

Wpłynęło 07.05.2014 r.
Zrecenzowano 30.05.2014 r.
Zaakceptowano 27.10.2014 r.
A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

EKOLOGICZNE ZAGOSPODAROWANIE WÓD OPADOWYCH – ZIELONE DACHY

Maciej MROWIEC^A, Małgorzata SOBCZYK^{BCDEF}

Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Środowiska i Biotechnologii

Streszczenie

Ekologiczne systemy odprowadzania wód opadowych z terenów zurbanizowanych, m.in. zielone dachy, mają na celu zapobieganie występowaniu podtopień terenów i jednocześnie ochronę odbiorników wodnych (rzeka). Zastosowanie zielonych dachów wpisuje się w koncepcję zrównoważonego rozwoju i pozwala usprawnić zachwiany przez urbanizację obieg wody. W pracy przedstawiono zalety zastosowania dachów zielonych, a także ich wpływ na redukcję wód opadowych odprowadzanych do kanalizacji miejskiej. Symulacje wykonano za pomocą programu EPA SWMM 5.0 oraz z wykorzystaniem rzeczywistych danych o opadach zarejestrowanych w Częstochowie w latach 2007–2008. Opracowane hydrogramy odpływu wód opadowych pozwoliły określić redukcję objętości odprowadzanych ścieków deszczowych oraz szczytowej wartości przepływu po zastosowaniu dachu zielonego. Wykonane badania wykazały redukcję objętości ścieków deszczowych w zakresie od 73 do 91%, a także redukcję przepływu o 35–78%.

Zielone dachy pozytywnie oddziałują na gospodarkę wodno-ściekową miast (przede wszystkim poprzez hydrauliczne odciążenie sieci kanalizacyjnej), a jednocześnie zwiększają powierzchnię terenów biologicznie czynnych w obszarach zurbanizowanych. Technologia ta, w zależności od konstrukcji, zmniejsza ilość odprowadzanej wody opadowej z powierzchni dachów o kilkadziesiąt procent. Zielone dachy to technologia generująca wymierne korzyści finansowe oraz niewymierne, związane z estetyką krajobrazu.

Słowa kluczowe: obieg wody w przyrodzie, program SWMM 5.0, wody opadowe, zielone dachy

WSTĘP

Procesowi urbanizacji towarzyszą zmiany warunków hydrologicznych. Wzrost stopnia uszczelnienia powierzchni miast wymusza odwodnienie terenu w głównej

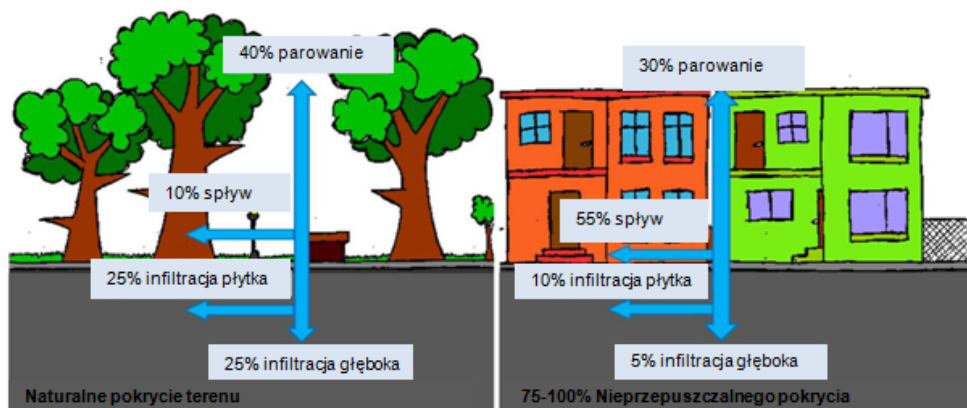
mierze bezpośrednio do kanalizacji, a stamtąd do wód powierzchniowych. Takie gospodarowanie wodami opadowymi powoduje w czasie intensywnych deszczów podtopienia terenu.

