

Maciej MROWIEC
Politechnika Częstochowska
Instytut Inżynierii Środowiska

SYMULACJA DZIAŁANIA RUROWYCH ZBIORNIKÓW RETENCYJNYCH PRZY ZASTOSOWANIU MODELU FALI DYNAMICZNEJ

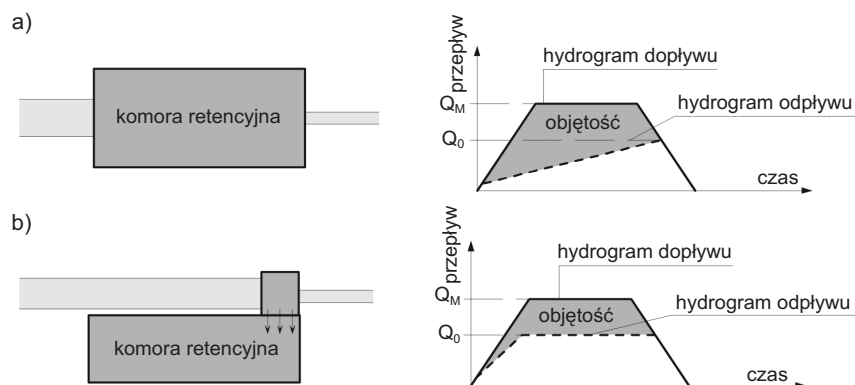
W artykule przedstawiono hydrodynamiczne modele nowatorskich konstrukcji rurowych zbiorników retencyjnych z wewnętrzną rurą dławiącą, przeznaczonych do stosowania na gęsto zabudowanych zlewniach miejskich. Zbiorniki te mogą być zastosowane zarówno na istniejących, jak i nowo projektowanych sieciach kanalizacji rozdzielczej, przy czym w kanalizacji ogólnospławnej z pewnymi ograniczeniami, zwiększając zdolność retencyjną sieci przy relatywnie niewielkich kosztach inwestycyjnych. Symulacje hydrodynamiczne, przeprowadzone przy zastosowaniu programu SWMM5 dla trzech hydrogramów dopływu do zbiornika o średnicy 2,0 m, wykazały znacząco większą efektywność proponowanych konstrukcji w odniesieniu do tradycyjnych zbiorników jednokomorowych.

1. Wprowadzenie

Zbiorniki retencyjne są przeznaczone najczęściej do hydraulicznego odciążenia sieci kanalizacyjnej i obiektów z nią współdziałających, zlokalizowanych poniżej tych zbiorników. Na terenach zurbanizowanych wykonanie otwartych zbiorników retencyjnych jest bardzo trudne z uwagi na konieczność wyłączenia danego obszaru dla innego sposobu użytkowania [1]. W praktyce konieczne jest zazwyczaj wykonywanie systemów podziemnych, dla których wiele konstrukcji zbiorników zostało dotychczas opracowanych. Zasada ich działania opiera się w większości przypadków na zrzucie nadmiaru ścieków poprzez przelew boczny z komory przepływowej, o niewielkiej objętości, do zasadniczej komory retencyjnej, ewentualnie kilku komór retencyjnych. Zbiorniki wielokomorowe z przelewem bocznym umożliwiły utrzymanie maksymalnego natężenia odpływu, w trakcie trwania procesu wypełniania jego komory akumulacyjnej, dzięki czemu efektywność hydrauliczna jest wyższa niż dla konstrukcji jednokomorowej, w której maksymalne natężenie odpływu ścieków jest uzyskiwane tylko w chwili całkowitego wypełnienia. Taki sposób działania daje oczywistą przewagę zbiornikom wielokomorowym nad klasycznymi, jednokomorowymi konstrukcjami, co widać wyraźnie przy porównaniu kształtu hydrogramów odpływu

(rys. 1.). Inną, istotną zaletą eksploatacyjną jest znaczące zmniejszenie częstotliwości zanieczyszczania dna komory retencyjnej [2].

W gęstej zabudowie miejskiej lokalizacja podziemnych komór retencyjnych także nie jest zadaniem łatwym, choćby ze względu na obecne wysokie ceny gruntów – w optymalnym wariancie powierzchnia nad komorą może być zagospodarowana jako parking [3].



