

Dorota GAJUK¹, Marcin K. WIDOMSKI¹, Anna MUSZ¹ i Grzegorz ŁAGÓD¹

MODELOWANIE NUMERYCZNE W ILOŚCIOWEJ I JAKOŚCIOWEJ OCENIE MOŻLIWOŚCI ROZBUDOWY SIECI KANALIZACJI DESZCZOWEJ

NUMERICAL MODELING IN QUANTITATIVE AND QUALITATIVE ANALYSIS OF EXTENSION OF STORM SEWAGE SYSTEM

Abstrakt: W pracy przedstawiono próbę zastosowania modelowania numerycznego do ilościowej i jakościowej oceny możliwości rozbudowy systemu kanalizacji deszczowej. Model wybranego fragmentu sieci kanalizacyjnej miasta Chełm wykonano w programie SWMM5. W badaniach przeanalizowano trzy warianty charakteryzujące się różną intensywnością oraz czasem trwania opadu. Obliczenia hydrauliczne wykonano dla warunków przed i po rozbudowie sieci. Przedstawiona analiza została oparta na prędkościach przepływu ścieków, napełnieniu kanałów oraz ładunkach transportowanych zanieczyszczeń. Po wykonaniu obliczeń symulacyjnych sieci po jej rozbudowie otrzymano wyniki, w których zaobserwowano zmiany w prędkości przepływu, napełnieniach kanałów, ładunkach badanego zanieczyszczenia. Odnotowano także w wynikach symulacji wypływ ścieków ze studzienek połączeniowych lub rewizyjnych na powierzchnię odwadnianego terenu. Przeprowadzone badania wskazują również, iż istniejący system zaprojektowany na podstawie wzoru Błaszczyka w obecnych warunkach jest częściowo przewymiarowany. W związku z tym prędkość samooczyszczania przewodów nie została osiągnięta w znacznej części sieci. Ze względu na brak kalibracji przedstawianego modelu otrzymane wyniki należy traktować jako wyniki badań wstępnych.

Słowa kluczowe: kanalizacja deszczowa, modelowanie numeryczne, rozbudowa sieci, analiza ilościowa i jakościowa

Rozbudowa miejskich systemów kanalizacji deszczowej, ze względu na występujące już na etapie projektowania liczne problemy obejmujące powiększenie powierzchni zlewni, zmianę stopnia uszczelnienia odwadnianych powierzchni, wzrost natężenia spływu powierzchniowego, przepływu ścieków deszczowych oraz ładunków przenoszonych zanieczyszczeń wynikające ze zmiany powierzchni i charakteru odwadnianej zlewni, może być określona jako złożony i wymagający problem inżynierski [1]. Rozbudowa istniejących systemów może, w niektórych przypadkach, doprowadzić do poprawy właściwości hydraulicznych przepływu ścieków w kanałach deszczowych poprzez zapewnienie prędkości samooczyszczania kanałów w czasie spływu ścieków do odbiornika. Wynika to z faktu, iż zastosowane w części istniejących sieci kanalizacji deszczowych średnice przewodów uniemożliwiają samoczynne płukanie przewodów oraz usuwanie nagromadzonych osadów przez przepływające ścieki deszczowe [2, 3].

Przyjęcie błędnych rozwiązań projektowych przy rozbudowie sieci kanalizacji deszczowej może doprowadzić do okresowego podpiętrzania ścieków deszczowych w studzienkach, prowadzącego do zalewania ciągów komunikacyjnych, wydostawania się ścieków na powierzchnię terenu oraz wzrostu stężeń zanieczyszczeń transportowanych wraz ze ściekami deszczowymi i zrzucanych do odbiornika [4-6]. Występowanie okresowego podtapiania ciągów komunikacyjnych należy bezwzględnie uznać za zjawisko niekorzystne, wpływające na funkcjonowanie jednostki osadniczej. Natomiast wzrost

¹ Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, tel. 81 538 41 38, email: M.Widomski@wis.pol.lublin.pl

stężeń, a co za tym idzie - ładunków, zanieczyszczeń przenoszonych przez ścieki deszczowe może zdecydowanie negatywnie wpływać na jakość wód odbiornika. Ścieki deszczowe, jak wykazują badania literaturowe, w zależności od rodzaju i sposobu wykorzystania odwadniającej powierzchni zurbanizowanej przenoszą znaczne stężenia zanieczyszczeń, tj. zawiesiny ogólnej, ChZT, BZT, oraz metali ciężkich i związków ropopochodnych [6-8]. W związku z tym w wielu przypadkach w krajach Europy Zachodniej, zgodnie z Ramową Dyrektywą Wodną [9], podejmuje się decyzje o ograniczeniu stosowania kanalizacji deszczowej na rzecz zatrzymywania i oczyszczania ścieków deszczowych w miejscu ich powstawania [10, 11]. Stąd analiza wpływu zwiększonego zrztu ścieków deszczowych na jakość wód odbiornika przeprowadzona na etapie projektowania rozbudowy kanalizacji deszczowej wydaje się koniecznością.