Koncepcja zielonych dachów, nazywanych też ekodachami bądź dachami roślinnymi, zyskała na popularności w ostatnich dekadach. Doceniono nie tylko ich znaczenie estetyczne dla krajobrazu miejskiego, ale przede wszystkim ekologiczne [STANOWSKI 2007; STOVIN i in. 2007; UHL, SCHIEDT 2008]. Dynamicznie rozwinięła się także technologia ich projektowania i budowania, dzięki czemu można osiągnąć wiele korzyści ekonomicznych.

Obszary zurbanizowane charakteryzują się gęstą zabudową, z dużym udziałem powierzchni uszczelnionych, co utrudnia odprowadzanie wód opadowych w głąb gruntu (rys. 1) [BURSZTA-ADAMIAK 2012; DOBRZAŃSKA i in. 2008]. Można zauważyć, że odpływ wody deszczowej to tylko 10% całego opadu, natomiast na terenach zurbanizowanych, a zarazem nieprzepuszczalnych, odpływa aż 55% deszczu spadającego na dany obszar. Ten nadmiar wody opadowej trafia do systemów kanalizacyjnych. W obu przykładach występuje zjawisko parowania. W warunkach naturalnych aż 40% wody wraca do atmosfery w procesie ewapotranspiracji, natomiast na terenach zurbanizowanych tylko 30%. Ważnymi procesami w obiegu hydrologicznym wody deszczowej jest infiltracja płytka oraz infiltracja głęboka; także tu zachodzą istotne różnice w obu przykładach.

Na zróżnicowanie bilansu wodnego zlewni wpływają następujące czynniki:

- meteorologiczne, tj.: ilość i rozkład opadów atmosferycznych, temperatura powietrza, prędkość wiatru;
- fizycznogeograficzne, tj.: kształt zlewni, spadki terenu, przepuszczalność podłoża;
- antropogeniczne, czyli stopień przekształcenia środowiska naturalnego zlewni [KOTOWSKI 2011; KRÓLIKOWSKA, KRÓLIKOWSKI 2012; SŁYŚ 2013].



Rys. 1. Zmiana bilansu wodnego spowodowana rozwojem zabudowy; źródło: opracowanie własne

Fig. 1. Change in the water balance caused by the progress of buildup; source: own elaboration

Na terenach silnie zurbanizowanych coraz częściej występuje też zjawisko miejskich wysp ciepła, wynikające z zaburzeń cyklu hydrologicznego oraz zmian klimatycznych. Tereny zielone w przestrzeni miejskiej wspomagają zatrzymanie wód opadowych, zapobiegają powodziom i przesuszeniu miasta. Zatrzymanie wody w przestrzeni miejskiej poprawia nie tylko funkcjonowanie terenów zieleni, ale też obniża koszty ich utrzymania [MROWIEC 2008; TEEMUSK, MANDER 2007].

Zielone dachy są istotnym uzupełnieniem szerokiego wachlarza dostępnych rozwiązań technicznych, dających możliwość realizacji zrównoważonych systemów odwadniania zlewni, charakteryzującej się gęstą zabudową [KOCEWIAK 2009]. Dane literaturowe wykazują, że zielony dach z ekstensywnym systemem zazielenienia umożliwi zmniejszenie zrzutu wód opadowych o 75–85% w zależności od spadku dachu [GETTER i in. 2007]. Zdolność magazynowania wody opadowej w zielonym dachu zależy od struktury warstw oraz od warunków klimatycznych. Istotne jest również odzyskiwanie zdolności retencyjnej dachów zielonych po okresach deszczowych, na co ma wpływ proces ewapotranspiracji [FIORETTI i in. 2010; STOVIN i in. 2013; VANWOERT i in. 2005].