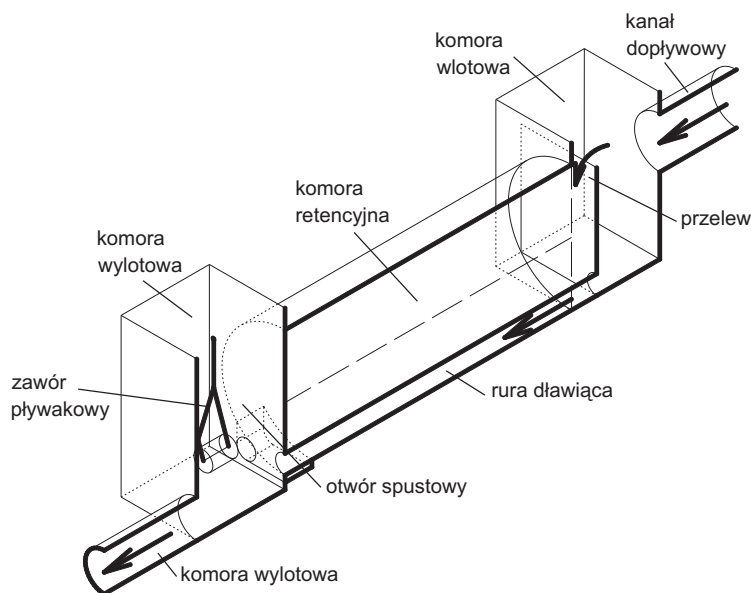
Rys. 1. Schemat działania oraz hydrogram odpływu zbiornika: a) jednokomorowego, b) wielokomorowego

W takich przypadkach budowa zbiorników tzw. liniowych może być rozwiązaniem alternatywnym, szczególnie gdy na danej zlewni brak jest terenów pod budowę urządzeń retencyjnych, działających w układzie przelewu bocznego. Standardowym wariantem wykonania tego typu konstrukcji są zbiorniki rurowe o średnicach znacząco większych od średnic kanałów wymiarowanych na chwilowe natężenia przepływów szczytowych. Wykorzystanie odcinków rur z tworzyw sztucznych jako komór retencyjnych zbiornika posiada wiele zalet, z których najważniejsze to: nieskomplikowane obliczenia wytrzymałościowe, duży zakres możliwych do wykonania średnic (nawet do 3000 mm), modułowy charakter zbiornika (całość jest wykonana z gotowych elementów prefabrykowanych), możliwość wykonania nietypowych elementów wyposażenia zbiornika, ułatwiony transport i montaż, korzystne właściwości materiału (odporność na ścieranie, korozję i „starzenie się”), optymalne właściwości hydrauliczne (współczynnik chropowatości bezwzględnej $k = 0,05$ mm).

Innowacyjne konstrukcje [5] rurowych zbiorników retencyjnych zostały opracowane w oparciu o podstawowe założenie: urządzenia działają jako przepływowe (liniowe), ale ich efektywność hydrauliczna jest zbliżona do osiąganą przez zbiorniki z przelewem bocznym. Dodatkowe założenia projektowe obejmowały: niskie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, brak zewnętrznego zasilania energią oraz minimalizację liczby elementów mechanicznych związanych z obniżeniem stopnia awaryjności urządzeń.

W oparciu o te założenia opracowano 3 konstrukcje rurowych zbiorników retencyjnych z wewnętrznym przewodem tranzytowym [4, 5, 6, 7, 8]:

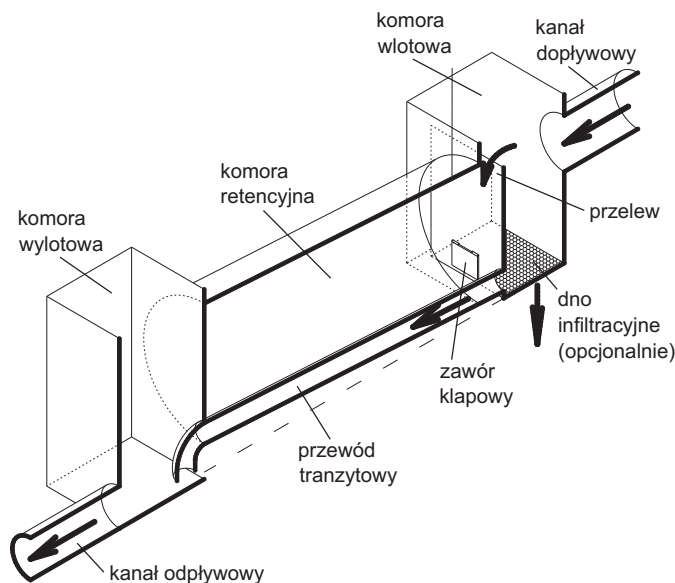
- z zaworem pływakowym jako regulatorem przepływu (RPF – rys. 2.),
- z otworem spustowym jako regulatorem przepływu (RPO),
- zbiornik ułożony w przeciwspadku, z zaworem klapowym (RTI – rys. 3.).