Jak widać, rozbudowa sieci kanalizacji deszczowej może okazać się zadaniem złożonym, wymagającym przeprowadzenia analiz ilościowych i jakościowych już na etapie projektowania. Znacznym ułatwieniem dla projektantów i decydentów może okazać się zastosowanie modelowania numerycznego umożliwiającego wariantowe analizy przedprojektowe dla zróżnicowanych opadów oraz różnorakiego sposobu odwadniania i podłączania nowych zlewni o różnym stopniu uszczelnienia powierzchni. Jednym z najpopularniejszych programów umożliwiających prowadzenie wielowariantowych obliczeń jest opracowany przez United States Environmental Protection Agency (USEPA) model SWMM 5 (*Storm Water Management Model*). Program ten umożliwia prowadzenie dynamicznych analiz ilościowych i jakościowych działania sieci kanalizacji deszczowej o wielokrotnie pozytywnie zweryfikowanej jakości obliczeń [5, 12, 13].

Zaprezentowane badania miały na celu przeprowadzenie analizy ilościowej i jakościowej możliwości rozbudowy kanalizacji deszczowej dla wybranej zlewni w m. Chełm. Badania zostaną oparte na obliczeniach numerycznych przeprowadzonych za pomocą programu SWMM 5. Do analizy wybrano prędkości przepływu, napełnienia kanałów, a także stężenie i ładunek zawiesiny ogólnej na wylocie z układu kanalizacyjnego przed i po jego rozbudowie.

Materiały i metody

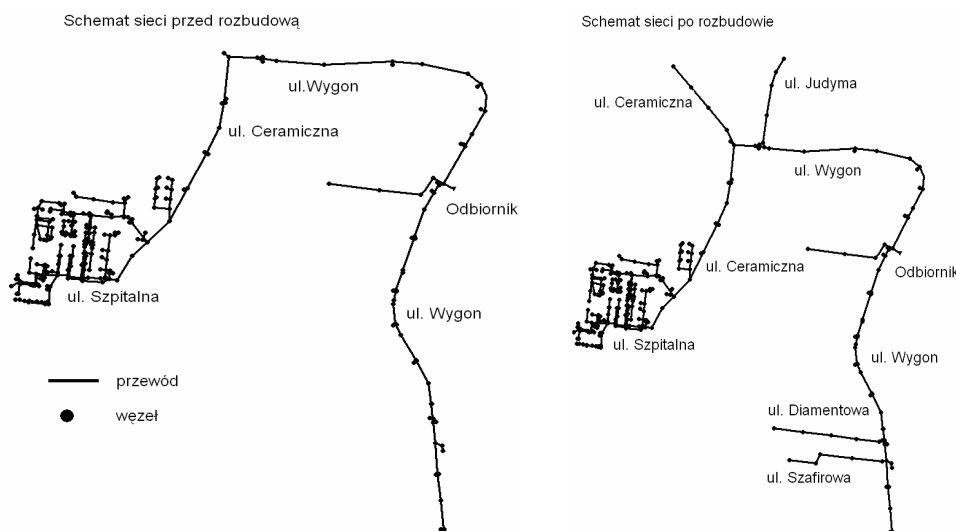
Badana zlewnia, o powierzchni 17,23 ha, obejmująca ulice Szpitalną, Wygon i Ceramiczną, leży w północno-zachodniej części miasta Chełm. Zlewnia obejmuje zabudowę jednorodziną oraz teren szpitala. Istniejąca sieć kanalizacyjna wykonana jest z przewodów betonowych o średnicach od 100 do 1600 mm i łącznej długości przewodów 1,3 km. Ścieki deszczowe odprowadzane są do zbiornika retencyjnego o powierzchni 0,62 ha i średniej głębokości 1,9 m, zlokalizowanego na końcówce sieci. W dalszej kolejności kierowane są do rzeki Uherki. Zapropozowana rozbudowa istniejącej sieci kanalizacji deszczowej będzie polegała na powiększeniu odwadnianego obszaru o zlewnie ulic Szafirowej, Diamentowej, Judyma i Ceramicznej. Rozbudowa kanalizacji spowoduje wzrost powierzchni zlewni o 6,66 ha.

