-
Średni spadek podzlewni	% Slope	2,0-7,0	%
Współczynnik Manninga dla powierzchni uszczelnionych	<i>N</i> - Imperv	0,02	-
Wysokość retencji terenowej dla powierzchni uszczelnionych	Dstore-Imperv	1,5	mm
Udział powierzchni bez retencji	%Zero-Imperv	25	%
Maksymalny współczynnik szybkości infiltracji do gruntu	Max.InfiRate	90	mm/h
Minimalny współczynnik szybkości infiltracji do gruntu	Min.InfiRate	5	mm/h
Współczynnik zmniejszania się szybkości infiltracji	Decay constant	4	1/h
Współczynnik Manninga dla sieci przewodów	Roughness	0,02	-
<b>Parametry przyjęte na podstawie literatury</b>	<b>Oznaczenie</b>	<b>Wartość</b>	<b>Jedn.</b>
Współczynnik Manninga dla powierzchni nieuszczelnionych	<i>N</i> - Perv	0,1	-
Wysokość retencji terenowej dla powierzchni nieuszczelnionych	Dstore-Perv	5	mm
Czas całkowitego wysychania gruntu	Drying time	7	d
Powierzchnia zalewu terenu	Ponded area	10	m <sup>2</sup>

## 8. WYNIKI BADAŃ

Na wykresach (rys. 5 i 6) przedstawiono wybrane wyniki pomiarów wraz z rezultatami modelowania po kalibracji modelu dla charakterystycznych opadów w okresie 2012–2014. Zastosowano tryb obliczeń dla kontinuum czasowego – tzn. symulacji komputerowej nie podlegały pojedyncze opady, lecz cały okres opadów np. rocznych. Metoda ta pozwoliła na uwzględnienie ciągłej retencji zlewni, co powoduje, że na-

stępny opad o tym samym natężeniu będzie generował większy spływ ścieków deszczowych.

Na osi 0,X opisana jest godzina i data wystąpienia przepływu ścieków deszczowych w kolektorze, natomiast na osi 0,Y wartość strumienia przepływu w  $\text{dm}^3/\text{s}$ . Wykres oznaczony linią czarną przedstawia wartości otrzymane w wyniku modelowania, a linią szarą pokazuje wartości otrzymana z pomiarów.



Rys. 5. Wyniki pomiarów i modelowania strumienia dopływu dla zjawiska 2013.05.27



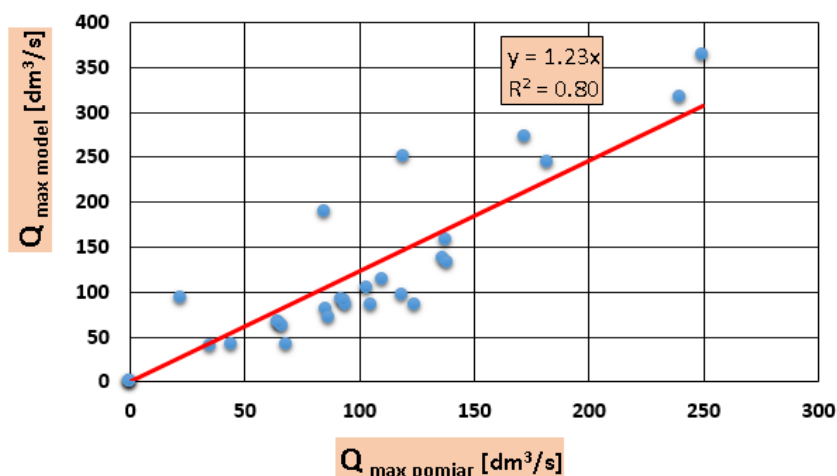
Rys. 6. Wyniki pomiarów i modelowania strumienia dopływu dla zjawiska 2014.09.09

Przedstawione wyniki modelowania wskazują, iż dla części zjawisk, modelowane wartości strumienia dopływu są nieco większe, niż zmierzone. Wskazuje to na ko-



nieczność weryfikacji modelu w najbliższym czasie. Zauważalne są także w niektórych przypadkach przesunięcia czasowe hydrogramu modelowanego. Przyczynę tego faktu można upatrywać w wędrowce opadu oraz lokalnych różnicach natężenia opadu, nie ujętych w zapisach pluwiometrycznych.

