

Marcin SKOTNICKI  
Marek SOWIŃSKI  
Instytut Inżynierii Środowiska  
Politechnika Poznańska

## WYKORZYSTANIE OPADÓW SYNTETYCZNYCH W MODELOWANIU ODPLYWU ZE ZLEWNI MIEJSKICH

W publikacji przedstawiono wyniki analizy relacji między parametrami syntetycznych opadów a odpływem ze zlewni. Rozpatrywano wpływ lokalizacji maksimum intensywności deszczu w hietogramie, czasu trwania opadu oraz prawdopodobieństwa przewyższenia na przepływ szczytowy i objętość odpływu. Do transformacji opadu w odpływ z przykładowej zlewni miejskiej wykorzystano model komputerowy SWMM5. Wyniki symulacji w warunkach przepływu beczniennego nie potwierdzają podstawowego założenia metody granicznych natężeń, zgodnie z którym maksymalny przepływ w kanale zapewnia deszcz o miarodajnym czasie trwania równym czasowi przepływu z najdalszego punktu zlewni do rozpatrywanego przekroju kanału powiększonym o czasy retencji terenowej i kanałowej. Stwierdzono, że w przekrojach kontrolnych o czasach miarodajnych do 30 min największy odpływ wywołują opady o czasie trwania 15 min. Obliczenia w warunkach przeciążenia kolektorów wykazały, że największa objętość wypływu ścieków na powierzchnię terenu jest generowana przez deszcze z maksimum intensywności na początku opadu.

### 1. Wprowadzenie

Jednym z podstawowych zastosowań symulacji działania systemów kanalizacji deszczowej jest wspomaganie projektowania, zarówno na etapie wymiarowania przekrojów kanałów jak i podczas oceny stopnia zabezpieczenia terenu przed wylaniem ścieków z przeciążonych kanałów [4]. Modelowanie nieustalonych przepływów wód opadowych w sieci kanałów zalecane jest przede wszystkim dla dużych systemów o powierzchni ponad 200 ha [10], a może być stosowane również dla mniejszych zlewni [6]. Wykorzystanie modeli symulacyjnych wymaga dysponowania odpowiednimi danymi opadowymi. Mogą to być hietogramy wzorcowe opadu syntetycznego, serie zarejestrowanych opadów rzeczywistych czy też serie opadów syntetycznych [4, 7, 8]. Dla celów projektowania systemów kanalizacyjnych szczególnie przydatne są hietogramy wzorcowe, z uwagi na prosty sposób opracowania i ograniczoną, zwłaszcza

w warunkach krajowych, dostępność historycznych danych opadowych. W publikacji podjęto temat wyboru rodzaju hietogramu opadu syntetycznego na potrzeby obliczeń symulacyjnych w warunkach przepływu ze swobodnym zwierciadłem oraz przeciążenia kanałów i przepływu ciśnieniowego.

## 2. Analizowana zlewnia i jej model

Symulacje odpływu prowadzono z użyciem modelu komputerowego zlewni, wykonanego w programie SWMM5, umożliwiającego obliczenia spływu powierzchniowego oraz przepływu w kanałach w warunkach nieustalonych [9]. W modelu uwzględniono łącznie 82 odcinki kanałów oraz 55 zlewni cząstkowych. Powierzchnie zlewni cząstkowych oraz parametry modelu spływu powierzchniowego adoptowano z modelu zlewni kolektora „Piaśnicy”, znajdującej się w Poznaniu i obejmującej tereny zabudowy osiedlowej o wielkości 6,7 km<sup>2</sup>. Obszar ten jest objęty monitoringiem opadów i odpływu [12] i stanowi obiekt analiz wykonywanych przez zespół autorów, co zwiększa wiarygodność wyników symulacji w stosunku do uzyskiwanych dla zlewni syntetycznych. Wartości parametrów modelu zlewni zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości parametrów modelu analizowanej zlewni

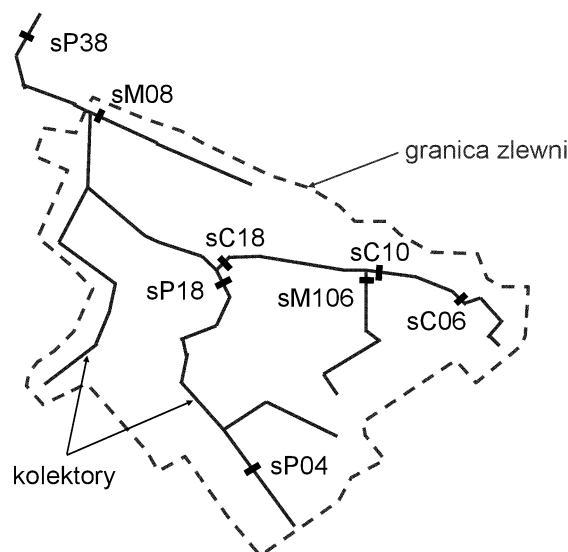
parametr	rodzaj powierzchni	
	uszczelniona	przepuszczalna
nachylenie zlewni [-]	0,005	
współczynnik szorstkości powierzchni zlewni wg Manninga [s/m <sup>1/3</sup> ]	0,015	0,100
retencja powierzchniowa [mm]	1,5	5,0
infiltracja maksymalna [mm/h]	-	75,0
infiltracja minimalna [mm/h]	-	12,5
stała infiltracji [h <sup>-1</sup> ]	-	4
współczynnik szorstkości kanałów wg Manninga [s/m <sup>1/3</sup> ]	0,018	

Stopień uszczelnienia ustalono indywidualnie dla każdej zlewni cząstkowej, biorąc pod uwagę powierzchnię dachów i ulic. Długość drogi spływu (L) ze zlewni cząstkowych przyjęto jednakową dla wszystkich zlewni, równą 75 m [13]. Parametry infiltracji ustalono na podstawie porównania wyników symulacji i pomiarów dla największego deszczu zarejestrowanego w czasie realizowanych pomiarów [14]. Na drodze symulacji ustalono, że dla tych wartości nie następuje spływ z powierzchni przepuszczalnych dla opadu o prawdopodobieństwie przewyższenia  $p \leq 0,5$ .