Obliczenia numeryczne pracy sieci kanalizacji deszczowej przed oraz po jej rozbudowie wykonano w programie SWMM 5 [14]. Wartości parametrów modelu istniejącej sieci odczytano z mapy zasadniczej oraz dobrano z dostępnych zaleceń projektowych programu SWMM 5 [15], zaś dla sieci projektowanej obliczono

wg obowiązujących zasad projektowania kanalizacji deszczowej bądź przyjęto na podstawie danych literaturowych [16, 17].

Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla trzech deszczy o różnym natężeniu i czasie trwania. Parametry deszczy, ze względu na brak stacji meteorologicznej na terenie m. Chełm, przyjęto na podstawie dostępnej literatury oraz aktualnych informacji pogodowych [18, 19]. Założone do obliczeń opady wyznaczono na podstawie obserwacji w stacji meteorologicznej w miejscowości Olszanka położonej 35 km od miasta Chełm w latach 2002-03, danych o najwyższych maksymalnych sumach dobowych opadów atmosferycznych w wybranych posterunkach w dorzeczu Wieprza (1951-2000) oraz wykresów archiwalnych pluwiogramów deszczy nawalnych z 6 stacji obserwacyjnych terenu Polski. Odpływ jednostkowy dla deszczu I o czasie trwania $t = 12$ h przyjęto w wysokości $3 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$, deszczu II o $t = 1,5$ h $65 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$, zaś dla deszczu III o $t = 2,5$ h $90 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$.

Obliczenia jakościowe oparto o zaimplementowane w programie SWMM 5 równania powstawania i zmywania zanieczyszczeń z powierzchni zlewni. Wykorzystano liniowy model generowania zanieczyszczenia na powierzchni terenu oraz model zmywu oparty o średnie stężenie dla zjawiska opadowego (*event mean concentration, EMC*) [14, 15]. Dane wejściowe do obliczeń przyjęto na podstawie badań literaturowych dla dwóch przyjętych rodzajów zagospodarowania terenu [6, 20, 21]. Zastosowane modele wraz z przyjętymi wartościami niezbędnych danych zaprezentowano w tabeli 1.



Rys. 1. Schemat sieci przed oraz po rozbudowie

Fig. 1. Modeled storm water system existing and after development

Wykonany na potrzeby prezentowanych badań model numeryczny wymaga przeprowadzenia procesu kalibracji opartego na wielokrotnych pomiarach terenowych ilościowych i jakościowych charakterystyk pracy sieci.

Tabela 1
Modele zastosowane w obliczeniach jakościowych wraz z danymi wejściowymi

Tabela 1

Table 1

Models and input data applied to qualitative calculations

		Gromadzenie zanieczyszczenia	Zmywanie zanieczyszczenia
Model		$B = \frac{C_1 \cdot t}{C_2 + t}$ B - stężenie zanieczyszczenia zgromadzonego na powierzchni [mg·dm ⁻³] C ₁ - maksymalne stężenia zanieczyszczenia [mg·dm ⁻³] C ₂ - czas osiągnięcia połowy maksymalnego stężenia zanieczyszczenia [d] t - czas [d]	$W = C_3 \cdot Q^{C_4}$ W - stężenie zanieczyszczenia w spływie powierzchniowym C ₃ - współczynnik zmywania, równy co do wartości EMC [-] C ₄ - wykładnik [-] Q - natężenie spływu powierzchniowego [dm ³ ·s ⁻¹]
Przyjęte wartości	Teren zurbanizowany	C ₁ = 50 mg·dm ⁻³ C ₂ = 2 d	C ₃ = 100 [-] C ₄ = 1[-]
	Teren zielony	C ₁ = 100 mg·dm ⁻³ C ₂ = 3 d	C ₃ = 70 [-] C ₄ = 1[-]

Wyniki i dyskusja

Analiza możliwości rozbudowy sieci kanalizacji deszczowej w wybranej zlewni m. Chełm została oparta na obliczonych prędkościach przepływu, napełnieniach kanałów, a także stężeniach i ładunkach zawiesiny ogólnej na wylocie z układu kanalizacyjnego przed i po jego rozbudowie. Wyniki przeprowadzonych obliczeń zostały zaprezentowane na rysunku 2 oraz w tabeli 2.