Wartość maksymalnego strumienia przepływu w kolektorze na wylocie ze zlewni do OWD przyjęto jako podstawową wielkość kryterialną. Jest ona proporcjonalna do objętości spływu ze zlewni. W celu oceny jakości kalibracji modelu został sporządzony wykres (rys. 7) korelacji przepływów maksymalnych – modelowanych i rzeczywistych dla opadów miarodajnych. Uzyskano współczynnik determinacji  $R^2 = 0,8$ , co świadczy o dobrym dopasowaniu modelu do otrzymanych wyników pomiarów.



Rys.7. Korelacja maksymalnego strumienia przepływu rzeczywistego i modelowanego dla opadów miarodajnych

## 9. WNIOSKI

1. Wykonany i skalibrowany cyfrowy model zlewni wiernie oddaje rzeczywisty spływ ścieków z analizowanej zlewni. Przeprowadzone badania mają duże znaczenie dla praktyki inżynierskiej. Potwierdzają one możliwość dokładnej predykcji wielkości odpływu ścieków opadowych ze zlewni zurbanizowanej.
2. Otrzymane wyniki kalibracji modelu SWMM mogą służyć w modelowaniu spływu ścieków opadowych ze zlewni o podobnej charakterystyce. Po wprowadzeniu danych o zlewni oraz parametrów opadu model może zatem być przeniesiony na inną – podobną zlewnię rzeczywistą.

3. Przedstawione wyniki pomiaru splywu sciekow ze zlewni „Liściasta” wykazują dobrą zgodność z modelem cyfrowym. Wynik taki należy przypisać przede wszystkim dysponowaniem zapisów pluwiometrycznych ze stanowiska pomiarowego usytuowanego blisko analizowanej zlewni „Liściasta”. Wyniki te zatem mogą być pomocne w tworzeniu modeli splywu sciekow opadowych dla innych zlewni kanalizacyjnych na terenie Łódzkiej Aglomeracji Miejskiej (ŁAM).
4. Sprawność technologiczna OWD „Liściasta” okazała się wysoka (ponad 50%), jednak zostało to osiągnięte dzięki dodaniu ścianki piętrzącej ścieki i zastosowaniu dekantera do odbioru sciekow sklarowanych (Oryginalny projekt OWD nie przewidywał takiego rozwiązania, a odbiór sciekow miał następować drenażem, ułożonym pod dnem perforowanym. Rozwiązanie to nie sprawdziło się z uwagi na kolmatację drenażu i dna perforowanego. Z kolei duży przewód odpływowy nie powoduje spiętrzenia sciekow w osadniku).
5. Przeprowadzone badania pozwalają na poznanie dynamiki zmian poziomu i emisji zanieczyszczeń z analizowanej zlewni w konfrontacji z charakterystykami opadów o rożnym natężeniu jednostkowym i czasie trwania. W przyszłości będą one pomocne przy weryfikacji i zmiany obecnych przepisów dotyczących projektowania i kontroli funkcjonowania systemow kanalizacyjnych w taki sposób, aby gwarantowało to minimalizację zanieczyszczenia odbiornikow wodnych, a także umożliwiło zagospodarowanie wód opadowych w środowisku zurbanizowanym, poprawiając jego walory krajobrazowe i rekreacyjne.
6. Prognozowanie strumienia sciekow deszczowych splywających z terenow zurbanizowanych przy użyciu symulacji komputerowych (znacznie dokładniejszych od tradycyjnych metod obliczeniowych) pozwala na realne określenie obciążenia hydraulicznego odbiornikow sciekow oraz podejmowania świadomych decyzji dotyczących budowy systemow kanalizacyjnych (np. zbiornikow retencyjnych). Z całą pewnością wyniki te będą podstawą do wdrożenia działań, poprawiających stan środowiska wodnego na terenach zurbanizowanych, a także umożliwią podejmowanie optymalnych decyzji i rozwiązań dotyczących gospodarki wodno-ściekowej w/w obszarow.

#### LITERATURA

- [1] BERRY W., RUBINSTEIN N., MELZIAN B., HILL B., *The Biological Effects of Suspended and Bedded Sediment (SABS) in Aquatic Systems: A Review. Internal Report.*, U.S. EPA, 2003.
- [2] CHARBENEAU R.J., BARRETT M.E., *Evaluation of methods for estimating stormwater pollutant loads.*, Water Environmental Research, Nov/Dec. 1998, 70, 7, 1295–1302.
- [3] CIAPONI C., MUTTI M., PAPIRI S., *A conceptual model for the estimation of loadograph in sewer networks during meteorological events.*, 2nd International Conference “New trends in Water and Environmental Engineering for Safety and Life: Ecocompatible Solutions for Aquatic Environments”, Capri, June 24–28, 2002.