W modelu sieci kanalizacyjnej wykorzystywanym w publikacji zachowano istniejącą strukturę sieci, obejmującą podział na odcinki obliczeniowe i spadki dna. Średnice istniejących kanałów skorygowano, aby zapewnić warunki przepływu bezciśnieniowego dla deszczu o prawdopodobieństwie 0,5. System był

bowiem wymiarowany na podstawie innych formuł opadowych i wykorzystanie w omawianej analizie wzoru IMGW, zapewniającego większe wartości opadów dla danej częstości niż np. wzór Błaszczyka spowoduje wystąpienie przeciążeń kanałów. Będący ich wynikiem przepływ ciśnieniowy prowadzi do deformacji kształtu hydrogramu odpływu (redukcja przepływu szczytowego), co zakłóca wyniki i utrudnia ich ocenę.

Na sieci kanałów wyznaczono 8 przekrojów kontrolnych, w których analizowano kształty hydrogramów odpływu (rys. 1).



Rys. 1. Lokalizacja wyznaczonych przekrojów kontrolnych na terenie zlewni

Jako podstawę wytypowania przekrojów przyjęto miarodajny czas dopływu, obliczany na bazie czasu przepływu przez kanały według zasad odpowiadających metodzie granicznych natężeń (MGN). Przy określaniu czasu miarodajnego dla przekroju kontrolnego założono, że czas przepływu jest wyznaczany dla przepływu bezciśnieniowego przy całkowitym napełnieniu kanału. Czas retencji kanałowej przyjęto równy 20% czasu przepływu a czas koncentracji terenowej ustalono na 10 min [1]. Wydzielono następujące kategorie przekrojów kontrolnych (tab. 2):

- kategoria 1 – przekroje charakteryzujące się czasem miarodajnym  $t_M$  mniejszym lub równym 30 min (przyjęto tolerancję +5% wartości granicznej),
- kategoria 2 – przekroje o czasie miarodajnym w przedziale od 30 do 60 min,
- kategoria 3 – przekroje, dla których czas miarodajny jest większy od 60 min

Tabela 2. Charakterystyka wybranych przekrojów kontrolnych

nazwa przekroju kontrolnego (węzła sieci)	kategoria przekroju kontrolnego i graniczny czas miarodajny	miarodajny czas przepływu (wg MGN)	powierzchnia zlewni	stopień uszczelnienia zlewni
		$t_M$ [min]		
sC06	1 ( $t_M \leq 30$ min)	29,1	37,1	0,08
sM08		24,0	39,9	0,19
sM106		31,0	69,9	0,45
sP04		31,1	31,8	0,31
sC10	2 ( $30 \text{ min} < t_M \leq 60 \text{ min}$ )	41,3	62,7	0,12
sP18		52,0	231,1	0,33
sC18		53,9	261,9	0,29
sP38	3 ( $t_M > 60 \text{ min}$ )	73,4	671,1	0,29

### 3. Syntetyczne opady obliczeniowe

W obliczeniach symulacyjnych wykorzystano trzy kształty hietogramów syntetycznych. Założono, że we wszystkich analizowanych hietogramach, dla danego czasu trwania, wysokość opadu jest taka sama. Do wyznaczenia tej wysokości wykorzystano zależność opracowaną przez IMGW [2]. Aby uniknąć zmian formuł w zależności od czasu trwania deszczu w rejonie północno-zachodnim, właściwym ze względu na rzeczywistą lokalizację zlewni, dla uproszczenia w obliczeniach przyjęto rejon centralny:

$$P_{\text{MAX}}(t, p) = 1,42 \cdot t^{0,33} + \left[ 1,693 \cdot \ln \left( \frac{t}{1} + 1 \right) - 1,249 \right] \cdot \ln p^{0,584} \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

gdzie:

$t$  - czas trwania deszczu [min]

$p$  - prawdopodobieństwo przewyższenia opadu [-]

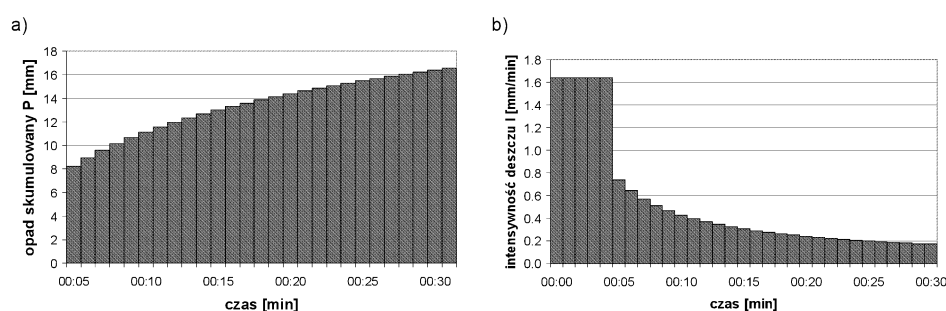
Prawdopodobieństwa przewyższenia uwzględniane w obliczeniach ustalono zgodnie z PN-EN.752:2008 równe 0,5 jako zalecane dla terenów mieszkaniowych do wymiarowania przekrojów kanałów i 0,05 dla kontroli zalewania terenu [4].

Czasy trwania opadów przyjmowano jako równe wielokrotności minimalnego czasu trwania deszczu, który założono równy 15 minut. W analizie wykorzystano deszcze o czasach trwania z zakresu od 15 do 90 minut.

Pierwszym rozpatrywanym hietogramem (hietogram typu A) jest opad o stałej w czasie intensywności (deszcz blokowy). Intensywność deszczu ( $I$ ) jest obliczana jako iloraz skumulowanej wysokości opadu ( $P$ ), wyznaczonej według

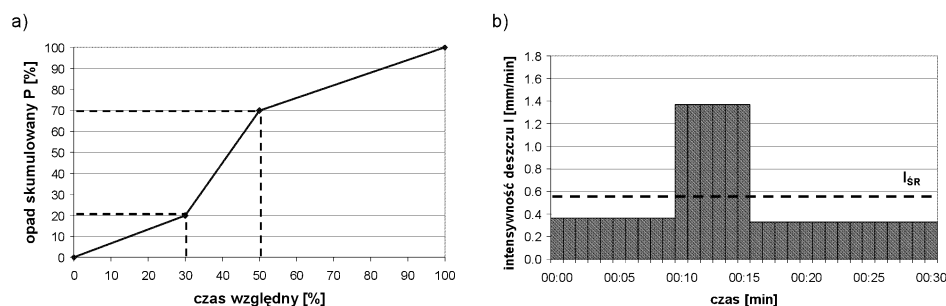
równania (1) oraz odpowiadającego jej czasu ( $t$ ). Z uwagi na jednoznaczność konstrukcji hietogramu, nie został on pokazany na wykresie.

