

Józef DZIOPAK¹
Mariusz STARZEC²

WPLYW KIERUNKU I PRĘDKOŚCI PRZEMIESZCZANIA SIĘ OPADU DESZCZU NA MAKSYMALNE SZCZYTOWE PRZEPIŁYWY ŚCIEKÓW W SIECI KANALIZACYJNEJ

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących wpływu kierunku i prędkości przesuwania się fali deszczu na wymiarowanie systemu kanalizacyjnego. Symulacje przeprowadzono w trzech założonych zlewniach, które posiadały taką samą powierzchnię zredukowaną 19,75 ha. Każda ze zlewni posiada 10 podzlewni cząstkowych ułożonych w różnych lokalizacjach, co skutkuje odmiennymi schematami sieci kanalizacyjnej. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że zarówno kierunek, jak i prędkość przemieszczania się fali deszczu ma znaczący wpływ na wielkości przepływu, które kształtują się w sieci kanalizacyjnej. Największe różnice w natężeniu przepływu, jak i wynikowym hydrogramie opisującym zaobserwowane zjawisko są podczas deszczu krótkotrwałych. Wykazano również, że największe chwilowe natężenie przepływu w sieci kanalizacyjnej występuje podczas występowania deszczu krótszego od czasu miarodajnego, jaki jest wyznaczony metodą granicznych natężeń.

Słowa kluczowe: systemy kanalizacyjne; przepływy obliczeniowe; fala deszczu

1. Wprowadzenie

Nasilające się w ostatnich latach ekstremalne zjawiska pogodowe, takie jak deszcze nawalne i długotrwałe intensywne opady deszczu, powodują w wielu przypadkach powstanie lokalnych podtopień. Ich częstsze występowanie, niż to wynika z ustalanych założeń projektowych wpływa na nieprzewidziane zwiększenie kosztów, które wynikają ze strat finansowych na usuwanie skutków tych zjawisk. Takie uwarunkowania krajowe wymuszają konieczność udoskonalania

¹ Józef Dziopak, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, tel. 178651817, jdziopak@prz.edu.pl.

² Autor do korespondencji/corresponding author: Mariusz Starzec, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, tel. 177232409, mstarzec1990@prz.edu.pl.

metod zalecanych do stosowania przez projektantów do racjonalnego wymiarowania, zarówno sieci kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej, jaki i obiektów z nimi współpracujących. W Polsce od wielu dziesięcioleci do wymiarowania sieci odprowadzających ścieki deszczowe wykorzystuje się metodę granicznych natężeń (MGN).

W Polsce operuje się deszczem 10-minutowym, który jest uwzględniany w większości przypadków jako najkrótszy i także wyjściowy w metodzie stałych natężeń. Przykładowo, w Niemczech takim deszczem odniesienia jest opad trwający 15 minut, a miarodajny czas jego trwania określają odpowiednie wytyczne [2]. Inną metodykę stosuje się w Rosji, gdzie na rozległym obszarze tego kraju występuje bardzo duże zróżnicowanie geograficzne i obserwuje się znaczne odmienności klimatyczne [1]. Takie uwarunkowania wymagają zdecydowanie innego, i to uniwersalnego podejścia, które jest uwzględnione w obowiązującej w tym kraju normie SNiP [9]. Ogólny zapis formuły w tej normie na jednostkowe natężenie deszczu uwzględnia deszcz trwający 20 minut w zlewni przy założeniu częstości jego pojawiania się raz w roku i ma podobną formułę w odniesieniu do stosowanej w Polsce metody MGN.

Wykorzystując metodę MGN można w szybki i łatwy sposób wyznaczać miarodajne natężenia przepływu ścieków deszczowych. Metoda ta jest od wielu dziesięcioleci przyjmowana w Polsce do ustalania miarodajnych przepływów ścieków deszczowych w kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej. Uwzględnia ona wpływ wielkości szeregu parametrów, w tym pole powierzchni zlewni odwadniającej, zmienny współczynnik spływu zależny od szczelności powierzchni zlewni, wysokość średniego opadu rocznego, prawdopodobieństwo wystąpienia opadu i inne.

W metodzie tej przyjmuje się ważne założenie, że maksymalne natężenie przepływu w rozpatrywanym przekroju poprzecznym kanału wystąpi wtedy, gdy czas trwania deszczu będzie równy sumie czasów przepływu po najbardziej wydłużonej po czasie trasie i z uwzględnieniem czasu koncentracji terenowej na spływ ze zlewni i czasu retencji kanałowej na wywołanie przepływu ścieków w sieci. W przypadku innych czasów trwania deszczu (dłuższe lub krótsze) w metodzie MGN przyjmuje się, że chwilowe maksymalne natężenie przepływu ścieków deszczowych w sieci osiągnie wartości mniejsze. Należy jednak zadać pytanie czy aby na pewno przy deszczach trwających krócej niż czas miarodajny wyznaczony tą metodą, natężenie przepływu będzie niższe? Przyjmując, że jest tak w rzeczywistości, wzrost intensywności opadu wynikający z jego krótszego czasu trwania nie rekompensowałby zjawiska, w którym nie występuje nałożenia się spływu fali deszczu z całej zlewni. Jednak analizując zmianę intensywności deszczu od czasu jego trwania widać wyraźnie, że im bliżej jest ona wartości 10 minut, tym intensywność rośnie w znacznie większym stopniu.

W metodzie MGN przyjęto również, że deszcz zaczyna się i kończy w tym samym czasie na całej zlewni. Oznacza to, że obejmuje w jednym momencie całą rozpatrywaną zlewnię i ma stałą intensywność. Takie założenia nie odpo-

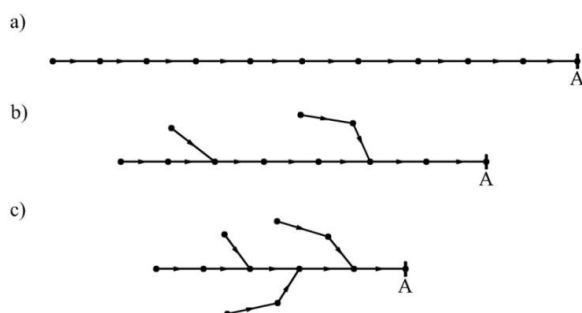
wiadają rzeczywistości i są one zbyt dużym uproszczeniem, co wykazało wielu autorów. W przyrodzie szanse na wystąpienie takiego deszczu są znikome, a prawie zawsze jest inaczej.