Zastosowanie zielonych dachów jest zazwyczaj kojarzone z kwestią regulacji przepływu wody na obszarze zurbanizowanym. Pozytywny wpływ zielonych dachów jest w tym zakresie oczywisty i przekłada się na [GRAHAM, KIM 2003]:

- redukcję objętości spływających wód opadowych do kanalizacji;
- zmniejszenie szczytowych wartości przepływów w systemach kanalizacyjnych;
- redukcję częstotliwości działania przelewów burzowych;
- poprawę efektywności działania oczyszczalni ścieków w okresach pogody deszczowej;
- poprawę jakości spływających wód opadowych (nie dla wszystkich wskaźników zanieczyszczeń).

Wykonanie zielonych dachów jest jednak obwarowane wieloma ograniczeniami, do których można zaliczyć m.in.

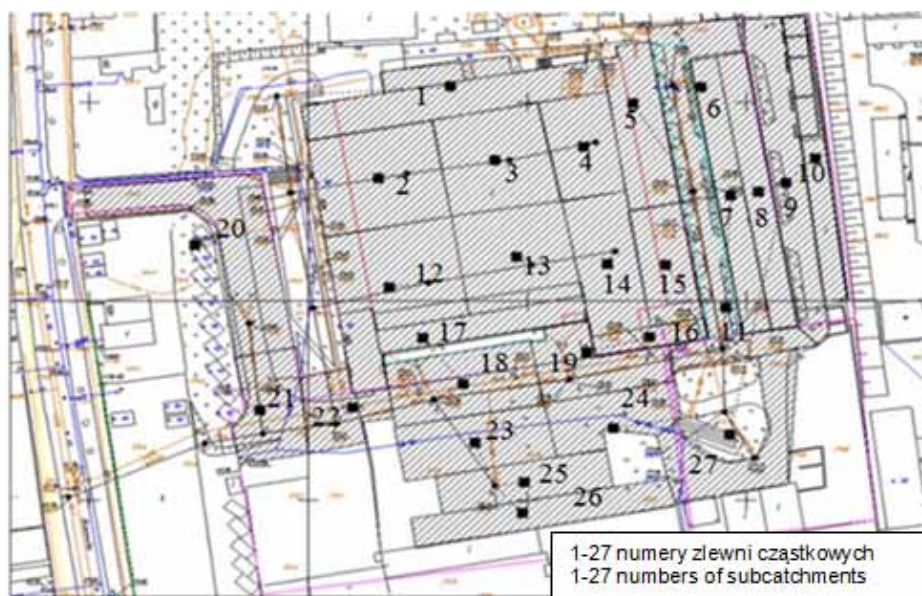
- konstrukcję dachu, która musi wytrzymać dodatkowy ciężar;
- spadek połaci dachowej (nie powinien być większy niż 30°);
- niezbędne jest wykonanie zabezpieczeń hydroizolacyjnych, paroizolacyjnych, a także ochrona przed uszkodzeniem dachu przez korzenie roślin;
- należy zapewnić dobór roślinności, odpowiedniej dla lokalnych warunków klimatycznych;
- należy stosować właściwy substrat, zapewniający wystarczającą wilgotność w okresach bezdeszczowych, niezbędną do właściwej vegetacji roślin.

W pracy przedstawiono wpływ zastosowania zielonego dachu na redukcję objętości wód opadowych odprowadzanych do kanalizacji miejskiej. Wyniki badań przeprowadzonych w wielu krajach, m.in. w Niemczech, Wielkiej Brytanii, Szwajcarii czy Włoszech pokazują, że zielone dachy przyczyniają się do redukcji szczytowych wartości odpływu, opóźnienia spływu wód deszczowych, a także zmniejsz-

szenia całkowitego odpływu z połąci dachu poprzez magazynowanie czy odparowanie do atmosfery [BURSZTA-ADAMIAK 2010; PALLA i in. 2011].

METODY BADAŃ

Analizowany teren zajmuje powierzchnię 1,33 ha. Jest to zlewnia rzeczywista, stanowiąca budynek Instytutu Inżynierii Środowiska Politechniki Częstochowskiej oraz tereny przyległe, tj. parking, chodniki i drogi wewnętrzne. Powierzchnia dachu Instytutu zajmuje 0,57 ha. Obszar ten podzielono na 27 zlewni cząstkowych (rys. 2) o powierzchni od 0,01 do 0,07 ha.