Drugi analizowany hietogram wyznacza krzywa opadu skumulowanego opisana przez zależność (1) (hietogram typu B). Zgodnie z zakresem obowiązywania formuły IMGW, przez pierwsze 5 minut przyjmowana jest stała wysokość opadu, następnie wysokość skumulowana obliczana jest z krokiem czasowym ( $\Delta t$ ) wynoszącym 1 minutę (rys. 2a). Intensywność deszczu ( $I_i$ ) w danym kroku czasowym jest obliczana jako iloraz przyrostu wysokości opadu ( $\Delta P_i$ ) i długości kroku czasowego ( $\Delta t_i$ ) (rys. 2b).



Rys. 2. Przykładowy hietogram typu B ( $p = 0,5$ ,  $t = 30$  min): a) wysokość skumulowana, b) intensywność deszczu

Trzeci typ hietogramu (hietogram typu C) wyznaczono na podstawie zaleceń DVWK [3], według których przez pierwsze 30% czasu trwania pojawia się 20% całkowitej wysokości opadu a po połowie czasu trwania wysokość opadu wynosi 70% deszczu całkowitego (rys. 3a). W analizie przyjęto, że w każdej fazie deszczu intensywność jest stała (rys. 3b). Oznacza to, że w fazie I intensywność wynosi 0,67 intensywności średniej, obliczanej jak dla opadu blokowego (hietogram A). W fazie II intensywność wynosi 2,5 intensywności średniej a w fazie III 0,60 wartości średniej.



Rys. 3. Przykładowy hietogram typu C ( $p = 0,5$ ,  $t = 30$  min): a) konstrukcja hietogramu, b) intensywność deszczu

#### 4. Analiza relacji między czasem trwania opadu a maksymalnymi wartościami odpływu

Dla wytypowanych przekrojów kontrolnych (rys. 1) wyznaczono wielkość przepływu obliczeniowego według metody natężeń granicznych, przyjmując prawdopodobieństwo przewyższenia deszczu równe 0,5. Wyniki porównano z maksymalnym strumieniem przepływu wyznaczonym przy wykorzystaniu modelu SWMM5 dla deszczu blokowych (hietogram typu A) o czasie trwania odpowiadającym czasowi miarodajnemu wyznaczonemu według MGN dla danego przekroju kontrolnego (tab. 3).

Tabela 3. Porównanie maksymalnych wartości przepływu obliczonych z wykorzystaniem symulacji dla hietogramu typu A i metody granicznych natężeń

Nazwa przekroju kontrolnego (węzła sieci)	Kategoria przekroju kontrolnego	Przepływ wód deszczowych Q [dm <sup>3</sup> /s]		Różnica względna [%]
		wg MGN	wg symulacji	
sC06	1	276	258	7.0
sM08		796	668	19.2
sM106		2820	2780	1.4
sP04		889	670	32.7
sC10	2	550	512	7.4
sP18		4670	4860	-3.9
sC18		4640	4200	10.5
sP38	3	9280	9270	0.1

Na podstawie porównania wyników obliczeń obiema metodami można stwierdzić, że uzyskane wartości przepływu są zbliżone. Dla większości przekrojów kontrolnych przepływy obliczone według MGN są większe od wartości wyznaczonych z użyciem modelu opad-odpływ. Może to świadczyć o obecności rezerwy przepustowości kanałów wymiarowanych na bazie metody natężeń granicznych.

Oceny wpływu czasu trwania deszczu syntetycznego na wartość maksymalnego odpływu wyznaczonego z wykorzystaniem modelu SWMM5 dokonano na podstawie zmienności maksymalnych wartości odpływu w poszczególnych przekrojach kontrolnych. Na potrzeby analizy wprowadzono względną zmianę ( $\Delta Q$ ) przepływów szczytowych interpretowanych jako największe wartości w określonym hydrogramie odpływu, obliczaną dla danej grupy hydrogramów (hydrogramy odpływu w określonym przekroju kontrolnym wywołane hietogramem danego typu o różnym czasie trwania i określonym prawdopodobieństwie przewyższenia) według zależności:

$$\Delta Q = \frac{Q_{\text{MAX}} - Q_s}{Q_{\text{MAX}}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2)$$

gdzie:

$Q_{\text{MAX}}$  - maksymalny odpływ szczytowy w analizowanej grupie hydrogramów [ $\text{dm}^3/\text{s}$ ]

$Q_s$  - odpływ szczytowy dla danego czasu trwania deszczu w analizowanej grupie hydrogramów [ $\text{dm}^3/\text{s}$ ]

Wartość  $\Delta Q = 0$  dla danego czasu trwania deszczu oznacza występowanie maksymalnego przepływu szczytowego. Zgodnie ze wzorem (2), względna zmiana przepływów szczytowych może przyjmować wartości nieujemne ( $\Delta Q \geq 0$ ).

Obliczenia wykonano dla hietogramu typu A (deszcz blokowy) o prawdopodobieństwie przewyższenia 0,5 i różnych czasów trwania deszczu syntetycznego. Odpływy wywołane opadem o stałej intensywności są w znacznym stopniu zależne od czasu trwania deszczu (rys. 4a).