Jednak - czy kierunek przesuwania się fali deszczu ma w ogóle wpływ na maksymalne chwilowe natężenia przepływu, jakie wystąpi w sieci kanalizacyjnej? Jeśli tak, to jaki. Jak wcześniej zaznaczono, mało prawdopodobna jest sytuacja, w której deszcz pojawi w tym samym czasie na całej rozpatrywanej zlewni, i to niezależnie od czasu jego trwania. Należy więc ustalić, jaki wpływ na wielkość natężenia przepływu w sieci kanalizacyjnej ma określony kierunek przesuwania się fali deszczu, jak również jego prędkość.

W celu sprawdzenia, jakie wartości przyjmuje natężenie przepływu ścieków deszczowych w sieci podczas różnych czasów trwania deszczu, przy zmiennych kierunkach i prędkości fali deszczu, wykonano szczegółowe symulacje obliczeniowe. Przeprowadzono je w trzech zlewniach o zróżnicowanych kształtach, charakteryzujących się odmiennymi schematami rozmieszczenia kanałów w planie, ale mających identyczne powierzchnie.

2. Przyjęte warianty obliczeniowe

W przeprowadzonych badaniach podjęto próbę określenia, przy jakim czasie trwania deszczu wystąpi maksymalne natężenie przepływu w założonych sieciach kanalizacyjnych. Dodatkowo sprawdzono, jaki wpływ wywiera, po pierwsze kierunek fali deszczu i po drugie jego prędkość przemieszczania się na wartość maksymalnego przepływu w sieci kanalizacyjnej. Przeprowadzono symulacje obliczeniowe, przyjmując różne scenariusze opadów deszczu i odmiennie kształty zlewni zurbanizowanych, wyróżniając przy tym trzy różne schematy układów sieci kanalizacyjnej w planie, które przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schematy sieci kanalizacyjnych przyjęte do analizy (a - zlewnia wydłużona, b - zlewnia średnia, c - zlewnia zwarta)

Fig. 1. Stormwater sewer systems model adopted for the analysis (a - an elongated catchment, b - average catchment, c - compact catchment)

Każda z analizowanych zlewni składa się z 10 odcinków kanałów o długościach od 250 do 400 metrów. Ich łączna powierzchnia zredukowana wynosi 19,75 ha, natomiast spadki kanałów przyjmują wartości 4, 5 lub 6 ‰. Przedział czasowy trwania deszczu do symulacji przyjęto od 10 do 70 minut. Do określenia jednostkowego natężenia deszczu skorzystano z formuły Błaszczyka [3], która określa zależność pomiędzy intensywnością opadu a czasem jego trwania:

$$q = \frac{6,631 \sqrt[3]{H^2 * c}}{t_d^{2/3}} \quad (1)$$

gdzie:

- Q – jednostkowe natężenie deszczu, $\text{dm}^3/(\text{s} * \text{ha})$
- H – wysokość średniego opadu rocznego, mm/rok
- c – częstość występowania opadu, lata
- t_d – czas trwania opadu, min.

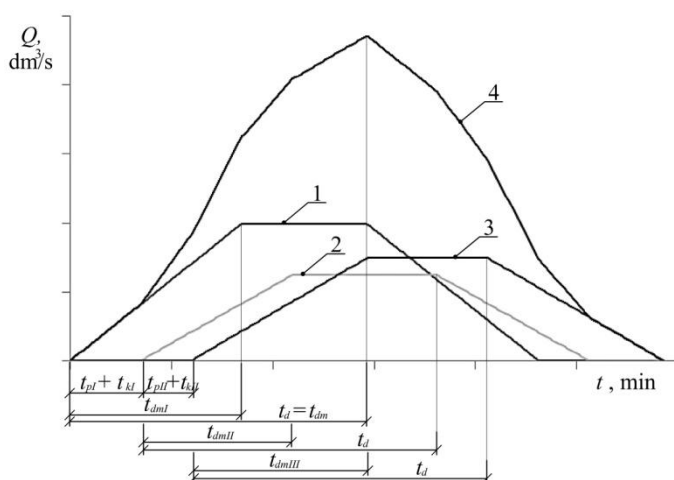
Przyjęto w obliczeniach, że wysokość średniego opadu rocznego założonego do symulacji wynosi $H = 600$ mm, a częstość występowania opadu będzie przyjmować wartość $c = 2$ lata. Przyjęte opady deszczu w symulacji charakteryzują się stałą intensywnością w czasie ich trwania.

Do wyznaczenia maksymalnych natężeń przepływów ścieków deszczowych w przyjętym przekroju A, przy warunkach statycznych skorzystano z trzech metod obliczeniowych. Pierwszą z nich jest metoda granicznych natężeń MGN. W metodzie tej najwyższe szczytowe natężenia przepływu ścieków występuje z pewnym opóźnieniem w stosunku do momentu rozpoczęcia opadu o czas potrzebny na koncentrację terenową t_k , retencję kanałową t_r , oraz przepływ w kanale t_p od początku do przekroju obliczeniowego [3]. Czas retencji kanałowej t_r przyjęto równy 20% czasu przepływu, natomiast czas koncentracji terenowej t_k ustalono na 5 min.

Drugą metodą jest metoda graficzna (MG). Umożliwia ona wyznaczenie zbiorczego hydrogramu natężenia przepływu ścieków deszczowych w wybranych przekrojach poprzecznych sieci kanalizacji deszczowej. Metoda ta sprowadza się do sumowania hydrogramów natężenia przepływu ścieków deszczowych z poszczególnych odcinków sieci kanalizacji deszczowej. Metoda graficzna bazuje na założeniach metody granicznych natężeń (MGN), która m.in. zakłada, że maksymalne natężenie przepływu ścieków występuje z pewnym opóźnieniem w stosunku do momentu rozpoczęcia opadu o czas potrzebny na koncentrację terenową t_k , retencję kanałową t_r , oraz przepływ w kanale t_p od początku do przekroju obliczeniowego.

W metodzie graficznej hydrogram natężenia przepływu ścieków deszczowych w pojedynczym odcinku przyjmuje kształt trójkąta lub trapezu. Hydrogram przyjmuje kształt trójkąta, jeżeli przyjęty czas trwania deszczu będzie równy czasowi miarodajnemu t_{dm} (czas potrzebny na koncentrację terenową t_k , retencję kanałową t_r , oraz przepływ w kanale t_p) w analizowanym odcinku. W pozostałych sytuacjach hydrogram przyjmie kształt trapezu.