Rys. 2. Schemat analizowanej sieci i podział na zlewnie cząstkowe; źródło: opracowanie własne

Fig. 2. Scheme of analysed drainage system and the division into sub-catchments;
source: own elaboration

Dla potrzeb prowadzenia symulacji wykorzystano program SWMM 5.0, z zastosowaniem funkcji LID Controls (Low Impact Development). Program SWMM 5.0 (ang. EPA Storm Water Management Model) umożliwia prowadzenie symulacji zdarzeniowych lub ciągłych. Moduł LID pozwala na zastosowanie technik związanych z ograniczeniem wód opadowych zasilających zlewnię poprzez zastosowanie urządzeń infiltracyjnych i retencyjnych [BURSZTA-ADAMIAK, MROWIEC 2013; SAKSON, ZAWILSKI 2013]. Zastosowanie modułu LID ma na celu określenie wielkości przechwytywanego spływu powierzchniowego wody opadowej z danej

powierzchni zlewni, z wykorzystaniem procesów retencji, infiltracji i ewapotranspiracji.

W przeprowadzonych symulacjach założono pokrycie całej powierzchni dachu Instytutu Inżynierii Środowiska ekstensywnym dachem zielonym o parametrach zadanych przez producenta. Warstwy ekstensywnego zielonego dachu składały się z hydroizolacji, warstwy magazynującej, włókniny chłonno-ochronnej, substratu oraz roślinności. W analizach wykorzystano wyniki badań intensywnych opadów deszczu zarejestrowanych w latach 2007–2008 przez deszczomierz zamontowany na dachu budynku.

Porównania wpływu oddziaływania zielonych dachów na odciążenie systemu kanalizacyjnego dokonano na podstawie analizy dwóch parametrów: redukcji maksymalnych chwilowych natężeń przepływów oraz redukcji objętości ścieków odprowadzanych do miejskiej kanalizacji deszczowej.

WYNIKI BADAŃ

Wyniki symulacji dla poszczególnych opadów przedstawiono w tabeli 1. W przypadku wszystkich opadów założono, że substrat zielonego dachu odzyskał swoją pełną zdolność retencyjną od czasu poprzedniego opadu. Przedstawioną objętość odprowadzanych ścieków deszczowych oraz przepływ ścieków podano dla powierzchni rozpatrywanego dachu wynoszącego 0,57 ha.

Z zestawienia wyników symulacji wynika, że objętość ścieków opadowych odprowadzanych z dachu konwencjonalnego mieściła się w przedziale od 38,96 do 182,45 m³. W wariacie uwzględniającym budowę dachu ekstensywnego następuje istotna redukcja odprowadzanej objętości ścieków – od 3,54 do 30,86 m³. Przekłada się to na redukcję w zakresie 73–91%.

W odniesieniu do chwilowych wartości maksymalnych, redukcja jest mniejsza i wynosi od 35 do 78%. Hydrogramy odpływu z dachu konwencjonalnego oraz zielonego przedstawiono na wykresach (rys. 3, 4), z zaznaczeniem redukcji objętości oraz przepływu.

Do wykonania wykresów wykorzystano opady z 21.06.2007 r. i 14.07.2007 r. Parametry deszczu charakteryzuje wysokość i natężenie opadu. Wartości wysokości opadu mieszczą się w przedziale od 10,70 do 45,80 mm, natomiast natężenie deszczu od 40 do 172 dm³·(s·ha)⁻¹.