Tabela 2
Wyniki obliczeń ilościowych i jakościowych dla istniejącej oraz planowanej sieci kanalizacji deszczowej

Tabela 2

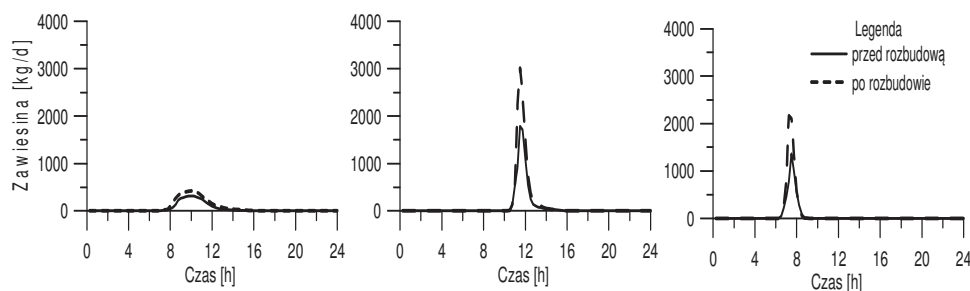
Table 2

Results of quantitative and qualitative calculations for existing and planned storm water network

	Jednostka	DESZCZ I		DESZCZ II		DESZCZ III	
		Przed rozbudową	Po rozbudowie	Przed rozbudową	Po rozbudowie	Przed rozbudową	Po rozbudowie
Prędkość [m·s ⁻¹] < 0,3	[%]	57,80	53,13	11,66	10,89	8,48	7,92
Prędkość [m·s ⁻¹] > 0,6	[%]	10,60	10,23	50,18	53,80	57,95	60,73
Liczba studzienek zagrożonych wylaniem	[szt.]	0	0	15	19	27	33
Zawiesina ogólna	[mg·dm ⁻³]	97,61	94,85	91,41	91,18	78,21	74,15

Przeprowadzone obliczenia numeryczne warunków hydraulicznych pracy sieci zarówno przed, jak i po jej rozbudowie wykazały, iż w sytuacji wystąpienia deszczu nr I prędkość przepływu ścieków w ponad 50% kanałów nie przekracza wartości 0,3 m·s⁻¹ (tab. 1). Zdecydowanie lepsze warunki hydrauliczne zaobserwowano po przyjęciu do obliczeń deszczu nr II i III charakteryzującego się znacznym natężeniem. Zaobserwowano,

iz w istniejącej sieci zaprojektowanej na podstawie wzoru Błaszczyka nawet w warunkach wystąpienia deszczu nr III w około 8% przewodów prędkość przepływu ścieków jest mniejsza od $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Po rozbudowie istniejącego systemu zalecana prędkość większa niż $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ występuje w ok. 53% (wariant II) i ok. 60% (wariant III) przewodów. Jednocześnie wyniki przeprowadzonych obliczeń wykazały, iż w przypadku deszczu o znacznych natężeniach zaobserwowano liczne wylania ścieków na powierzchnię terenu: dla deszczu II odnotowano wypływ ścieków z 15 studzienek dla sieci istniejącej oraz 19 po rozbudowie oraz odpowiednio 27 i 33 dla deszczu nr III. Zdecydowana większość studzienek zagrożonych wylaniem zlokalizowana jest w południowej części ul. Wygon na odcinkach sieci istniejącej o średnicach $0,3\pm 0,5 \text{ m}$ oraz nowo projektowanych kolektorach bocznych w ul. Diamentowej i Szafirowej o założonej średnicy $0,3 \text{ m}$. Widoczne jest, iż w przypadku rozbudowy sieci o zlewnie ul. Diamentowej i Szafirowej niezbędna jest zmiana średnicy istniejącego kolektora położonego w ul. Wygon.



Rys. 2. Ładunki zawiesiny ogólnej odprowadzanej z sieci kanalizacji deszczowej do odbiornika

Fig. 2. Loads of TSS discharged to storm sewage receiver

Wyniki obliczeń jakościowych analizy rozbudowy sieci kanalizacji deszczowej przedstawiono na rysunku 2. Widoczny jest wzrost ładunku analizowanego zanieczyszczenia (zawiesiny ogólnej) dla wszystkich badanych przypadków wywołany wzrostem powierzchni odwadniającej oraz udziałem powierzchni niezagospodarowanych - plac manewrowy oraz działki niezagospodarowane w rejonach ulic Szafirowej, Diamentowej, Judyma i Ceramicznej. Zaobserwowany maksymalny przyrost ładunków zawiesiny ogólnej osiągnął poziom odpowiednio dla poszczególnych deszczu: 32,1, 68,79 oraz 58,72%.