Hydrogramy poszczególnych odcinków sieci kanalizacji deszczowej są od siebie oddalone o czas przepływu i retencji kanałowej, odcinka znajdującego się bliżej odbiornika oraz odcinków pomiędzy nimi, jeżeli występują. Przy założeniu, że deszcz zaczyna się i kończy w tym samym momencie na całej zlewni, hydrogram odcinka położonego najbliżej rozpatrywanego przekroju będzie znajdował się jako pierwszy z lewej strony wykresu. Hydrogramy kolejnych odcinków są od niego oddalone o określoną wartość czasową. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe rozmieszczenia trzech hydrogramów pojedynczych odcinków. Odcinki te są ułożone względem siebie szeregowo. Najbliżej rozpatrywanego przekroju poprzecznego znajduje się odcinek 1, następnie 2 i odcinek 3.



Rys. 2. Hydrogramy natężenia przepływu ścieków deszczowych (1 - odcinek I, 2 - odcinek II, 3 - odcinek III, 4 - hydrogram zbiorczy, t_{ri} - czas przepływu i tego odcinka, t_{ri} - czas retencji kanałowej i tego odcinka, t_{dm} - czas miarodajny sieci, t_{dmi} - czas miarodajny i tego odcinka)

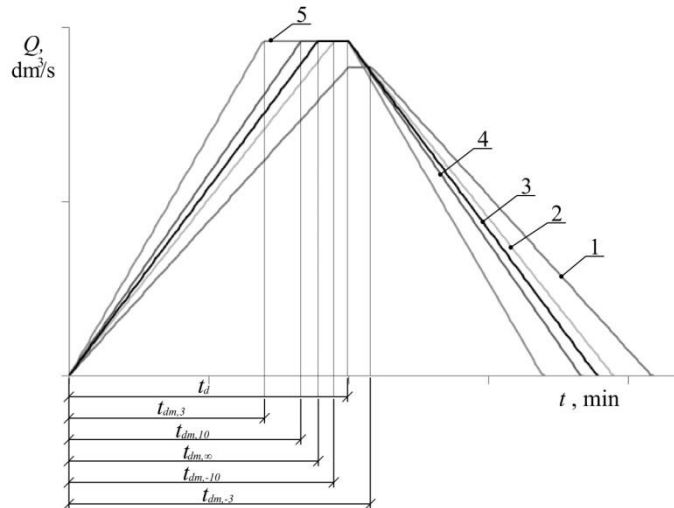
Fig. 2. Hydrographs rainwater flow (1 - conduit I, 2 - conduit II, 3 - conduit III, 4 - summary hydrograph, t_{ri} - flow time chosen conduit, t_{ri} - retention time chosen channel, t_{dm} - duration of design storm for sizing stormwater channels, t_{dmi} - duration of design storm for sizing chosen stormwater channels)

Wędrówka opadu nad zlewnią w MG jest uwzględniana poprzez zmianę odległości pomiędzy poszczególnymi hydrogramami pojedynczych odcinków. W przypadku fali deszczu podążającej zgodnie z kierunkiem spływu ścieków,

odległości pomiędzy hydrogramami przyjmują mniejsze wartości. Przy fali deszczu podążającej w kierunku przeciwnym, wartości te są większe. Wielkość zmiany odległości pomiędzy poszczególnymi hydrogramami zależy od czasu, jaki jest potrzebny na przejście fali deszczu przez rozpatrywany fragment zlewni. Uwzględnienie przemieszczania się fali deszczu powoduje modyfikację kształtu hydrogramu wynikowego w stosunku do warunków statycznych. Jeżeli fala deszczu podąża zgodnie z kierunkiem spływu ścieków, wynikowy hydrogram przepływu ścieków jest bardziej zwarty a szczytowa wartość przepływu większa. Natomiast, jeżeli kierunek fali deszczu i kierunek spływu ścieków mają taki sam zwrot, to czas potrzebny na spływ ścieków siecią kanalizacyjną do rozpatrywanego przekroju jest niwelowany. W górnych zlewniach cząstkowych deszcz zaczyna się odpowiednio wcześniej, co powoduje szybszy odpływ ścieków z tych zlewni cząstkowych w stronę odbiornika w stosunku do zlewni cząstkowych znajdujących się poniżej. W przypadku przeciwnym, hydrogram przepływu jest bardziej rozciągnięty a szczytowa wartość przepływu ścieków jest niższa w stosunku do warunków statycznych. W przypadku, gdy fala deszczu podąża przeciwnie do uśrednionego kierunku spływu ścieków w sieci kanalizacyjnej, następuje wydłużenie czasu spływu ścieków ze zlewni w stosunku do warunków statycznych. Wówczas deszcz zaczyna padać najpierw nad zlewniami cząstkowymi położonymi bliżej odbiornika. Początkowe zlewnie cząstkowe natomiast zostaną objęte opadem, ale jako ostatnie.

Przesuwanie się fali deszczu nad zlewnią wpływa również na kształt hydrogramu pojedynczych odcinków (rysunek 3). Czas potrzebny na przejście fali deszczu jest uwzględniany w czasie miarodajnym poszczególnych odcinków. Fala deszczu podążająca zgodnie z kierunkiem spływu ścieków ma wartość czasu miarodajnego poszczególnego odcinka pomniejszaną o czas potrzebny na przejście fali deszczu przez ten odcinek. W przypadku, gdy kierunek przemieszczania się deszczu jest przeciwny do kierunku spływu ścieków, to czas miarodajny jest powiększany o czas wędrówki opadu na zlewnią przypisaną do danego odcinka sieci kanalizacyjnej.

Jako ostatnią metodę przyjęto wykorzystanie modelu hydrodynamicznego w programie SWMM 5,0. Dla wszystkich analizowanych zlewni utworzono ich model komputerowy. W symulacji przyjęto, że z terenów nieuszczelnionych nie występuje spływ wód deszczowych. Szerokość zlewni przyjęto, jako dwukrotną długość odcinka przypisanego danej zlewni cząstkowej. Pozostałe parametry opisujące zlewnię i sieci kanalizacyjną tj. powierzchnia zlewni cząstkowej, współczynnik spływu powierzchniowego, średnice kolektorów, spadki sieci, itp. przyjęto jak w pozostałych dwóch metodach.