Rys. 2. Izometryczny widok rurowego zbiornika retencyjnego typu RPF

Budowa zbiorników RPF i RPO jest prawie identyczna. Komory wlotowa i wylotowa są połączone przewodem tranzytowym ułożonym na dnie komory retencyjnej. Przegroda oddzielająca komorę wlotową od retencyjnej stanowi jednocześnie krawędź przelewową.

Zasadniczą różnicą jest sposób regulacji odpływu ścieków z komory retencyjnej. Zawór pływakowy w zbiorniku RPF uniemożliwia odpływ ścieków w okresie ich akumulacji w komorze retencyjnej, podczas gdy w zbiorniku RPO regulatorem jest otwór spustowy o odpowiednio dobranej średnicy, który powoduje częściowy odpływ ścieków z komory retencyjnej podczas jej napełniania. Obniża to sprawność hydrauliczną zbiornika RPO w odniesieniu do zbiornika RPF, jednakże zmniejsza awaryjność urządzenia poprzez eliminację elementów mechanicznych. Specyfika konstrukcji zbiornika RTI polega na tym, że komora retencyjna jest ułożona w spadku przeciwnym do przyjętego tranzytowego kierunku przepływu ścieków. Umożliwia to zmniejszenie zagłębienia kanału odpływowego, jednakże zasadniczo zmienia funkcję komory wlotowej, która będzie w tym przypadku działać jako komora osadowa bądź infiltracyjna. Dlatego też zbiornik RTI nie powinien być stosowany na kanalizacji ogólnospławnej.



Rys. 3. Izometryczny widok rurowego zbiornika retencyjnego typu RTI

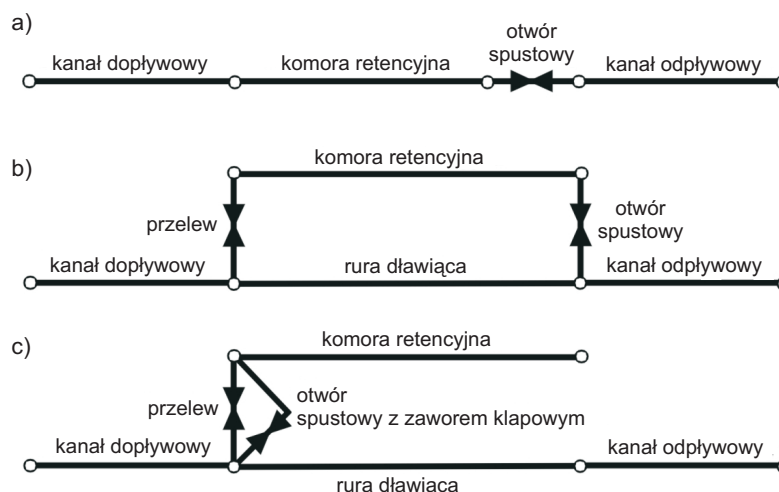
2. Hydrodynamiczna symulacja działania zbiorników rurowych

Ocenę hydraulicznej efektywności poszczególnych konstrukcji wykonano za pomocą programu SWMM5 dla pojedynczych intensywnych opadów atmosferycznych. W celu przeprowadzenia analizy porównawczej zbiorników rurowych wykonano szereg symulacji na kanalizacji odprowadzającej ścieki deszczowe z gęsto zabudowanej zlewni miasta Częstochowy do rzeki Warty. Rysunek 4. przedstawia schematy poszczególnych zbiorników rurowych, zastosowane w programie SWMM5 do wykonania symulacji hydrodynamicznych. Wybrany model fali dynamicznej jest oparty na uwzględnieniu w rozwiązaniach numerycznych wszystkich członów równania Saint-Venanta, dzięki czemu uzyskane wyniki są najbardziej zbliżone do rzeczywistych. Pozwala on także uwzględnić efekty związane z działaniem sieci w warunkach przepełnienia, a także retencję kanałową, przepływy wsteczne, straty energii (miejscowych i liniowych) i wypływ ścieków na powierzchnię terenu. Model fali dynamicznej wymaga krótkiego kroku czasowego, z jakim będą prowadzone obliczenia symulacyjne, tak aby utrzymać stabilność rozwiązań numerycznych. W przedmiotowych symulacjach przyjęto krok czasowy równy jednej sekundzie.