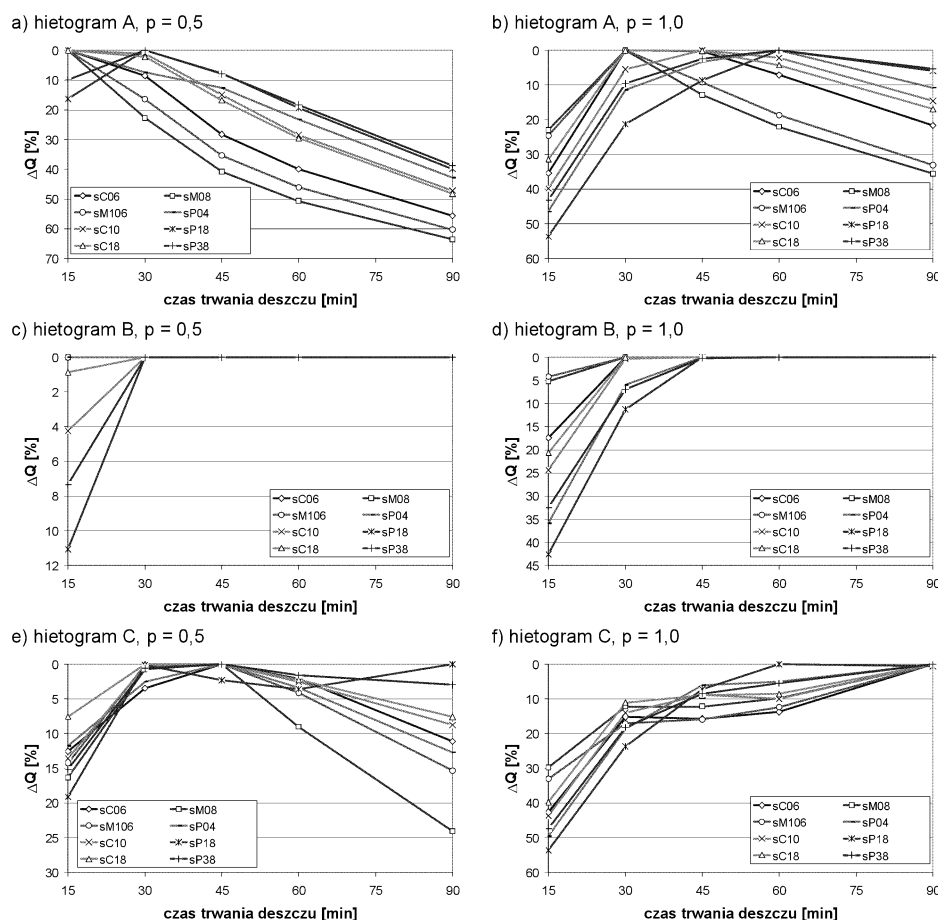
Dla przekrojów kontrolnych kategorii 1 (czas miarodajny do 30 minut), największe odpływy wywołują opady o czasie trwania 15 minut (rys. 5a). Zgodnie z metodą granicznych natężeń odpływ maksymalny powinien wystąpić dla deszczu o  $T = 30$  min. Dla przekroju kategorii 3 (rys. 4a i 5b) maksymalny odpływ pojawia się dla opadu o czasie trwania 30 minut, mimo że czas miarodajny dla tego przekroju wynosi 75 min (tab. 3).

Obliczone hydrogramy odpływu (rys. 5) nie potwierdzają zatem występowania największego odpływu dla opadu o czasie trwania równym czasowi miarodajnemu (według MGN), bazującemu na czasie przepływu przez kanały, retencji i koncentracji. Relacja ta stanowi podstawę metody granicznych natężeń [1].

Aby określić czynniki mające wpływ na wielkość rozbieżności wykonano dodatkowe obliczenia symulacyjne dla opadów blokowych (hietogram typu A) o prawdopodobieństwie przewyższenia 1,0 (rys. 4b). Dla części przekrojów kontrolnych największy odpływ wywołany jest deszczem o czasie trwania odpowiadającym czasowi miarodajnemu (rys. 6). Dla przekrojów sP04 (kategoria 1) oraz sP18 (kategoria 2) relacja taka nie jest spełniona, a największy odpływ ma miejsce w przypadku deszczu o czasie trwania dłuższym od miarodajnego.

Porównanie wyników symulacji dla deszczu o prawdopodobieństwach 0,5 i 1,0 daje podstawę do stwierdzenia, że wraz ze wzrostem wielkości odpływu (dla danego przekroju kontrolnego) maleje czas dopływu do przekroju. Dla deszczu o prawdopodobieństwie 1,0 czas ten jest zbliżony do wartości wyznaczonej według metody natężeń granicznych i stąd zgodność relacji między czasem trwania deszczu a maksymalną wartością odpływu. Dla deszczu o mniejszym prawdopodobieństwie ( $p = 0,5$ ) czas dopływu do przekroju maleje i największe odpływy pojawiają się dla opadów o krótszych czasach trwania. Jeszcze większego skrócenia czasu dopływu do przekroju kontrolnego należy ocze-

kiwać wraz z dalszym zmniejszaniem prawdopodobieństwa przewyższenia, a zatem dla obliczeń związanych z nadpiętrzeniem i zalewaniem terenu. Z powodu deformacji kształtu hydrogramu w warunkach przepływu ciśnieniowego precyzyjna ocena takiej zależności jest jednak utrudniona.

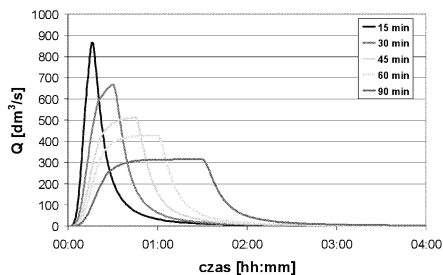
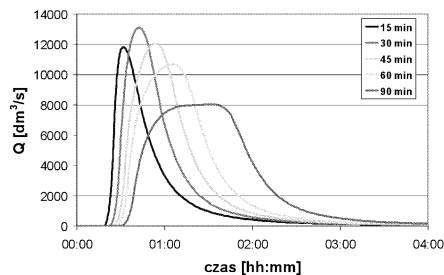


Rys. 4. Względna zmienność maksymalnej wartości odpływu dla analizowanych kształtów hydrogramów, czasów trwania deszczu i prawdopodobieństw przewyższenia

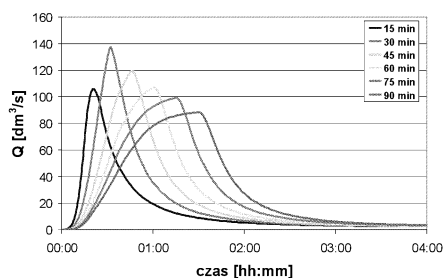
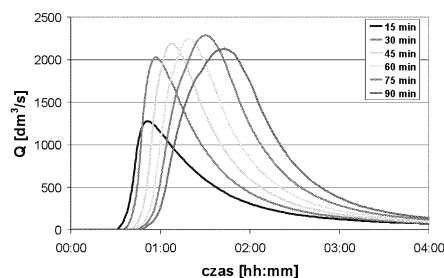
Biorąc powyższe od uwagę, przy wymiarowaniu przewodów według MGN, szczególnie dla prawdopodobieństw mniejszych niż 0,5 należy rozważyć skrócenie czasu miarodajnego. Jednym z rozwiązań może być zastąpienie czasu miarodajnego wyłącznie czasem przepływu w kanałach, z pominięciem czasu koncentracji terenowej i czasu retencji kanałowej. Rozwiązanie takie jest szczególnie uzasadnione w przypadku przekrojów kontrolnych kategorii 1, o czasie miarodajnym według MGN wynoszącym 30 min. Po pominięciu czasu koncentracji terenowej (na potrzeby analizy przyjęto wartość 10 min) i czasu retencji



kanalowej (20% czasu przepływu przez kanały) otrzymuje się czas przepływu równy 16,7 min. Jest to wartość bardzo zbliżona do 15 min, czyli czasu trwania deszczu, który wywołuje największe przepływy w przekrojach kategorii 1. Spełniona jest zatem relacja między czasem trwania opadu a maksymalnym przepływem, zgodna z MGN.