Nie zaobserwowano przekroczenia dopuszczalnego przez rozporządzenie [4] wartości stężenia zawiesiny ogólnej w wodach opadowych zrzucanych do odbiornika. Wyznaczona drogą obliczeń numerycznych maksymalna, dynamiczna wartość stężenia zawiesiny kształtowała się na poziomie $97,61 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, gdy wartość dopuszczalna wynosi $100 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Uzasadnione wydaje się jednak w tym przypadku wykorzystywanie otwartego zbiornika retencyjnego zlokalizowanego przy ul. Wygon do wstępnego podczyszczania ścieków deszczowych przed ich odprowadzeniem do rzeki Uherki. Obniżone względem wariantów I i II wartości stężeń i ładunków zaobserwowane dla wariantu trzeciego wynikają najprawdopodobniej ze znacznego modelowego wypływu ścieków na powierzchnię terenu podczas opadu ekstremalnego.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały przydatność zastosowania modelowania numerycznego w ilościowej i jakościowej analizie możliwości rozbudowy sieci kanalizacji deszczowej o nowe zlewnie w warunkach m. Chełm. Uzyskano możliwość analizy ilościowej i jakościowej sieci kanalizacji deszczowej zarówno istniejącej, jak i po proponowanej rozbudowie. Wyniki przeprowadzonych obliczeń wykazały, iż w zaprojektowanej z zastosowaniem wzoru Błaszczyka sieci kanalizacji deszczowej w przypadku opadów o niewielkim natężeniu panują niesprzyjające warunki hydrauliczne, które ulegają poprawie po rozbudowie sieci. Efektem powyższego może być, spowodowane niewystępowaniem prędkości samooczyszczania kanałów, odkładanie się zanieczyszczeń w przewodach kanalizacyjnych. Jednocześnie wykazano prawdopodobieństwo wystąpienia znacznych utrudnień komunikacyjnych wynikających z możliwości wypływu ścieków deszczowych na powierzchnię terenu i okresowego podtopienia ciągów komunikacyjnych w czasie deszczy nawalnych. Podtopienia występują zarówno w wariantach symulacji dla sieci istniejącej, jak i po rozbudowie i zlokalizowane są w większości na kolektorze położonym w południowej części ul. Wygon.

Wykonana analiza jakościowa wykazała wyraźny przyrost ładunków zawiesiny ogólnej po ewentualnej rozbudowie sieci. Nie odnotowano przekroczenia dopuszczalnych stężeń zawiesiny ogólnej w ściekach deszczowych opuszczających badany układ kanalizacyjny.

Zaprezentowane badania należy traktować jako wstępne, gdyż z przyczyn obiektywnych nie przeprowadzono kalibracji modelu istniejącej sieci kanalizacji deszczowej. Przewiduje się kontynuację niniejszych badań ukierunkowaną na ocenę efektywności wykorzystania zbiornika retencyjnego jako miejsca wstępnego podczyszczania ścieków deszczowych oraz przeprowadzenie pomiarów terenowych mających na celu umożliwienie kalibracji wykonanego modelu.

Literatura

- [1] Karnib A., Al-Hajjar J. i Boissier D.: *An expert system to evaluate the sensitivity of urban areas to the functioning failure of storm drainage networks*. Urban Water, 2002, **4**, 43-51.
- [2] Jaromin K., Borkowski T., Łągód G. i Widomski M.: *Analiza wpływu rodzaju materiału oraz czasu i sposobu eksploatacji kolektorów kanalizacji grawitacyjnej na prędkość przepływu ścieków*. Proc. ECOpole 2009, **3**(1), 139-145.
- [3] Jililati A., Jaromin K., Widomski M. i Łągód G.: *Charakterystyka osadów w wybranym systemie kanalizacji grawitacyjnej*. Proc. ECOpole 2009, **3**(1), 147-152.
- [4] Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego, z dnia 29.01.2009 r. DzU Nr 137, poz. 984.
- [5] Larm T.: *Stormwater quantity and quality in a multiple pond-wetland system: Flemingsbergsviken case stud*. Ecol. Eng., 2000, **15**, 57-75.
- [6] Taebi A. i Droste R.L.: *Pollution loads in urban runoff and sanitary wastewater*. Sci. Total Environ., 2004, **327**, 175-184.
- [7] Gnecco I., Berretta C., Lanza L.G. i La Barbera P.: *Storm water pollution in the urban environment of Genoa, Italy*. Atmosph. Res., 2005, **77**, 60-73.
- [8] Soonthornnonda P. i Christensen E.R.: *Source apportionment of pollutants and flows of combined sewer wastewater*. Water Res., 2008, **42**, 1989-1998.
- [9] Ramowa Dyrektywa Wodna EU 2000/60/EC.