Symulacje wykonano dla 3 hydrogramów dopływu o zróżnicowanej charakterystyce, które zostały zapisane jako ciąg funkcji liniowych:

- hydrogram trapezowy o czasie trwania 1 h i maksymalnym natężeniu dopływu $0,268 \text{ dm}^3/\text{s}$ – jest on miarodajny dla wymiarowania zbiornika jednokomorowego,

- hydrogram o dwóch natężeniach szczytowych ($205 \text{ dm}^3/\text{s}$ i $160 \text{ dm}^3/\text{s}$) i całkowitym czasie trwania około 4 h – wyznaczony w oparciu o pluwiogramy,
- hydrogram o dwóch natężeniach szczytowych ($230 \text{ dm}^3/\text{s}$ i $180 \text{ dm}^3/\text{s}$) i całkowitym czasie trwania około 10 h – wyznaczony w oparciu o pluwiogramy.



Rys. 4. Schematy rurowych zbiorników retencyjnych w programie SWMM5: a) zbiornik jednokomorowy, b) zbiornik RPO (zbiornik RPF ma identyczny schemat i dodatkowe reguły sterujące dla otworu spustowego), c) zbiornik RTI

Modele zbiorników opracowano dla takich założeń projektowych, jak:

- kanał dopływowy: średnica 0,8 m, spadek 0,9%, długość 180 m,
- komora retencyjna: średnica 2,0 m, spadek 0,3%, długość 150 m, połączona z kanałem dopływowym stropami,
- kanał odpływowy: średnica 0,4 m, spadek 0,4%, długość 120 m (w przypadku zbiornika RTI kanał wylotowy znajdował się 0,55 m wyżej z uwagi na zastosowany odwrotny spadek),
- średnica przewodu tranzytowego, jak i otworu spustowego była każdorazowo dobierana tak, aby osiągnąć żądane natężenie odpływu przy całkowitym napełnieniu zbiornika, równe $145 \text{ dm}^3/\text{s}$.

W przypadku zbiornika RPO konieczne było ponadto zdefiniowanie współczynnika rozdziału przepływu jako stosunku maksymalnego przepływu przez przewód tranzytowy do maksymalnego natężenia odpływu ze zbiornika ($\tau = Q_T/Q_0$), w przedmiotowym przykładzie wartość τ została ustalona na 0,67.

Wyniki symulacji dla deszczu godzinowego były zbieżne z wcześniej przeprowadzonymi testami zbiorników w skali laboratoryjnej. W przeprowadzonej analizie kryterium porównawczym było zdefiniowane we wcześniejszych publi-

kacjach pojęcie efektywności objętościowej, oznaczającej stosunek niewypełnionej części zbiornika wielokomorowego do całkowitej pojemności zbiornika jednokomorowego. Efektywność objętościowa proponowanych konstrukcji podczas godzinowego deszczu krytycznego (rys. 5a) wyniosła 34% (RTI) i 37% (RPF), natomiast dla zbiornika RPO redukcja objętości była nieco mniejsza i wyniosła 18%. Wynika to z faktu, że konstrukcja ta jest swego rodzaju połączeniem zbiornika wielokomorowego i jednokomorowego. Przy całkowitej objętości zbiornika jednokomorowego, równej 471 m^3 , daje to możliwość zmniejszenia o odpowiednio: 160 m^3 (RPF) i 85 m^3 (RPO), co przekłada się na 51 i 27 m długości rury o średnicy 2,0 m.

W praktyce oznacza to oszczędności związane z zakupem materiału rzędu kilkudziesięciu tysięcy złotych (cena 1 m rury o średnicy 2000 mm to około $2500\div 3000 \text{ zł}$ bez kosztów transportu i położenia w wykopie), co z pewnością rekompensować będzie nakłady związane z wykonaniem przewodu tranzytowego (cena rury o średnicy 400 mm to około 200 zł).