a) hietogram A,  $p = 0,5$ b) hietogram A,  $p = 0,5$ 

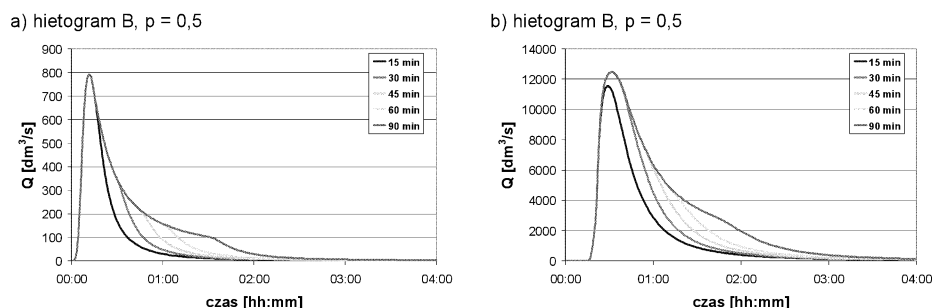
Rys. 5. Przykładowe hydrogramy odpływu dla opadu blokowego (hietogram typu A) o prawdopodobieństwie przewyższenia 0,5: a) przekrój kontrolny kategorii 1 (sM08); b) przekrój kontrolny kategorii 3 (sP38)

a) hietogram A,  $p = 1,0$ b) hietogram A,  $p = 1,0$ 

Rys. 6. Przykładowe hydrogramy odpływu dla opadu blokowego (hietogram typu A) o prawdopodobieństwie przewyższenia 1,0: a) przekrój kontrolny kategorii 1 (sM08); b) przekrój kontrolny kategorii 3 (sP38)

## 5. Porównanie hydrogramów odpływu generowanych przez opady o różnych typach hietogramów

Obliczenia wykonano dla hietogramów typu B (krzywa opadu skumulowanego) oraz typu C (według zaleceń DVWK [3]). Zależność między czasem trwania deszczu a maksymalną wartością odpływu dla poszczególnych przekrojów kontrolnych przedstawiono na rysunku 4c-f. Hietogram typu B dla prawdopodobieństwa 0,5 wywołuje największe odpływy dla czasu trwania 15 minut w przekrojach kategorii 1 (rys. 7a) lub 30 minut dla pozostałych kategorii przekrojów (rys. 7b). Dla prawdopodobieństwa 1,0 czas opadu wywołującego największy odpływ w danym przekroju kontrolnym wzrasta o 15 min (rys. 4d).



Rys. 7. Przykładowe hydrogramy odpływu dla hietogramu typu B o prawdopodobieństwie przewyższenia 0,5: a) przekrój kontrolny kategorii 1 (sM08); b) przekrój kontrolny kategorii 3 (sP38)

We wszystkich przekrojach kontrolnych, maksymalny odpływ w następstwie deszczu blokowego (hietogram typu A) o czasie trwania 15 min i prawdopodobieństwa 0,5 jest większy niż odpływy dla tego samego czasu i hietogramów typu B oraz C. Tendencję tę obrazuje wykres na rysunku 9, gdzie przedstawiono w funkcji czasu trwania deszczu różnicę przepływów szczytowych obliczoną według zależności:

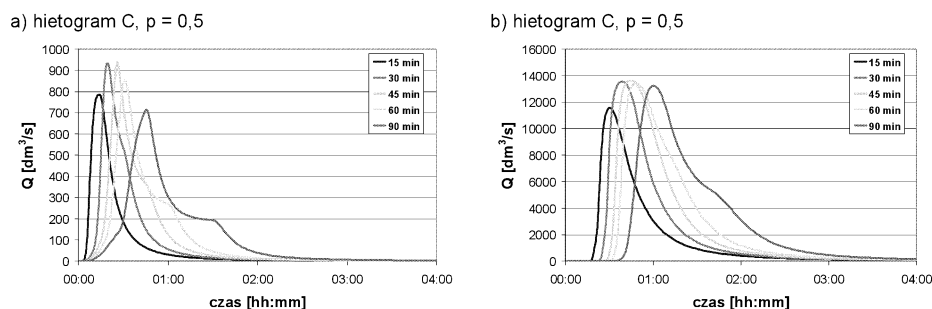
$$\delta Q = \frac{Q_{\text{MAX}} - Q_{\text{MAX}}(\text{typ A})}{Q_{\text{MAX}}(\text{typ A})} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

gdzie:

$Q_{\text{MAX}}(\text{typ A})$  - odpływ szczytowy dla hietogramu typu A [ $\text{dm}^3/\text{s}$ ]

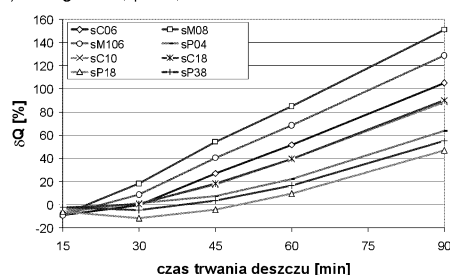
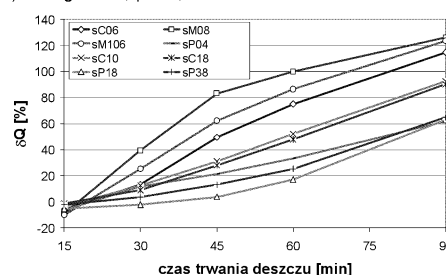
$Q_{\text{MAX}}$  - odpływ szczytowy dla hietogramu typu B lub C [ $\text{dm}^3/\text{s}$ ]

Ujemne wartości  $\delta Q$  oznaczają, że przepływ szczytowy dla hietogramu typu B lub C jest mniejszy niż odpływ wywołany opadem blokowym.