- [4] EVEN S., MOUCHEL J.M., SERVAIS P., FLIPO N., POULIN M., BLANC S., CHABANEL M., PAFFONI C., *Modelling the impacts of combined sewer overflows on the river Seine water quality.*, Science of the Total Environment 375 (1-3), 140–151, 2007.
- [5] FRENI G., MAGLIONICO M., DI FEDERICO V., *State of the art in Urban Drainage Modelling.*, University of Bologna (Work Package Leader), University of Palermo (Sub-Task Leader), 2003.
- [6] GAJUK D., WIDOMSKI M.K., MUSZ A., ŁAGÓD G., *Modelowanie numeryczne w ilościowej i jakościowej ocenie możliwości rozbudowy sieci kanalizacji deszczowej.*, Proceedings of ECOpole, Vol. 5, No. 1, 2011.
- [7] HERNGREN L., GOONETILLEKE A., AYOKO G.A., *Understanding heavy metal and suspended solids relationships in urban stormwater using simulated rainfall.*, Journal of Environmental Management, 76, 149–158, 2005.
- [8] KAŹMIERCZAK B., NOWAKOWSKA M., *Hydrodynamiczny model odprowadzania wód opadowych SWMM.*, Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska., Tom 2., Praca zbiorowa pod red. Teodory M. Traczewskiej., Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2012.
- [9] KOTOWSKI A., *Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów.*, Wydawnictwo Seidel-Przywecki (Wydanie I), Warszawa 2011.
- [10] MAJER K., *Atlas geologiczno-inżynierski aglomeracji łódzkiej*, Warszawa, 2012.
- [11] NORMA PN-74/C-04578/03., *Badania zapotrzebowania tlenu i zawartości węgla organicznego. Oznaczanie chemicznego zapotrzebowania tlenu (ChZT) metodą dwuchromianową.*
- [12] NORMA PN-EN 872:2007., *Jakość wody - Oznaczanie zawiesin – Metoda z zastosowaniem filtracji przez sączki z włókna szklanego.*
- [13] NOWOGOŃSKI I., WIRA J., *Kalibracja hydrauliczna modelu SWMM przy wykorzystaniu danych z badań na terenie miasta Głogów.*, Instal, 2006, No. 9, 81–84.
- [14] ROSSMANN L. A., *Storm Water Management Model. User's Manual.*, Version 5.0. United States Environmental Protection Agency, 2010.
- [15] *Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego, Dz.U. nr 137, poz.984.*
- [16] SŁYŚ D., *Zrównoważone systemy odwodnienia miast.*, Wrocław, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2013.
- [17] ZAWILSKI M., *Prognozowanie wielkości odpływu i ładunków zanieczyszczeń ścieków opadowych odprowadzanych z terenów zurbanizowanych.*, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, nr 792, 1997.
- [18] ZAWILSKI M., SAKSON G., *Modelowanie splywu ścieków opadowych ze zlewni miejskiej przy wykorzystaniu programu SWMM. Część II. Weryfikacja modelu.*, Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 9, 321–323, 2011.
- [19] ZAWILSKI M., SAKSON G., *Modelowanie splywu ścieków opadowych ze zlewni miejskiej przy wykorzystaniu programu SWMM. Cz.I. Kalibracja modelu.*, Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 11, 32–35, 2010.

MODELING RUNOFF AND COMPOSITION OF STORMWATER  
FOR A REAL URBAN SUBCATCHMENT

The paper presents the results of the calibration and verification of the hydrodynamic model of a real urban catchment. The basic parameters to be taken into account in the mathematical modeling of the surface runoff have been discussed. The study used the results of flow measurements made on a catchment "Liściasta" in Lodz. In addition, the effectiveness of stormwater treatment in a storage-settling tank together with determining pollutant loads discharged into the stormwater receiver – the river "Sokołówka". Computer simulations was performed using the EPA SWMM 5.1.007 software. In the course of the study the model was adequate fitted to the actual measurements gathered at the outlet of the catchment.