W przypadku hydrogramu eksploatacyjnego o czterogodzinnym czasie trwania różnice w objętościach wypełniających komory retencyjne były jeszcze większe. W zbiorniku klasycznym maksymalne napełnienie wyniosło blisko 1,5 m (rys. 5b), co stanowiło 61% jego całkowitej objętości, podczas gdy w zbiornikach wielokomorowych odpowiednio: 31% (RPO), a RPF oraz RTI blisko 10% (wyłączając stałe napełnienie zbiornika RTI, wynikające z przeciwpadku). Trzeci z zadanych hydrogramów, o 10-godzinnym czasie trwania, powodował przepełnienie zbiornika jednokomorowego (napełnienie w komorze wylotowej ponad 2,25 m – rys. 5c), natomiast zbiorniki wielokomorowe były wypełnione częściowo – zbiornik RPF w 77%, RTI w 82% oraz RPO w 83,5%. Wyniki te wykazują, że przy symulacjach długookresowych (okres kilkuletni), opartych na rzeczywistych danych o opadach, efektywność działania konstrukcji wielokomorowych będzie wyższa niż dla symulacji prowadzonych dla pojedynczych deszczów, wyznaczonych na podstawie wzorów empirycznych.

Dzięki zastosowaniu przewodu tranzytowego znacząco ograniczona zostaje częstotliwość wypełniania komory retencyjnej w okresach opadów atmosferycznych o niskim natężeniu. Pozwala to na zmniejszenie niedogodności związanych z odkładaniem się osadów i redukcję kosztów eksploatacyjnych związanych z ich okresowym usuwaniem.

Wszystkie obliczenia numeryczne prowadzone w programie SWMM5 charakteryzowały się dużą stabilnością. Błąd ciągłości przepływu nie przekraczał 1%, zatem wyniki te można traktować jako wiarygodne. Niestabilność obliczeń, przejawiająca się oscylacją (fluktuacją) wartości napełnień w niektórych węzłach i przepływach na odcinkach, może występować w przypadku dużych zlewni, co wynika z jawnego schematu różnicowego obliczeń numerycznych zastosowanych do modelu fali dynamicznej.

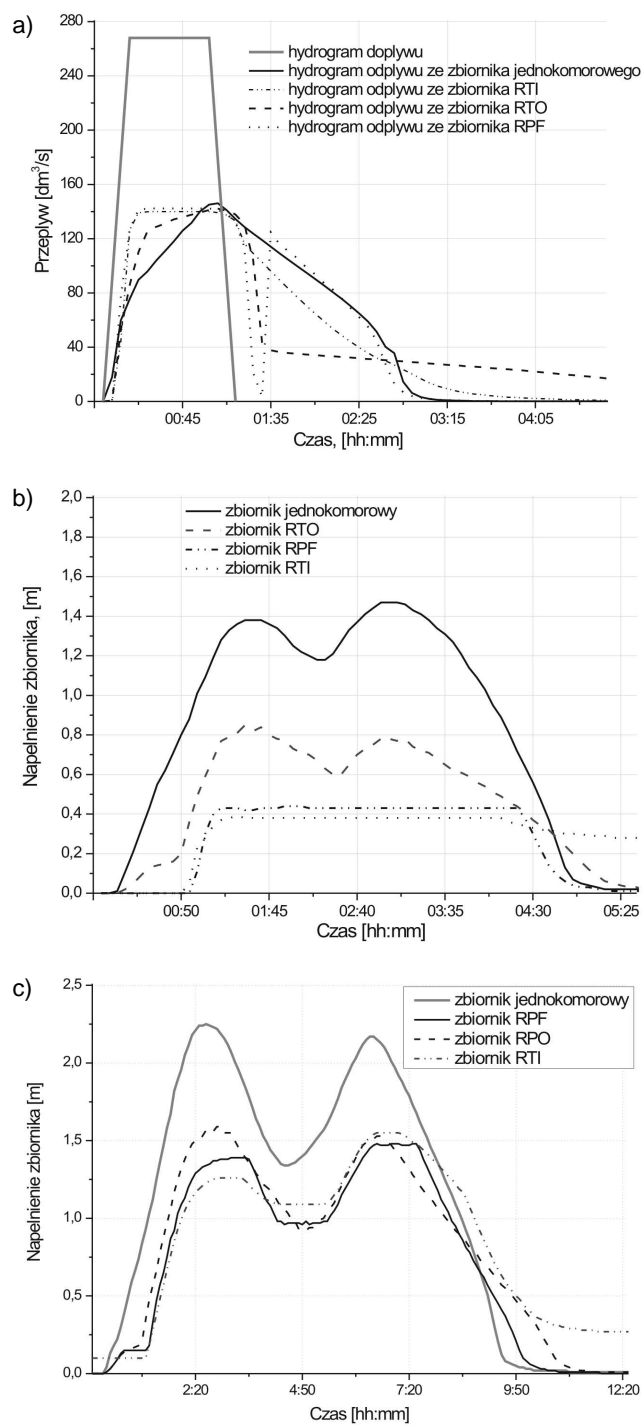


Fig 5. Porównanie działania zbiorników rurowych w oparciu o: a) hydrogramy odpływu ze zbiorników przy deszczu godzinnym, b) zmianę napełnień komór retencyjnych przy deszczu 4-godzinnym i c) 10-godzinnym