Rys. 8. Przykładowe hydrogramy odpływu dla hietogramu typu C o prawdopodobieństwie przewyższenia 0,5: a) przekrój kontrolny kategorii 1 (sM08); b) przekrój kontrolny kategorii 3 (sP38)

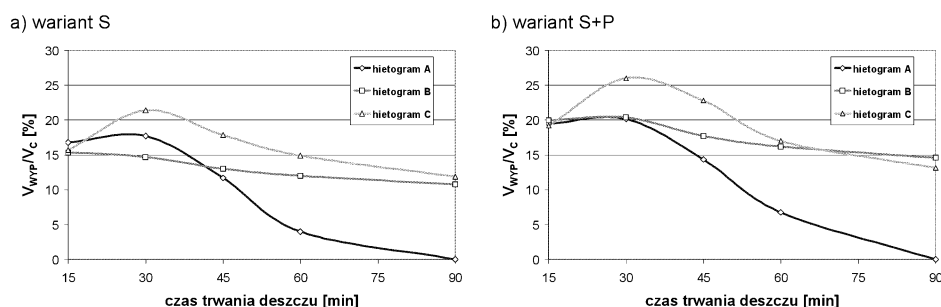
Stwierdzona dla opadów o krótkich czasach trwania (15 min) zależność wskazuje wyraźnie na znaczne zdolności sieci kanalizacyjnej do transformacji kształtu hydrogramu. Mimo znacznych różnic kształtu hietogramów poszczególnych typów, zwłaszcza w zakresie maksymalnych strumieni, szczytowe odpływy w kanale są porównywalne (rys. 9). Podobna relacja występuje w wynikach obliczeń dla hietogramu typu C i prawdopodobieństwa 0,5, szczególnie dla przekroju kategorii 3 o najdłuższym czasie miarodajnym (rys. 8b). Wiąże się to ze znacznym a nawet dominującym udziałem fazy przepływu w kanałach w procesie przekształcania opadu w odpływ.

a) hietogram B,  $p = 0,5$ b) hietogram C,  $p = 0,5$ 

Rys. 9. Względna (odniesiona do hietogramu typu A) zmienność maksymalnych wartości odpływu dla pozostałych kształtów hietogramów: a) hietogram typu B, b) hietogram typu C

## 6. Przepływ ciśnieniowy i wypływ ścieków na powierzchnię terenu

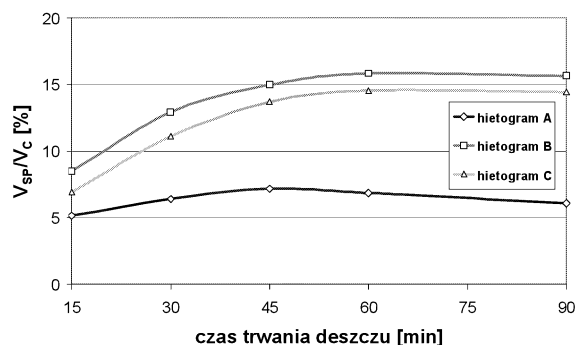
W efekcie przepływu ciśnieniowego i wypływu ścieków na powierzchnię terenu dochodzi do deformacji kształtu hydrogramu odpływu. Następuje redukcja przepływu szczytowego do wielkości odpowiadającej wartości przepływu odbywającego się dla spiętrzenia odpowiadającego poziomowi terenu. Z uwagi na opisane zakłócenie kształtu hydrogramu odpływu, dla opadów o prawdopodobieństwie przewyższania 0,05 zrezygnowano z oceny zmian kształtu hydrogramu w zależności od własności opadu. Wpływ deszczy syntetycznych oceniano na podstawie objętości odpływu i wypływu na powierzchnię terenu. Aby uniknąć wpływu spiętrzenia ponad poziom terenu na warunki przepływu w kanałach, wybrano wariant modelowania bez gromadzenia wypływających na powierzchnię terenu ścieków deszczowych. Analizowano dwa warianty obliczeniowe – ze spływem wyłącznie z powierzchni szczelnych (wariant S) oraz z uwzględnieniem spływu z powierzchni szczelnych i przepuszczalnych (wariant S+P). Ocenę wpływu kształtu hietogramu opadu na odpływ wykonano pod kątem największej objętości wypływu ( $V_{WYP}$ ) oraz w wariantcie S+P dodatkowo objętości spływu z powierzchni przepuszczalnych ( $V_{SP}$ ).



Rys. 10. Względne objętości wypływu ścieków na powierzchnię: a) dla spływu tylko z powierzchni szczelnych (wariant S); b) dla spływu z powierzchni szczelnych i przepuszczalnych (wariant S+P)

Stwierdzono, że objętość wypływu na powierzchnię terenu jest zależna zarówno od czasu trwania opadu jak i od kształtu hietogramu (rys. 10). Na wykresach przedstawiono zależność względnej wielkości wypływu (odniesionej do całkowitego odpływu ze zlewni  $V_c$ ) od czasu trwania deszczu dla różnych typów hietogramu. Dla hietogramów typu A oraz C wypływ o największej objętości na miejsce dla czasów trwania do 15 do 30 min. W przypadku hietogramu typu B stwierdzono najmniejszą zmienność objętości wypływu. Największa bezwzględna wielkość wypływu dla opadów typu B jest osiągana przy czasie trwania deszczu 30 min i pozostaje niezmienna dla dłuższych czasów trwania (wariant S oraz S+P). Zwiększa się całkowita objętość odpływu ( $V_c$ ), stąd względna objętość wypływu maleje (rys. 10).

Dla deszczu o czasie trwania 15 min największa objętość wypływu występuje w przypadku hietogramów typu A (wariant S) i hietogramów typu B (wariant S+P). Opady o hietogramie typu B generują też największą objętość spływu z powierzchni przepuszczalnych  $V_{sp}$  (rys. 11), choć różnice między poszczególnymi typami opadów są nieznaczne.



Rys. 11. Względne objętości spływu z powierzchni przepuszczalnych w zależności od czasu trwania opadu i kształtu hietogramu

## 7. Analiza kształtu hietogramu na potrzeby obliczeń symulacyjnych

Podstawowym kryterium jakie powinien spełniać deszcz obliczeniowy wykorzystywany w symulacji, niezależnie od prawdopodobieństwa przewyższenia, jest generowanie największych wartości odpływu we wszystkich przekrojach kontrolnych sieci, przez analogie do metody granicznych natężeń. Symulacja nie pozwala na odtworzenie warunków obciążenia zlewni opadem zakładanym w MGN, stąd wskazane jest aby wartości przepływu w poszczególnych przekrojach kontrolnych generowane przez deszcz obliczeniowy były w niewielkim stopniu zależne od czasu trwania opadu. Jeśli założenie to nie jest spełnione, to obliczanie całej sieci na opady o długich czasach miarodajnych prowadzi do niedoszacowania przepływów na początkowych odcinkach sieci. Wykorzystanie z kolei opadów krótkotrwałych może skutkować przewymiarowaniem przekrojów oddalonych od początku sieci.

