

Bartosz KAŻMIERCZAK, Katarzyna WARTALSKA, Monika NOWAKOWSKA*

PORÓWNANIE METOD WYMIAROWANIA ZBIORNIKÓW RETENCYJNYCH W WARUNKACH HYDROLOGICZNYCH WROCŁAWIA

W pracy analizowano przydatność metod do wymiarowania przelewowych zbiorników retencyjnych ścieków deszczowych, tj. dotychczasową metodę analityczną (wykorzystującą wzór Błaszczyka na natężenie jednostkowe opadów), nową metodę analityczną wymiarowania zbiorników (bazującą na współczesnych modelach opadów maksymalnych), oraz metodę wskaźnikową (wg wytycznej DWA-A 117). Dla przykładowej zlewni deszczowej miasta Wrocławia, wykonano obliczenia objętości użytkowej zbiornika, przy wykorzystaniu każdej metody. Uzyskane wyniki potwierdzają zaniżenie niezbędnej objętości użytkowej zbiornika w przypadku zastosowania modelu Błaszczyka do obliczeń miarodajnych strumieni ścieków. Wykazana została również przydatność nowej, uogólnionej metodyki do obliczania objętości czynnej zbiorników przelewowych, jako dającej zgodne wyniki z metodą przedstawioną w DWA-A 117, która jest uznawana za bezpieczną metodę wymiarowania zbiorników retencyjnych.

1. WSTĘP

Systematyczne ocieplanie się klimatu, obserwowane zwłaszcza w ostatnich dziesięcioleciach, skutkować będzie zwiększeniem prawdopodobieństwa wystąpienia ekstremalnych zjawisk opadowych, co przełoży się na częstsze występowanie tzw. powodzi miejskich, a tym samym na większe straty ekonomiczne. Już obecnie można zaobserwować zwiększenie liczby deszczowych dni w roku oraz intensywności opadów [11, 13]. Istnieje więc konieczność uwzględnienia tych zmian klimatycznych podczas projektowania i wymiarowania systemów kanalizacyjnych.

* Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Wodociągów i Kanalizacji, pl. Grunwaldzki 9, 50–377 Wrocław, bartosz.kazmierczak@pwr.edu.pl.

Bezpieczne projektowanie systemów kanalizacyjnych ma na celu zapewnienie odpowiedniego standardu odwodnienia terenu, definiowanego jako przystosowanie systemu do przyjęcia prognozowanych – maksymalnych strumieni wód opadowych z częstością równą dopuszczalnej częstości wystąpienia wylania na powierzchnię terenu [15]. Obecna norma europejska PN-EN 752:2008 [22] ogranicza częstość wylewów z kanalizacji do „akceptowalnych społecznie” rzadkich powtarzalności ich występowania: od raz na 10 do raz na 50 lat, zależnie od rodzaju zagospodarowania przestrzennego (tabela 1).

Tabela 1. Zalecane częstości projektowe deszczu i dopuszczalne częstości wystąpienia wylania wg PN-EN 752:2008

Rodzaj zagospodarowania terenu	Częstość deszczu obliczeniowego [1 raz na C lat]	Częstość wystąpienia wylania [1 raz na C lat]
Tereny wiejskie	1 na 1	1 na 10
Tereny mieszkaniowe	1 na 2	1 na 20
Centra miast, tereny usług i przemysłu	1 na 5	1 na 30
Podziemne obiekty komunikacyjne, przejścia i przejazdy pod ulicami, itp.	1 na 10	1 na 50

Sieci kanalizacyjne projektuje się na perspektywę minimum 50–100 lat. Wykorzystywane są różne metody bilansowania strumieni wód opadowych, a wybór właściwej z nich jest gwarancją zaprojektowania kanałów o dostatecznej przepustowości, a w przypadku zbiorników retencyjnych - o odpowiedniej objętości użytkowej.

Zbiorniki retencyjne stanowią ważny element zarówno modernizowanych, jak i nowo-projektowanych systemów kanalizacyjnych, pełniąc rolę regulacyjno-redukcyjną strumieni ścieków. Ze względu na ich konstrukcję oraz zasadę działania, wyróżnia się dwie grupy grawitacyjnych zbiorników retencyjnych ścieków deszczowych [15]:

- przepływowe –zwykle jednokomorowe (klasyczne), z reguły budowane jako odkryte,
- przelewowe –wielokomorowe (nowej generacji), zwykle podziemne.