Rys. 3. Hydrogramy natężenia przepływu dla pojedynczego odcinka (1 - $v_{fd} = -3$ m/s , 2 - $v_{fd} = -10$ m/s, 3 - warunki statyczne, 4 - $v_{fd} = 10$ m/s, 5 - $v_{fd} = 3$ m/s, t_{dmi} - czas miarodajny odcinka przy i-tej prędkości przesuwania się fali deszczu)

Fig. 3. Hydrographs rainwater flow for chosen conduit (1 - $v_{fd} = -3$ m/s , 2 - $v_{fd} = -10$ m/s, 3 - static conditions, 4 - $v_{fd} = 10$ m/s, 5 - $v_{fd} = 3$ m/s, t_{dmi} - duration of design storm for sizing stormwater channels for chosen velocity of the wave rain)

Do analizy wpływu prędkości przesuwania się fali deszczu przyjęto wartości 20, 10, 5, 3, 2, 1,5 i 1,0 m/s. Ponadto wyróżniono dwa skrajne warianty przy ustalaniu kierunku, w jakim będzie przemieszczać się fala opadu. W pierwszym założono, że opad deszczu przemiesza się wraz z kierunkiem spływu ścieków w kanalizacji. Oznacza to, że w górnych partiach zlewni sieci kanalizacyjnej deszcz pojawia się najpierw i z ustaloną prędkością kieruje się do zlewni cząstkowych odcinków położonych bliżej odbiornika. Drugi rozpatrywany przypadek jest odwrotnością opisanego powyżej. W tym przypadku fala deszczu pojawia się najpierw w dolnej części kanalizowanej zlewni i przesuwa się w stronę części górnej, a więc przeciwnie do kierunku spływu ścieków w kanałach. Przyjęcie założenia, że deszcz zaczyna się w takim samym momencie na całej zlewni oznacza, że prędkość przesuwania się fali deszczu jest nieskończenie duża. Odpowiada to zatem sytuacji, w której na całym obszarze zlewni dane zjawisko pojawia się jednocześnie [11].

3. Analiza wyników symulacji

Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że zarówno w metodzie graficznej (MG), jak i przy wykorzystaniu modelu hydrodynamicznego w programie SWMM 5.0, maksymalne natężenie przepływu w sieci kanalizacyjnej

wystąpi podczas czasu trwania deszczu krótszego niż przy czasie miarodajnym wyznaczonym metodą granicznych natężeń (MGN). Sytuacja ta zachodzi we wszystkich analizowanych zlewniach. Otrzymane wyniki badań, na podstawie przeprowadzonych obliczeń tylko potwierdzają już sygnalizowane wnioski innych autorów [10, 13, 16], że do powstawania maksymalnego natężenie przepływu w sieci nie jest konieczne nałożenia się przepływu z całej zlewni. Jeśli na całej zlewni lub w większej jej części wystąpi deszczu o krótkim czasie trwania, jednak jego intensywność będzie duża, to może on spowodować najwyższe chwilowe natężenia przepływu ścieków deszczowych.

Maksymalne natężenie przepływu ścieków deszczowych w przekroju A wyznaczono trzema wybranymi metodami: (1) metodą granicznych natężeń MGN, (2) metodą graficzną MG i (3) z wykorzystaniem modelu hydrodynamicznego w programie SWMM przy uwzględnieniu zmiennych skokowo czasów trwania deszczu. Wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli 1 przy uwzględnieniu zlewni wydłużonej, w tabeli 2 w zlewni średniej i w tabeli 3 w zlewni zwartej.

W celu pełniejszego zobrazowania uzyskanych wyników obliczeń dane, które zamieszczono w tabelach 1, 2 i 3 zostały przedstawione w formie graficznej na rysunku 4.

Tabela 1. Maksymalne natężenie przepływu ścieków deszczowych w ostatnim węźle sieci kanalizacyjnej w czasie trwania deszczu w zlewni wydłużonej

Table 1. Maximum rainwater flow in the last conduit for chosen durations of rain in the elongated catchment

t_d	MGN	MG	SWMM
min	dm ³ /s	dm ³ /s	dm ³ /s
10	847,47	1118,51	1443,50
15	970,11	1246,17	1503,40
20	1067,75	1287,38	1454,70
25	1150,20	1256,92	1330,15
30	1215,75	1194,30	1206,81
35	1097,01	1097,01	1093,06
40	1003,58	1003,58	1003,11
50	864,86	864,86	865,64
60	765,87	765,87	766,96
70	691,07	691,07	691,09

W zlewni wydłużonej maksymalny przepływ obliczeniowy wyznaczony przy pomocy programu SWMM wystąpi podczas deszczu trwającego 15 minut i osiągnie on wartość 1503,40 dm³/s. Natomiast stosując metodę graficzną MG,

maksymalne natężenie przepływu wystąpi w czasie deszczu trwającego 20 minut i jego wartość wyniesie 1287,38 dm³/s. Maksymalne natężenie wyznaczone metodą MGN w analizowanej zlewni przyjmie wartość 1215,75 dm³/s, przy czasie trwania deszczu 30 minut. W porównaniu z wynikami uzyskanymi z dwóch poprzednich metod, jest ona wartością najmniejszą.

Maksymalne natężenie przepływu, które zostało wyznaczone w wyniku symulacji hydrodynamicznej w programie SWMM jest o prawie 25 % większe niż ustalone metodą MGN. Porównując wartości otrzymane przy zastosowaniu metod MG i MGN okazało się, że ustalony przepływ metodą MG jest o około 6 % większy.

Z kolei porównując otrzymane wyniki w zlewni średniej, widać że procentowa różnica wyników otrzymanych dzięki symulacją przeprowadzonym w programie SWMM jest nieco mniejsza, ale utrzymują się na podobnym poziomie. Zaobserwowano natomiast wzrost przepływu w przypadku zastosowania metody MG. I tak, maksymalna wartość natężenia przepływu otrzymana przy wykorzystaniu programu hydrodynamicznego SWMM jest o prawie 23% większa niż wyznaczona metodą MGN. Natomiast w metodzie MG otrzymane maksymalne natężenie przepływu jest o 12 % większe niż wyznaczone metodą MGN.