Odpływy maksymalne ( $Q_{MAX}$ ) wywołane opadami blokowymi (hietogram typu A) o prawdopodobieństwie przewyższenia 0,5 dla przekrojów kontrolnych kategorii 1 wykazują tendencję malejącą wraz ze wzrostem czasu trwania deszczu (rys. 4a). Dla przekrojów kategorii 2 i 3 maksymalny odpływ ma miejsce dla deszczu trwającego 30 min. Dla prawdopodobieństwa 1,0 relacja między czasem trwania opadu a wielkością  $Q_{MAX}$  dla hietogramów typu A jest zbliżona do zależności według metody granicznych natężeń (rys. 4b). Odpływ o największej wartości ma miejsce dla deszczu syntetycznego o czasie trwania odpowiadającym czasowi miarodajnemu.

Opady o hietogramie typu B i prawdopodobieństwie 0,5 wywołują w przekrojach kontrolnych kategorii 1 odpływ maksymalny niezależny od czasu trwania opadu. Dla przekrojów kontrolnych kategorii 2 i 3 odpływ maksymalny nie zmienia swej wartości dla opadów o czasach trwania równych i większych od 30 min (rys. 4c-d). Dla prawdopodobieństwa przewyższenia 1,0 stała wartość odpływu szczytowego, niezależna od czasu trwania deszczu pojawia się dla opadów dłuższych od 15 min w porównaniu z prawdopodobieństwem 0,5.

Odpływy w następstwie deszczu o kształcie hietogramu typu C charakteryzują się brakiem wyraźnej relacji między wielkością  $Q_{MAX}$  a czasem trwania deszczu. W przypadku prawdopodobieństwa 0,5 odpływ zbliżony do maksymalnego ( $\Delta Q \leq 5\%$ ) w danym przekroju pojawia się dla deszczu o czasie trwania z przedziału od 30 do 60 min dla wszystkich kategorii przekrojów kontrolnych. Dla prawdopodobieństwa 1,0 odpływ maksymalny rośnie wraz z czasem trwania deszczu (rys. 4e-f).

Można stwierdzić, że najbliższej spełnienia warunku o niezależności wartości  $Q_{MAX}$  od czasu trwania deszczu są opady o hietogramie typu B. Odpływy maksymalne dla przekrojów kontrolnych kategorii 1 są porównywalne z przepływami miarodajnymi wyznaczonymi według MGN. Za wyjątkiem przekroju sP04, różnica wartości  $Q_{MAX}$  obliczonych obiema metodami nie przekracza 10% (tab. 4). Wartość taka bywa zwykle przyjmowana jako akceptowalna dokład-

ność wyników symulacji [15], może też być użyta do porównywania między sobą wariantów obliczeń. Dla przekrojów kontrolnych zaliczonych do kategorii 1 obciążonych odpływem wywołanym deszczem o hietogramie typu B i prawdopodobieństwie 0,5 wartość  $Q_{MAX}$  nie zmienia się z czasem trwania deszczu. Można zatem rozważać wykonywanie obliczeń symulacyjnych z użyciem opadów najkrótszych, o czasie trwania 15 min.

Tabela 4. Porównanie wartości przepływów obliczonych według MGN i symulacji (opad o czasie trwania 15 min i prawdopodobieństwie przewyższenia 0,5)

Nazwa przekroju kontrolnego (węzła sieci)	Kategoria przekroju kontrolnego	Przepływ wód deszczowych $Q$ [dm <sup>3</sup> /s]			Różnica względna [%]	
		wg MGN	wg symulacji		A	B
			hietogram A	hietogram B		
sC06	1	276	282	257	2.3	-6.9
sM08		796	865	790	8.7	-0.7
sM106		2820	3326	3020	17.9	7.1
sP04		889	732	685	-17.7	-22.9
sC10	2	550	602	575	9.4	4.5
sP18		4670	4412	4141	-5.5	-11.3
sC18		4640	6041	5893	30.2	27.0
sP38	3	9280	11814	11552	27.3	24.5

W przypadku przekrojów kontrolnych pozostałych kategorii, zwłaszcza dla najdłuższych czasów miarodajnych, przepływy wywołane opadem o czasie trwania 15 minut przekraczają wielkość przepływów miarodajnych według MGN o około 30% (tab. 4). Dla deszczy syntetycznych o czasie trwania 30 min (wywołujących w danym przekroju kontrolnym największy odpływ) różnica ta jest jeszcze większa. Stosując opady o hietogramie typu B i czasie trwania 15 min dla dużych zlewni należy liczyć się z przewymiarowaniem przekrojów kanałów oddalonych od początku sieci.

Opady o hietogramie typu B wywołują także największe objętości wypływu na powierzchnię i spływu z powierzchni przepuszczalnych przy prawdopodobieństwie przewyższenia 0,05. Największa objętość wypływu oznacza najbardziej niekorzystne warunki działania sieci kanalizacyjnej, co z kolei odpowiada sformułowanemu na początku rozdziału podstawowemu kryterium jakie powinien spełniać deszcz obliczeniowy. Obliczenia częstości nadpiętrzenia i zalewania terenu należy wykonywać przede wszystkim w celu lokalizacji punktów z wypływem ścieków na powierzchnię terenu. Ocena objętości wypływu przy stosowaniu opadów syntetycznych określanych na podstawie formuł empirycznych ma znaczenie drugorzędne. Na podstawie szczegółowych wyników symulacji stwierdzono, że punkty w których dochodzi do wypływu na powierzchnię są identyfikowane już dla najkrótszego z analizowanych opadów.

Wraz ze wzrostem czasu trwania zmienia się jedynie wielkość odpływu. Deszcze o hietogramie typu B i czasie trwania 15 min mogą znaleźć zastosowanie także do obliczeń systemów kanalizacyjnych w warunkach hydraulicznego przeciążenia kolektorów.

Wykorzystanie deszczy o hietogramie typu B jest szczególnie dogodne przy wyznaczaniu opadów syntetycznych według formuły IMGW (równ. 1). Dysponując wzorami umożliwiającymi określenie intensywności deszczu jak na przykład wzory dla Wrocławia [4, 5] w obliczeniach symulacyjnych można stosować opady blokowe (hietogram typu A). Hydrogramy odpływu w następstwie deszczy o wyraźnych maksimach intensywności (np. hietogramy typu B) są szczególnie wrażliwe na zmiany wartości parametrów modelu opad-odpływ [11]. Użycie w obliczeniach deszczy blokowych (hietogram typu A) zmniejsza tę wrażliwość i w mniejszym stopniu uzależnia wynik obliczeń symulacyjnych od wartości parametrów.