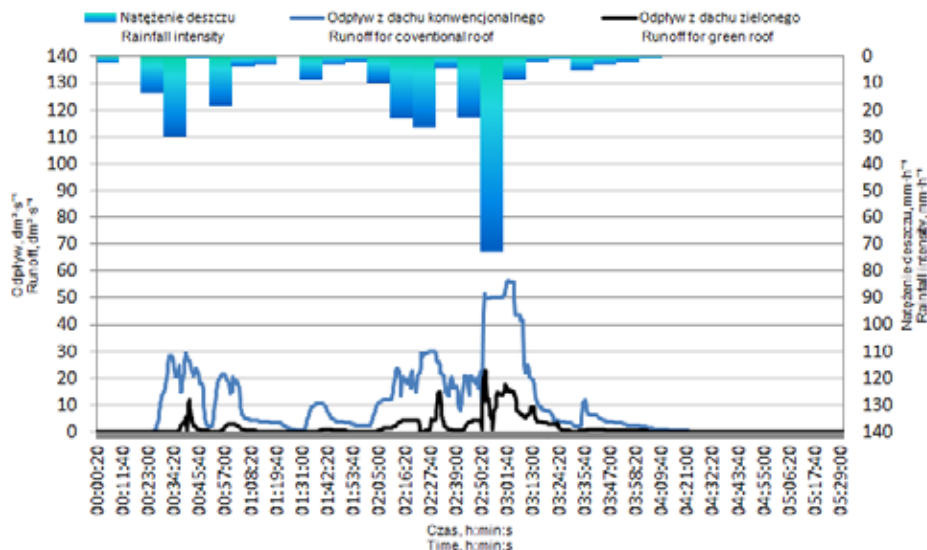
W dniu 21.06.2007 r. zaobserwowano najwyższą wysokość opadu, tj. 45,80 mm. Zastosowanie zielonego dachu spowodowało redukcję odprowadzanych ścieków deszczowych o 83% oraz redukcję przepływu o 59%.

Największą redukcję odprowadzanych ścieków deszczowych (91%) i największą redukcję przepływu (78%) zaobserwowano w dniu 14.07.2007r., w którym wysokość opadu wynosiła 10,70 mm (tab. 1).

Tabela 1. Zestawienie wyników symulacji**Table 1.** Results of simulations

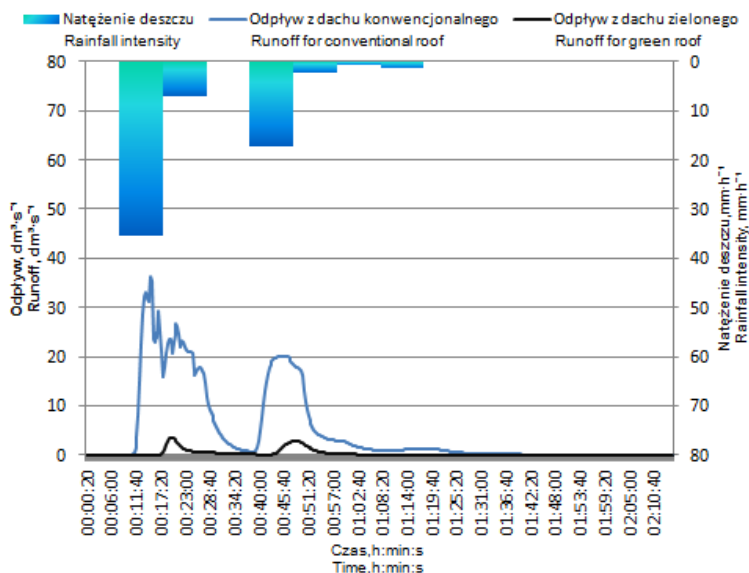
Data Date	Czas trwania deszczu Rainfall duration min	Wysokość opadu Rainfall mm	Maksymalne natężenie 10-minutowe Maximum 10-min intensity mm	Natężenie deszczu Rainfall intensity $\text{dm}^3 \cdot (\text{s} \cdot \text{ha})^{-1}$	Objętość odprowadzanych ścieków deszczowych Volume of discharged storm water m^3		Redukcja objętości ścieków deszczowych Reduction of storm water volume %	Przepływ Flow $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		Redukcja przepływu Flow reduction %
					rodzaj dachu type of roof			rodzaj dachu type of roof		
					konwencjonalny conventional	zielony green		konwencjonalny conventional	zielony green	
26.05.2007	57	26,60	56,40	94	106,46	20,54	81	52,89	21,12	60
21.06.2007	214	45,80	73,20	122	182,45	30,86	83	56,24	22,76	59
14.07.2007	70	10,70	70,80	118	38,96	3,54	91	36,32	13,15	78
27.07.2007	77	12,90	43,20	72	49,52	11,98	76	58,02	36,48	37
18.09.2007	49	16,60	73,80	123	63,59	17,16	73	69,24	42,76	38
13.07.2008	88	13,94	56,40	94	54,56	11,64	79	56,67	24,20	57
02.08.2008	58	27,20	103,20	172	102,85	23,04	78	61,89	39,11	37
08.08.2008	20	16,60	103,20	172	64,12	12,67	80	58,37	37,93	35
16.08.2008	74	19,90	24,00	40	79,16	8,68	89	53,61	12,76	76