Tabela 2. Maksymalne natężenie przepływu ścieków deszczowych w ostatnim węźle sieci kanalizacyjnej w czasie trwania deszczu w zlewni średniej

Table 2. Maximum rainwater flow in the last conduit for chosen durations of rain in the average catchment

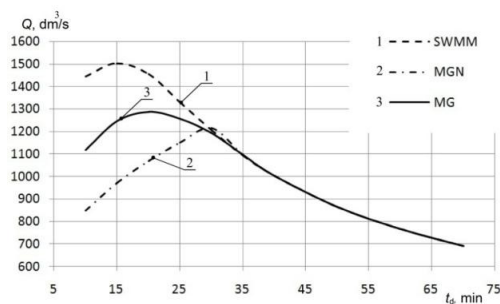
t_d	MGN	MG	SWMM
min	dm ³ /s	dm ³ /s	dm ³ /s
10	1096,64	1581,36	1778,35
15	1255,34	1623,63	1709,90
20	1381,68	1497,49	1535,93
23	1447,57	1414,84	1427,96
25	1372,87	1372,87	1359,14
30	1215,75	1215,75	1214,53
35	1097,01	1097,01	1095,21
40	1003,58	1003,58	1003,71
50	864,86	864,86	865,69
60	765,87	765,87	766,96
70	691,08	691,07	691,09

Tabela 3. Maksymalne natężenie przepływu ścieków deszczowych w ostatnim węźle sieci kanalizacyjnej w czasie trwania deszczu w zlewni zwartej

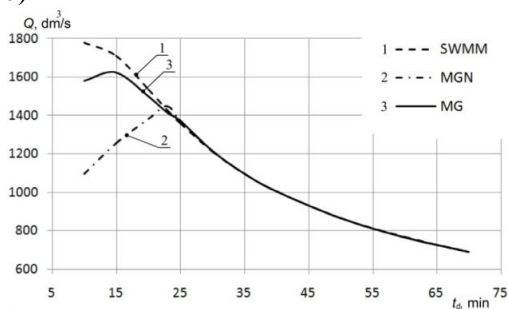
Table 3. Maximum rainwater flow in the last conduit for chosen durations of rain in the compact catchment

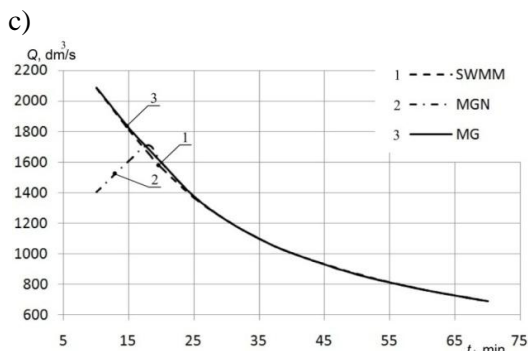
t_d	MGN	MG	SWMM
min	dm^3/s	dm^3/s	dm^3/s
10	1405,70	2088,13	2085,23
15	1609,12	1824,62	1812,83
18	1709,00	1682,63	1654,83
20	1593,08	1593,08	1562,83
25	1372,87	1372,87	1365,87
30	1215,75	1215,75	1216,7
35	1097,01	1097,01	1095,58
40	1003,58	1003,58	1003,8
50	864,86	864,86	865,69
60	765,87	765,87	766,96
70	691,07	691,07	691,09

a)



b)





Rys. 4. Wykresy zależności maksymalnych natężeń przepływu ścieków deszczowych w ostatnim węźle sieci kanalizacyjnej od czasów trwania deszczu (a - zlewnia wydłużona, b - zlewnia średnia, c - zlewnia zwarta)

Fig. 4. Nomogram for maximum rainwater flow in the last conduit depending on durations of rain (a - an elongated catchment, b - average catchment, c - compact catchment)

Ważne podkreślenia jest to, że w zlewni zwartej, zarówno przy korzystaniu z metody MG, jak również z programu SWMM, wyznaczone natężenia przepływu ścieków deszczowych w sieci kanalizacyjnej mają zbliżone wartości we wszystkich założonych czasach trwania deszczu. Wartość maksymalnego natężenia przepływu w obu metodach została osiągnięta przy deszczu, który trwa 10 minut, i jest ona większe o około 22% w stosunku do wartości otrzymanej z obliczeń wykonanych, stosując metodę MGN.

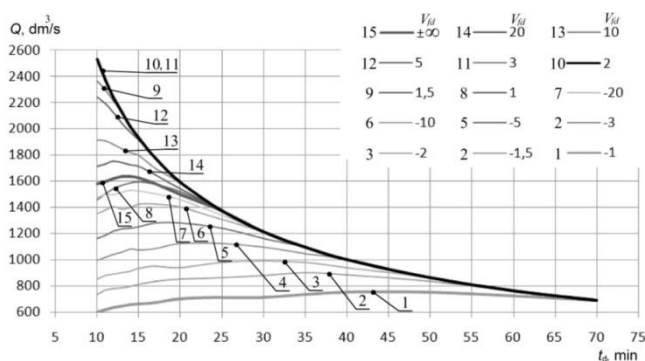
Zatem należy wnioskować, że wymiarowanie kolektora na obliczeniowe natężenie przepływu wyznaczone metodą MGN będzie skutkowało działaniem kanalizacji pod ciśnieniem, a w skrajnym przypadku może dojść nawet do lokalnych podtopień, co w praktyce oznaczałoby powstanie określonych szkód, a zatem wymiernych strat finansowych.

W programie SWMM, serie czasowe charakteryzujące przebieg opadu wprowadzać można z krokami czasowymi 1, 5, 10, 15 i 30 minut lub 1, 6, 12 i 24 godzin. Efekt wędrówki deszczu uzyskuje się poprzez jego rozpoczęcie nad wydzielonymi fragmentami zlewni w różnym czasie. Prędkość fali deszczu wyznacza się za pomocą relacji pomiędzy długością jaka dzieli dane fragmenty zlewni i różnicy czasu rozpoczęcia na nich opadu deszczu. Przy długościach poszczególnych odcinków sieci kanalizacyjnych przyjętych w symulacji skoki czasowe opisujące deszcz z jakich możemy skorzystać nie pozwoliłyby na wyznaczenie takiej samej wartości prędkości fali deszczu dla całej zlewni. Z tego powodu wykorzystanie programu SWMM do sprawdzenia oddziaływania prędkości i kierunku fali deszczu na kształtowanie się maksymalnych przepływów ścieków w sieci kanalizacyjnej jest w tym przypadku ograniczone. W metodzie MG nie występują ograniczenia dotyczące zadanych wartości prędkości fali deszczu. Jednak trzeba mieć na uwadze fakt, że metoda MG opiera się na zało-

żeniach metody MGN, w których przyjmuje się ustalony ruch cieczy. W porównaniu do programu hydrodynamicznego SWMM jest ona metodą dużo prostszą, jednak wyniki otrzymane w obu metodach, bez uwzględniania przesuwania się fali deszczu są do siebie zbliżone. Wyniki symulacji pozwoliły na określenie wpływu przemieszczania się fali deszczu na przepływ w sieci kanalizacyjnej, otrzymane stosując metodę, a wyniki tej metody (MG) można uznać za wiarygodne.