## 8. Podsumowanie

Na podstawie wykonanej analizy można zauważyć, że przy stosowaniu metody granicznych natężeń (MGN) do wymiarowania przekrojów kanałów, dla prawdopodobieństwa przewyższenia mniejszego od 0,5 należy liczyć się z możliwością zaniżania przepływów obliczeniowych w wyniku przyjmowania zbyt długiego czasu miarodajnego. Stwierdzono, że czas dopływu do przekroju kontrolnego obliczony w wykorzystaniu modelu komputerowego zlewni wykonanego w programie SWMM5 jest krótszy niż czas miarodajny według MGN. Jego korekta może polegać na pominięciu czasów koncentracji terenowej i retencji kanałowej (co proponuje się w pracy [4]).

Dla potrzeb obliczeń symulacyjnych przy użyciu programu SWMM5 systemów odprowadzania wód deszczowych z relatywnie małych zlewni, ograniczanych przez przekroje kontrolne zaliczane do kategorii 1 (czas miarodajny według MGN do 30 min) należy rozważyć możliwość stosowania hietogramów opadu o czasie trwania 15 min i kształcie odpowiadającym krzywej opadu skumulowanego (typ B) lub o intensywności stałej w czasie (typ A). Opady takie zapewniają najmniej korzystne warunki funkcjonowania sieci, generując największe odpływy w poszczególnych przekrojach kontrolnych i wypływ ścieków opadowych na powierzchnię terenu o największej objętości.

W celu korekty średnic związanej z niedoszacowaniem przepływów obliczeniowych według MGN i zapewnienia wymogu przepływu bezciśnieniowego dla deszczy miarodajnych wykorzystać można symulację przy użyciu programu SWMM5.

Na obecnym etapie zaprezentowane wyniki nie powinny być utożsamiane z zaleceniami do praktycznego stosowania. Opisaną analizę należy traktować jako wskazówkę przy stosowaniu symulacji jako narzędzia do wspomagania projektowania systemów kanalizacji deszczowej.

## Literatura

- [1] Błaszczyk W., Roman M., Stamatello H.: *Kanalizacja*. Tom 1, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1974
- [2] Bogdanowicz E., Stachý J.: Maksymalne opady deszczu w Polsce. Charakterystyki projektowe. Materiały badawcze, seria: Oceanologia i Hydrologia, IMGW, Warszawa 1998
- [3] Kaczor G., Wałęga A.: Przebieg wybranych epizodów opadowych na obszarze aglomeracji krakowskiej w aspekcie modelowania sieci kanalizacji deszczowej, *GWiTŚ* 10/2011, s. 364-366
- [4] Kotowski A.: *Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów*, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2011
- [5] Licznar P., Łomotowski J., Rojek M.: *Pomiary i przetwarzanie danych opadowych dla potrzeb projektowania i eksploatacji systemów odwodnieniowych*, Wydawnictwo Futura (na zlecenie PZiTS), Poznań 2005
- [6] Licznar P.: Obliczenia częstotliwości nadpiętrzenia sieci kanalizacji deszczowej, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 7-8/2008, s. 16-21
- [7] Licznar P.: Potrzeba wykorzystania syntetycznych danych opadowych dla modelowania sieci kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej, *GWiTŚ* 6/2009, s. 19-24
- [8] Licznar P., Schmitt G. T.: Weryfikacja możliwości generowania syntetycznych szeregów opadowych dla hydrodynamicznego modelowania sieci kanalizacyjnych na podstawie danych niemieckich, *GWiTŚ* 3/2010, s. 10-15
- [9] Rossman L. A.: *Storm Water Management Model User's Manual*, version 5.0: US EPA, Cincinnati, OH 45268, 07.2010, [www.epa.gov/ednnrmrl/models/swmm](http://www.epa.gov/ednnrmrl/models/swmm)
- [10] Schmitt T. G.: *Komentarz do ATV-A 118. Hydrauliczne wymiarowanie systemów odwadniających*, DWA Hennef 2000, Wyd. Seidel-Przywecki, Warszawa, 2007
- [11] Skotnicki M.: *Modelowanie odpływu ze zlewni miejskich z uwzględnieniem czasowo-przestrzennej zmienności opadów*, rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, 2009
- [12] Skotnicki M., Sowiński M.: *Pomiary opadów i odpływu dla potrzeb modelowania zlewni miejskiej*, IV Seminarium „Pomiary hydrauliczne w inżynierii środowiska”, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 27.04.2007, zeszyt monograficzny nr 4, s. 63-71
- [13] Skotnicki M., Sowiński M.: Weryfikacja metody wyznaczania szerokości hydraulicznej zlewni cząstkowych na przykładzie wybranej zlewni miejskiej, Politechnika Warszawska. *Prace Naukowe. Inżynieria Środowiska*, zeszyt 57, Współczesne problemy inżynierii i ochrony środowiska. Modelowanie systemów kanalizacyjnych, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2009, s. 27-44
- [14] Skotnicki M., Sowiński M.: Wykorzystanie programu SWMM5 do symulacji odpływu wód deszczowych ze zlewni miejskich w warunkach przeciążenia kolektorów, referat wygłoszony na II Konferencji Modelowanie Procesów Hydrologicznych, 19-20.10.2011, Wrocław
- [15] WaPUG: *Code of practice for the hydraulic modelling of sewer systems*, Wastewater Planning Users Group, 2002, [www.wapug.org.uk](http://www.wapug.org.uk)



## **AN INFLUENCE ANALYSIS OF SYNTHETIC RAINFALL PARAMETERS ON PEAK FLOW IN STORM SEWERS**

### **S u m m a r y**

The presented paper contains an analysis of relation between parameters of synthetic rainfalls and free surface outflow in storm sewer. Three parameters of synthetic rainfalls have been considered: a location of maximum rainfall intensity in a hyetograph, a duration of rainfall and its probability. Their influence on peak flow in a storm sewer and volume of outflow has been investigated by applying simulation technique. For this purpose the computer model SWMM5 has been used for transformation of simulated rainfalls into outflows from tested catchment. Results of simulations do not confirm the basic assumption of rational method for peak flow according to which maximum outflow in a sewer is caused by the rainfall the time of which is equal to the time of concentration defined as the time of flow from the most distant point of a catchment to the considered cross-section of a storm sewer. It has been found that in control cross-sections with the concentration time below 30 min the largest flow is caused by rainfalls duration time of which is equal to 15 min. Computer simulations taking into account surcharging of sewer network have shown that the biggest volume of outflow onto the surface is generated by rainfalls of the highest intensity in the first phase of their duration.