Źródło: wyniki własne. Source: own studies.



Rys. 3. Porównanie hydrogramów odpływu z dachu konwencjonalnego i ekstensywnego dachu zielonego dla opadu wraz z hietogramami opadu z 21.06.2007 r.; źródło: wyniki własne

Fig. 3. Comparison of runoff hydrographs for conventional roof and extensive green roof for rainfall including hyetographs on 21.06.2007; source: own studies



Rys. 4. Porównanie hydrogramów odpływu z dachu konwencjonalnego i ekstensywnego dachu zielonego dla opadu wraz z hietogramami opadu z 14.07.2007 r.; źródło: wyniki własne

Fig. 4. Comparison of runoff hydrographs for conventional roof and extensive green roof for rainfall including hyetographs on 14.07.2007; source: own studies

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że wielkość opóźnienia odpływu w znacznym stopniu zależy od natężenia deszczu.

PODSUMOWANIE

Zielone dachy nawet w najprostszej, ekstensywnej formie, stanowią doskonałe uzupełnienie realizacji koncepcji rozwoju zrównoważonych systemów odwadniania zlewni. Inne korzyści związane ze stosowaniem zielonych dachów (oszczędność energii, estetyka krajobrazu), stanowią dodatkową zachętę do powszechniejszego stosowania tej technologii w budownictwie. Symulacje przeprowadzone z wykorzystaniem programu SWMM 5.0 (z funkcją LID Controls) dla obiektu zlokalizowanego w Częstochowie wskazują na możliwość redukcji objętości odpływających wód opadowych na poziomie ok. 80% dla zarejestrowanych intensywnych opadów. W odniesieniu do chwilowych przepływów maksymalnych, średnia redukcja wyniosła 50%. Uzyskane wyniki wskazują na istotny potencjał zielonych dachów w zakresie ich oddziaływania na obieg wody na obszarach zurbanizowanych.

LITERATURA

- BURSZTA-ADAMIAK E. 2010. Retencja wód opadowych na dachach zielonych w warunkach wrocławskich. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*. Nr 3 s. 21–24.
- BURSZTA-ADAMIAK E. 2012. Analysis of the retention capacity of green roofs. *Journal of Water and Land Development*. No. 16 s. 3–9.
- BURSZTA-ADAMIAK E., MROWIEC M. 2013. Modelling of green roofs' hydrologic performance using EPA's SWMM. *Water Science & Technology*. Vol. 68 s. 36–42.
- DOBRAŃSKA B., DOBRZAŃSKI G., KIELCZEWSKI D. 2008. *Ochrona środowiska przyrodniczego*. Warszawa. Wydaw. PWN. ISBN 978-83-01-15495-0 ss. 159.
- FIORETTI R., PALLA A., LANZA L.G., PRINCIPI P. 2010. Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Building and Environment*. Vol. 45 s. 1890–1904.
- GETTER L. K., ROWE D. B., ANDRESEN A. J. 2007. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*. Vol. 31 s. 225–231.
- GRAHAM P., KIM M. 2003. Evaluating the stormwater management benefits of green roofs through water balance modelling. *Conference Proceedings. Greening Rooftops for Sustainable Communities*. 29–30 May 2003. Chicago s. 390–399.
- KOCEWIAK A. 2009. Zagospodarowanie wody deszczowej. *Wodociągi – Kanalizacja*. Nr 4(62) s. 29.
- KOTOWSKI A. 2011. *Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów*. Wrocław. Wydaw. Seidel-Przywecki s. 75–77.
- KRÓLIKOWSKA J., KRÓLIKOWSKI A. 2012. *Wody opadowe. Odprowadzanie, zagospodarowanie, podczyszczanie i wykorzystanie*. Wrocław. Wydaw. Seidel-Przywecki s. 207–229.
- MROWIEC M. 2008. Zielone dachy jako element zrównoważonych systemów odprowadzania wód opadowych. Wrocław. Wydaw. Seidel-Przywecki s. 59–72.
- PALLA A., GNECCO I., LANZA L.G. 2011. Non-dimensional design parameters and performance assessment of rainwater harvesting systems. *Journal of Hydrology*. Vol. 401 s. 65–76.