Przeprowadzone symulacje i uzyskane wyniki obliczeń z wykorzystaniem metody MG wraz z ich analizą pozwoliły na podanie szeregu istotnych wniosków. Zarówno prędkość, jak i kierunek przemieszczania się fali deszczu nad zlewnią oraz czas jego trwania mają bezpośredni wpływ na kształtowanie się szczytowych, chwilowych wartości natężeń przepływu, które wystąpią w rozpatrywanych przekrojach sieci kanalizacyjnej. Oddziaływanie kierunku i prędkości przemieszczania się fali deszczu na przepływ w rozpatrywanym przekroju poprzecznym A przyjętej sieci obrazuje plik krzywych, które zamieszczono na rysunku 5.

Analizując wykresy przedstawione na rysunku 5. można stwierdzić, że przy założonych prędkościach przesuwania się fali deszczu i przyjętych czasach jego trwania, maksymalne krytyczne natężenia przepływu na końcu ostatniego odcinka sieci wystąpią wówczas, gdy nad zlewnią pojawi się deszczu, którego czas trwania będzie minimalny i wyniesie $t_d = 10$ min. Jego intensywność spowoduje przepływ w przekroju A o wartości $Q_d = 2528,58 \text{ dm}^3/\text{s}$ podczas fali deszczu, która będzie przemieszczała się wówczas z prędkością $2,0 \text{ m/s}$, a jej kierunek będzie zgodny z kierunkiem sływu ścieków deszczowych w sieci. W tabeli 4 zamieszczono wartości maksymalnych natężeń przepływów ścieków, jakie wystąpią w rozpatrywanym przekroju sieci przy założonych zmiennych wartościach prędkości przemieszczania się fali deszczu.



Rys. 5. Zestawienie krzywych obrazujących maksymalne natężenie przepływu ścieków deszczowych w rozpatrywanym przekroju sieci w zlewni średniej

Fig. 5. Nomogram for maximum rainwater flow in the last conduit in average catchment

Analizując dane zapisane w tabeli 4 można stwierdzić, że w zakresie wszystkich przyjętych prędkości ze znakiem dodatnim, maksymalne krytyczne natężenie przepływu ścieków, które wystąpi w przekroju A, będzie miało większą wartość, niż natężenie przepływu wyznaczone metodą MGN bez względu na układ sieci kanalizacyjnej i jej parametry. Dodatkowo wykazano, że im układ sieci jest bardziej zwarty, tym otrzymano odpowiednio większą liczbę maksymalnych (krytycznych) natężeń przepływu ze względu na prędkość przemieszczania się fali deszczu, a które są większe niż natężenie przepływu obliczone przy stosowaniu metodę granicznych natężeń MGN.

Tak więc oprócz intensywności i czasu trwania deszczu, decydujący wpływ na maksymalne natężenie przepływu w sieci kanalizacyjnej ma zarówno sama prędkość, a zwłaszcza kierunek przesuwania się fali deszczu. Na ogół, im deszcz podąża wolniej zgodnie z kierunkiem przepływu ścieków w sieci kanalizacyjnej, tym maksymalne krytyczne natężenie przepływu w sieci jest większe. Wyjątkiem od tej reguły są wyniki, jakie uzyskano przy prędkości fali deszczu $v_{fd} = 1,0$ i $v_{fd} = 1,5$ m/s, przy których występowały natężenia przepływu mniejsze w porównaniu z uzyskanym maksymalnym wynikiem. Jest to spowodowane tym, że czas przepływu ścieków przez sieć kanalizacyjną jest krótszy, niż czas przejścia fali deszczu. Oznacza to w praktyce, że ścieki deszczowe z początkowego odcinka kanału dotrą do końcowego rozpatrywanego przekroju kanału zanim na zlewni cząstkowej przypisanej do ostatnim odcinku spadnie deszcz. Taka sytuacja oznacza, że nie nastąpi nałożenie się szczytowych chwilowych natężeń przepływu z wszystkich zlewni cząstkowych. Skutkiem tego będzie wystąpienie mniejszego natężenia przepływu w rozpatrywanym przekroju sieci kanalizacyjnej. Przyjmując, że prędkość przesuwania się fali deszczu jest równa $v_{fd} = 0$ m/s, w sieci kanalizacyjnej nie wystąpi przepływ ścieków ze względu na nie przemieszczanie się opadu deszczu nad zlewnią i nie objęcie jej swym zasięgiem.

Wyniki badań potwierdzają, że czas przepływu ścieków deszczowych przez system kanalizacyjny zależy głównie od średniej prędkości przepływu panującej w kolektorach. Jak wynika z wcześniej przeprowadzonych symulacji, gdy prędkość fali deszczu jest zbliżona do prędkości przepływu ścieków w kanalizacji, osiągnięte natężenia przepływu w sieci kanalizacyjnej przyjmują największe wartości. Przyjmując, że prędkość fali deszczu jest stała, to aby osiągnąć jak najwyższe natężenie przepływu, prędkości w poszczególnych kolektorach sieci powinny być do siebie jak najbardziej zbliżone. Analogicznie, im bardziej prędkości panujące w poszczególnych kolektorach będą się od siebie różnić, tym w sieci powinno obserwować się niższe natężenia przepływu.

Symulacje tego zjawiska wykonano w dwóch zlewniach sieci kanalizacyjnych, przyjmując ich kształt przedstawiony na rysunku 1a. Przyjęte sieci kanalizacyjne różnią się od siebie jednak spadkami w poszczególnych kanałach

Tabela 4. Maksymalne natężenia przepływu ścieków deszczowych dla założonych prędkości przemieszczania się fali deszczu, występujące w końcowym odcinku sieci kanalizacyjnej

Table 4. Maximum rainwater flow in the last conduit for chosen velocity of the wave rain in the last conduit