W przedmiotowych symulacjach testowano zbiorniki, zakładając stałe ustawienia regulatorów przepływu. Warto jednak zwrócić uwagę, że SWMM oferuje możliwość definiowania tzw. reguł sterujących i warunkowych. Pozwalają one na symulację działania pomp, sterowanie zasuwami czy też zmiany położenia krawędzi przelewowych. Jest to szczególnie ważne, gdy sieciowe zbiorniki retencyjne stanowią element systemów kontroli w czasie rzeczywistym (ang. *Real Time Control*) systemów kanalizacyjnych.

3. Podsumowanie

Przedstawione w artykule nowe konstrukcje rurowych zbiorników retencyjnych, działających w układzie szeregowym (liniowym), umożliwiają bardziej efektywne wykorzystanie objętości retencyjnej w porównaniu z konstrukcjami jednokomorowymi. Symulacje hydrodynamiczne wykonane w programie SWMM5 dla deszczu krytycznego o czasie trwania 1 h na przykładowej zlewni zurbanizowanej wykazały, że możliwe jest zmniejszenie wymaganej pojemności retencyjnej, od 18 do nawet 37% w zależności od zastosowanego typu zbiornika. Pozostałe symulacje, przeprowadzone dla deszczu o dłuższym czasie trwania i dwóch występujących po sobie szczytowych przepływach, także wykazały wysoką efektywność objętościową proponowanych rozwiązań, od 18 do nawet 50%. Obliczenia numeryczne dla zaproponowanych schematów zbiorników rurowych charakteryzowały się dużą stabilnością rozwiązań i mogą być rekomendowane do zastosowania w modelach hydrodynamicznych dużych zlewni na etapie określania optymalnych wariantów inwestycyjnych projektowanych sieci kanalizacyjnych.

Literatura

- [1] Butler D., Davies J.W.: Urban drainage. E & FN Spon, London 2000.
- [2] Durrans T.: Stormwater Conveyance Modeling and Design. Haestad Press, Waterbury 2002.
- [3] Gribbin J.: Introduction to Hydraulics & Hydrology: With Applications for Stormwater Management. Delmar Learning, 2001.
- [4] Mrowiec M.: Możliwości stosowania rurowych zbiorników retencyjnych o zwiększonej efektywności hydraulicznej w systemach kanalizacyjnych. IV Konferencja naukowo-techniczna „Nowe technologie w sieciach i instalacjach wodociągowych i kanalizacyjnych”, Ustroń, luty 2002, s. 373-382.
- [5] Mrowiec M.: Zbiornik retencyjny cieczy. Zgłoszenie patentowe do UP RP nr P351176.
- [6] Mrowiec M., Kisiel A.: Rurowy zbiornik retencyjny jako proste, tanie i funkcjonalne rozwiązanie konstrukcyjne. Inżynieria Środowiska, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, z. 16/2003, tom II, s. 52-58.

- [7] Mrowiec M., Kisiel A.: Simulation model of an in-line storage tank with throttle pipe. The 10th Scientific Conference "State of Art Trends of Development and Challenges in Civil Engineering". Koszyce, 11-13 September, 2005.
- [8] Mrowiec M., Kisiel A.: An innovative construction of an on-line storage tank. 10th International Conference on Urban Drainage. Copenhagen, 21-26 August, 2005.

SIMULATION OF THE TUBULAR STORAGE TANK USING DYNAMIC WAVE ROUTING MODEL

S u m m a r y

The paper presents the construction of detention tanks with internal throttle pipe designed for stormwater management in densely urbanized areas. They can be used both in existing and new separate sewer systems (in combined systems with some restrictions) to increase the storage capacity at low investment cost. Hydrodynamic simulations have been made in SWMM5 for two rainfall events and storage pipe diameter equal to 2.0 meters shows significantly higher efficiency (even to 50%) of the proposed constructions in comparison to a single-chamber tank with orifice as flow regulator.

Złożono w redakcji we wrześniu 2008 r.