- [10] Lindholm O.G. i Nordeide T.: *Relevance of some criteria for sustainability in a project for disconnecting of storm runoff*. Environ. Impact Assess. Rev., 2000, **20**, 413-423.
- [11] Villarreal E.L., Semadeni-Davies A. i Bengtsson L.: *Inner city stormwater control using a combination of best management practices*. Ecol. Eng., 2004, **22**, 279-298.
- [12] Chen J. i Adams B.J.: *A derived probability distribution approach to stormwater quality modelling*. Adv. Water Resour., 2007, **30**, 80-100.
- [13] Park M.-H., Swamikannu X. i Stenstrom M.K.: *Accuracy and precision of the volume-concentration method for urban stormwater modeling*, Water Res., 2009, **43**, 2773-2786.
- [14] Rossmann L.A.: *Storm water management model user's manual version 5.0. national risk management research laboratory*. Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati 2009.
- [15] Gironás J.L., Roesner A. i Davis J.: *Storm water management model applications manual. National risk management research laboratory*. Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati 2009.
- [16] Warunki techniczne wykonania i odbioru sieci kanalizacyjnych. Wymagania Techniczne CORBTI Instal, Warszawa 2003.
- [17] Heidrich Z.: *Wodociągi i kanalizacja, część 2 Kanalizacja*. Wyd. Szkol. Pedagog., Warszawa 1999.
- [18] Patro M.: *Warunki meteorologiczne*. [W:] Zintegrowany system zabezpieczeń przeciwoerozyjnych i ochrony wód terenów wyżynnych intensywnie użytkowanych rolniczo, pod red. D. Kowalski, W. Olszta, Rozprawy i Monografie, Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie **121**, Lublin 2005, 15-19.
- [19] Kaszewski B.M. i Siwek K.: *Dobowe sumy opadu atmosferycznego ≥ 50 mm w dorzeczu Wieprza i ich uwarunkowania cyrkulacyjne (1951-2000)*. [W:] Ekstremalne zjawiska hydrologiczne, pod red. E. Bogdanowicz. Polskie Towarzystwo Geofizyczne, Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa 2005, 122-130.
- [20] USEPA. Results of the nationwide urban runoff program, volume I - final report. NTIS PB84-185552. US Environmental Protection Agency, Washington 1983.
- [21] Jacob J.S. i Lopez R.: *Is denser greener? An evaluation of higher density development as an urban stormwater-quality best management practice*. J. Amer. Water Resour. Assoc., 2009, **45**(3), 687-701.

NUMERICAL MODELING IN QUANTITATIVE AND QUALITATIVE ANALYSIS OF EXTENSION OF STORM SEWAGE SYSTEM

Faculty of Environmental Engineering, Lublin University of Technology

Abstract: This paper presents the attempt of numerical modeling application to quantitative and qualitative analysis of storm-water sewer system extension in conditions of the selected urbanized catchment in Chelm, Poland. The USEPA's (*United States Environmental Protection Agency*) software SWMM 5 was applied to our studies. Three different rainfall events of various intensity and time were studied in our research. Our calculations considered hydraulic operational conditions before and after attachment of new pipelines. The presented analysis was based on sewage flow velocity, wastewater level along the pipelines and the load of pollutants leaving the sewer system. The visible changes in flow velocity, discharged loads of selected pollutants and sewage outflow from several join or inspection chambers were observed after development of an existing sewer system. Our studies reveals also the fact that the existing system, designed basing on Blaszczyk's formula is partially oversized, the velocity of pipes' self-purification was not assured in the some part of studied network. The quality of our observations may be reduced by the lack of model calibration.

Keywords: storm sewer, numerical modeling, network expansion, quantitative and qualitative analysis