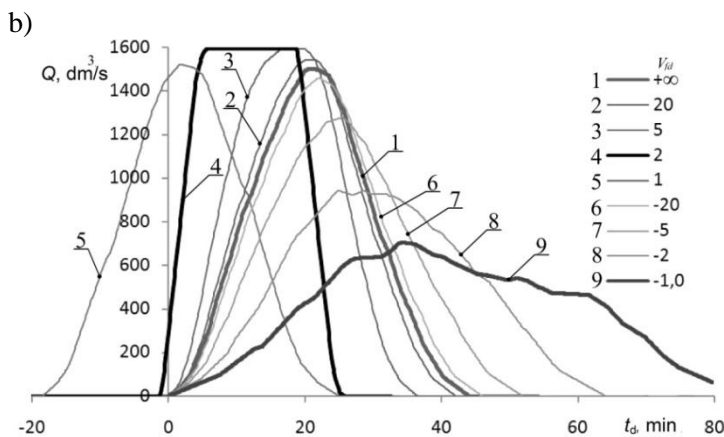
v_{fd} [m/s]	Sieć zwarta		Sieć średnia		Sieć długa	
	Q_{max} [dm ³ /s]	t_d [min]	Q_{max} [dm ³ /s]	t_d [min]	Q_{max} [dm ³ /s]	t_d [min]
1	2043,33	10,0	1595,05	15,0	1311,98	25,0
1,5	2517,25	10,0	2364,31	10,0	2054,98	11,0
2	2528,85	10,0	2528,85	10,0	2528,85	10,0
3	2528,85	10,0	2528,85	10,0	2507,66	10,0
5	2422,62	10,0	2239,50	10,0	1924,65	10,0
10	2261,43	10,0	1910,44	10,0	1546,88	15,0
20	2176,31	10,0	1750,25	12,0	1412,23	17,0
±∞	2071,79	10,0	1636,02	13,0	1287,38	20,0
-20	1979,33	10,0	1527,76	14,0	1209,16	20,0
-10	1893,75	10,0	1426,52	17,0	1122,84	25,0
-5	1733,49	11,0	1278,82	20,0	1006,98	30,0
-3	1553,49	13,0	1126,86	25,0	886,94	35,0
-2	1384,76	15,0	992,97	30,0	777,02	50,0
-1,5	1251,62	17,0	899,63	35,0	705,52	60,0
-1	1060,77	20,0	752,38	40,0	591,37	70,0
MGN	1709,00	18,0	1447,16	23,1	1218,46	29,9

Pierwsze pięć kolektorów sieci kanalizacyjnej (rys. 6, schemat I) posiada spadek równy 2‰, natomiast pozostałe 5 kolektorów spadek 10 ‰. W sieci kanalizacyjnej (rys. 6, schemat II) pierwsze pięć kolektorów ułożonych jest ze spadkiem 10 ‰, a pozostałe ze spadkiem 2 ‰.

Dzięki otrzymanym wynikom można stwierdzić, że im prędkość przepływu ścieków w kolektorach sieci kanalizacyjnej przyjmują wartości bliższe sobie, i będą one odpowiadać prędkości fali deszczu, tym otrzymane maksymalne natężenie przepływu osiągnie wartość większą. Na rysunku 4 przedstawiono zależność między maksymalnym przepływem uzyskanym w przekroju A sieci kanalizacyjnej I i II a przyjętymi prędkościami fali deszczu.

W sieci kanalizacji deszczowej (schemat I) największą wartość przepływu o wartości 2485,7 dm³/s osiągnięto przy deszczu o czasie trwania 10 minut i prędkości fali $v_{fd} = 2$ m/s z kierunkiem jej przemieszczania się zgodnym z kierunkiem przepływu ścieków. W sieci kanalizacyjnej (schemat II) największą wartość przepływu otrzymano w zakresie prędkości fali deszczu $v_{fd} = 2,0 \div 3,2$ m/s o $Q_d = 2528,85$ dm³/s.

Idąc tym tokiem rozumowania, najbardziej niekorzystna będzie sytuacja, w której czas pomiędzy falami odpływu ścieków ze zlewni cząstkowych jest niwelowany przez czas przejścia fali deszczu. W skrajnych warunkach mogłoby to spowodować nałożenie się wszystkich maksymalnych natężeń przepływu z każdej zlewni cząstkowej. Taka sytuacja jest możliwa do wystąpienia w skrajnych warunkach, tj. deszczu trwającego krócej niż 10 minut. Przesuwanie się



Rys. 7. Hydrogram przepływu ścieków deszczowych w przekroju poprzecznym A w zlewni średniej podczas deszczu o czasach trwania: (a) $t_d = 10$ min, b) $t_d = 20$ min

Fig. 7. Hydrographs rainwater flow in the cross-section A for average catchment for rain durations: (a) $t_d = 10$ min, b) $t_d = 20$ min

Analizując krzywe na tym rysunku można wykazać, że zmiana prędkości fali deszczu w większym stopniu zmienia kształt hydrogramu dopływu ścieków do badanego przekroju kanału podczas deszczu trwającego krócej (rys. 7a). Warto jednak zauważyć, że także przy deszczach trwających dłużej, widać wyraźne różnice w przebiegu krzywych tworzących hydrogramy przepływu.

4. Podsumowanie

Powszechnie stosowana w Polsce metoda granicznych natężeń (MGN) do wymiarowania odwodnień zlewni miejskich z reguły prowadzi do znacznego zaniżania przepływów obliczeniowych, zwłaszcza przy projektowaniu sieci w małych zlewniach. W praktyce skutkuje to zaniżaniem potrzebnej geometrii, zarówno samej sieci kanalizacyjnej, jak i obiektów hydrotechnicznych z nią współdziałających.

Zatem ważny jest wybór racjonalnej metody do określenia intensywności opadu ze względu na czas jego trwania, ponieważ niektóre założenia metody MGN mogą prowadzić do błędnych wyników projektowych.

Jak wykazano w tej pracy, błędne może wydawać się założenie, że maksymalne natężenie przepływu w sieci kanalizacyjnej wystąpi, gdy nad analizowaną zlewnią wystąpi opad o czasie trwania, który odpowiada czasowi miarodajnemu, jak to wynika ze stosowania metody granicznych natężeń MGN. Przy wszystkich przyjętych założeniach, maksymalne natężenie przepływu wystąpi podczas opadu trwającego krócej. Różnice te, bez uwzględniania przesuwania się fali deszczu sięgały nawet 25 %.

Przy uwzględnieniu prędkości i kierunku przemieszczania się fali deszczu, różnica między najwyższymi wartościami z obliczonych natężeń przepływu wyznaczonych metodą MG a miarodajnym natężeniem przepływu ustalonym metodą MGN są większe. Wyznaczona wartość różnicy w zlewni wydłużonej wynosi $\Delta Q = 1310,39 \text{ dm}^3/\text{s}$ (tabela 1). Oznacza to, że maksymalne krytyczne natężenie obliczone MG jest prawie 2 razy większe niż miarodajne natężenie przepływu ustalone MGN.

Niezależnie od przyjętego schematu sieci kanalizacyjnej, największe natężenia przepływu ustalono przy założeniu prędkości przemieszczania się fali deszczu, która doprowadzi do nałożenia się w jak największym stopniu maksymalnych wartości natężeń przepływów z poszczególnych odcinków. We wszystkich rozpatrywanych przypadkach osiągnęto je przy prędkość $v_{fd} = 2,0 \text{ m/s}$. Jednak nie oznacza to, że tylko ta wartość generuje największe przepływy.