- SAKSON G., ZAWILSKI M. 2013. Wpływ zastosowania obiektów LID na funkcjonowanie miejskich systemów kanalizacyjnych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*. Nr 6 s. 246–248.
- SŁYŚ D. 2013. Zrównoważone systemy odwodnienia miast. Wrocław. Dolnośląskie Wydaw. Edukacyjne s. 184–199.
- STANOWSKI J. 2007. Zieleń na dachach. *Zieleń Miejska*. Nr 4 s. 36–37.
- STOVIN V., DUNNETT N., HALLAM A. 2007. Green roofs – getting sustainable drainage off the ground. *Proceedings of the 6th NOVATECH Conference, June 2007, Lyon*. Vol. 1 s. 11–18.
- STOVIN V., POË S., BERRETTA Ch. 2013. A modelling study of long term green roof retention performance. *Journal of Environmental Management*. Vol. 131 s. 206–215.
- TEEMUSK A., MANDER Ü. 2007. Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: The effects of short-term events. *Ecological Engineering*. Vol. 30 s. 271–277.
- UHL M., SCHIEDT L. 2008. Green roof storm water retention – monitoring results. *11th International Conference on Urban Drainage*. Edinburgh s. 1–10.
- VANWOERT N.D., ROWE D.B., ANDRESEN J.A., RUGH C.L., FERNANDEZ R.T., XIAO L. 2005. Green roof stormwater retention: effects of roof surface, slope and media depth. *Journal of Environmental Quality*. Vol. 34 s. 1036–1044.

Maciej MROWIEC, Małgorzata SOB CZYK

ECOLOGICAL MANAGEMENT OF RAINWATERS – GREEN ROOFS

Key words: *green roofs, SWMM5 programme, rainwater, the water cycle*

S u m m a r y

The management of rainwater in times of continuous development of urban areas is to prevent the formation of floods and to balance the water cycles. Presented in this study ecological use of rainwater, which is part of the concept of sustainable development, can improve water management in urban areas. Green roofs serve several purposes for a building, such as absorbing rainwater, providing insulation, creating a habitat for wildlife, and help lowering urban air temperatures and mitigating the heat island effect. The study included information on:

- advantages of the use of green roofs,
- balance of rainwater in urban areas with building equipped with green roofs (comparison to the building with traditional roof),
- example of runoff hydrographs of storm water discharged from the green roof and from the traditional roof (simulations using SWMM5 software).

The use of eco roofs may improve sewerage economy by reducing the amount of runoff and may enlarge green areas thus improving the aesthetics of urban areas. Depending on the structure, this technology eliminates or reduces the amount of rainwater discharge from roof surfaces and can be used both for new buildings and for the existing ones.

Adres do korespondencji: mgr inż. Małgorzata Sobczyk, Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Środowiska i Biotechnologii, 42-200 Częstochowa, ul. Brzeźnicka 60a; tel. 695 726 167, e-mail: m.sobczyk@is.pcz.pl