Decydujący wpływ na wartość prędkości fali deszczu, przy której wystąpi maksymalne chwilowe natężenie przepływu w sieci kanalizacyjnej ma średnia prędkość przepływu ścieków w kolektorach sieci powyżej badanego przekroju poprzecznego. Przy prędkościach fali deszczu zbliżonych do prędkości przepływu ścieków panującej w poszczególnych odcinkach otrzymano największe natężenie przepływu ścieków.

Najwyższe natężenie przepływu ścieków przy stałej prędkości przesuwania się fali deszczu uzyskano, gdy średnie prędkości przepływu ścieków w kolektorach są do siebie zbliżone i odpowiadają prędkości przemieszczania się fali deszczu. Ustalono również, że im zlewnia jest bardziej zwarta, tym zakres prędkości przemieszczania się fali deszczu, które powodują wystąpienie maksymalnego natężenia przepływu wzrasta. Otrzymane wyniki pozwalają również na stwierdzenie, że zmiana wyłącznie prędkości i kierunku przesuwania się opadu przy niezmiennym jego czasie trwania, zasięgu i intensywności spowoduje bardzo duże różnice w obserwowanych natężeniach przepływu ścieków.

Z analizy sporządzonych hydrogramów wynika, że otrzymana różnica wydaje się na tyle duża, że nie powinno się jej pomijać w obliczeniach projektowych. Przeprowadzone badania wykazały jednoznacznie, że należy dążyć do udoskonalania metody wymiarowania, zarówno samej sieci kanalizacyjnej, jak i obiektów hydrotechnicznych z nią współdziałających.

Potwierdzono obliczeniami, że zarówno metoda MG, jak i MGN nie uwzględnia ważnych parametrów. Metody wykorzystują ruch ustalony cieczy i nie uwzględniają zmiennego natężenia opadu w czasie. Z drugiej jednak strony rozpatrując warunki statyczne, podobne wyniki do tych uzyskanych metodą MG, otrzymano wykorzystując model hydrodynamiczny w programie SWMM 5,0. Dlatego też tematyka wpływu kierunku i prędkości przesuwania się fali deszczu na rzeczywiste wartości przepływu ścieków w kanalizacji powinna być dalej szczegółowo badana w celu opracowania racjonalnej metody ustalania miarodajnych przepływów ścieków deszczowych w systemach odwadniania terenów zurbanizowanych.

Literatura

- [1] Aleksejev M.I., Kurganov A.M.: Organizacija otviedienija powierchnogo (dozdievo i talogo) stoka s urbanizirovannyh territorij, Podręcznik, Wydawnictwo S-PSU AiSN, Saint-Petersburg, Rosja, 2000.
- [2] ATV 1999. ATV A118. Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystem, ATV Regelwerk Abwässer – Abfall, ATV GFA, Hennef, 1999.
- [3] Błaszczyk W., Roman M., Stamatello H.: Kanalizacja, T. 1, Arkady, Warszawa, 1974.
- [4] Błaszczyk P.: Ulepszone metody wymiarowania kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej, Praca zbiorowa, Postęp techniczny w kanalizacji, Wrocław, 1977.
- [5] De Lima J.L.M.P., Singh V.P. (2002). The influence of the pattern moving rainstorms on overland flow. *Advances in Water Resources*, **25**, 817-828.
- [6] Dziopak J.: Analiza teoretyczna i modelowanie wielokomorowych zbiorników kanalizacyjnych, Monografia 125, Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej, Kraków, 1992.
- [7] Dziopak J., Słyś D.: Modelowanie zbiorników klasycznych i grawitacyjno-pompowych w kanalizacji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2007.
- [8] Haug H.P. (1970). Einflüsse auf die Ableitung und den Überlauf von Regenwasser. Forschungs- und Entwicklungsinstitut für Industrie- und Siedlungswasserwirtschaft sowie Abfallwirtschaft e.V. in Stuttgart.
- [9] Kanalizacja. Narużnyjesieti i soorużenija. SNiP 2.04.03-85, Moskwa, 1986.
- [10] Kotowski A.: Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa, 2011.
- [11] Mrowiec M.: Ocena wpływu przestrzennej zmienności opadu na działanie kanalizacji deszczowej, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2009.
- [12] Słyś D.: Zrównoważone systemy odwodnienia miast, Dolnośląskie Wydawnictwo Naukowe, Wrocław, 2013.
- [13] Stoknicki M., Sowiński M., : Wykorzystanie opadów syntetycznych w modelowaniu odpływu ze zlewni miejskich. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, nr 283, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, z. 59 (2/12/I), Rzeszów 2011.
- [14] Starzec M., Dziopak J., Aleksejev M.I.: Wpływ wybranych metod na kształtowanie się hydrogramów przepływu ścieków deszczowych, *Infraeko 2014. Nowoczesne miasta. Infrastruktura i środowisko*, Rzeszów, 2014.
- [15] Zawilski M., Brzezińska A.: Areal rainfall intensity distribution over an urban area and its effect on a combined sewerage system, 12th Int. Conf. on Urban Drainage, Porto Alegre, 2011.

- [16] Zawilski M.: Analiza obciążenia hydrodynamicznego systemu kanalizacyjnego w skali dużej zlewni miejskiej. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, nr 283, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, z. 59 (2/12/I), Rzeszów 2011.

INFLUENCE OF DIRECTION AND VELOCITY OF PRECIPITATION DISPLACEMENT ON SEWAGE SYSTEM DIMENSIONING

Summary

The article presents the results of studies on the influence of the direction and velocity of precipitation wave displacement on the dimensioning of sewerage system. The simulations performed for three assumed catchments of the same reduced surfaces of 19,75 ha. Each catchment has 10 sub-basins of different locations, which results in different schemes of sewerage system. The obtained results allow to conclude that both the direction and velocity of precipitation wave has a significant impact on the flow rate, which is formed in sewerage system. The greatest differences in the flow intensity and the resulting flow hydrogram, describing the observed phenomenon, occur during transitory rainfall.

It was also shown that the highest momentary flow intensity in sewerage system is observed during the occurrence of rain duration shorter than calculative duration determined by rational method of boundary intensities.

Keywords: sewerage systems; calculative flow; wave of precipitation

DOI:10.7862/rb.2014.47

Przesłano do redakcji: lipiec 2014 r.

Przyjęto do druku: wrzesień 2014 r.