Wybór konstrukcji zbiornika uzależniony powinien być od analizy techniczno-ekonomicznej wariantów rozwiązań technicznych dla miejscowych uwarunkowań terenowych [18]. Zbiorniki przelewowe działają równomiernie, przez co cechują się mniejszą wymaganą objętością użytkową (o ok. 30%) w stosunku do zbiorników przepływowych [7].

W pracy poddano analizie porównawczej wyniki obliczeń objętości użytkowej przelewowego zbiornika retencyjnego ścieków deszczowych, zwymiarowanego trzema metodami, a mianowicie: dotychczasową, analityczną metodą opracowaną przez Dziopaką [7, 8], w której stosowany był wzór Błaszczyka na jednostkowe natężenie opadu, nową uogólnioną metodą z wykorzystaniem modelu opadów maksymalnych, oraz niemiecką metodą wskaźnikową – wg DWA-A 117:2006 [6]. Porównań obliczanych objętości użytkowych zbiornika dokonano dla przykładowej zlewni deszczowej w warunkach hydrologicznych Wrocławia.

2. METODY WYMIAROWANIA SYSTEMÓW ODWODNIENÍ TERENÓW

Do wymiarowania kanalizacji (deszczowej i ogólnospławnej) w Polsce stosowano w przeszłości najczęściej metodę stałych natężeń (MSN - dla zlewni do 50 ha) lub metodę granicznych natężeń (MGN). Każda z metod wykorzystywała fizyczny wzór W. Błaszczyka, oparty na opadach zarejestrowanych w Warszawie w latach 1837÷1891 i 1914÷1925, o postaci (1), podanej w pracy [1] z 1954 roku:

$$q = 6,67C^{1/3}H^{2/3}t_d^{-2/3} \quad (1)$$

gdzie:

- q – jednostkowe natężenie opadu deszczu, $\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{ha})$,
- C – częstość deszczu o natężeniu q z przewyższeniem, lata,
- H – wysokość opadu normalnego (średniego z wielolecia), mm,
- t_d – czas trwania deszczu, min.

Wzór Błaszczyka (1) zaniża obecne wartości jednostkowych natężeń deszczu o około 40%, co wykazano m.in. w pracy [16], na przykładzie opadów zarejestrowanych we Wrocławiu w latach 1960–2009. Ponadto strumień spływu wód opadowych jest dodatkowo zaniżany w wyniku założeń wyjściowych w dotychczas stosowanych metodach obliczeniowych (MSN, MGN), odnośnie czasów retencji kanałowej i terenowej, w stosunku do innych metod czasu przepływu stosowanych w Europie (o podobnych jak w Polsce warunkach klimatycznych). Powoduje to częstsze wylewy z kanałów niż dopuszczalne aktualnie obowiązującą normą PN-EN 752:2008 (tabela 1), co wykazano m. in. w pracach [14, 15, 17].

Obecnie do wymiarowania systemów odwodnień terenów zalecana jest tzw. metoda maksymalnych natężeń (MMN), z wykorzystaniem współczesnych modeli opadów maksymalnych [15]. Stosować można zarówno modele probabilistyczne, jak np. model Bogdanowicz-Stachý o ogólnopolskim zasięgu [4] (który powstał na podstawie pomiarów deszczu na 20 stacjach IMGW w latach 1960–1990), jak i modele fizyczne opadów maksymalnych, np. wzór fizyczny dla stacji IMGW Wrocław-Strachowice (oparty na pomiarach deszczu w okresie 1960–2009) – o uproszczonej postaci ($q = f(C, t_d)$), analogicznej do wzoru Błaszczyka [16]:

$$q_{\max} = 1667(-11,93C^{-0,218} + 17,0) t_d^{-0,725} \quad (2)$$

gdzie:

- q_{\max} – jednostkowe (maksymalne) natężenie opadu deszczu, $\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{ha})$,
- C – częstość występowania opadu (z przewyższeniem): $C \in [1; 100]$ lat,
- t_d – czas trwania deszczu: $t_d \in [5; 4320]$ min.

Miarodajny do wymiarowania sieci kanalizacyjnych i obiektów specjalnych (np. zbiorników retencyjnych) strumień Q ścieków opadowych (w dm^3/s), wg metody maksymalnych natężeń (MMN), oblicza się ze wzoru [15]:

$$Q = q_{\max} \psi_s F = q_{\max} F_{zr} \quad (3)$$

gdzie:

q_{\max} – jednostkowe (maksymalne) natężenie deszczu o czasie trwania (t_d) równym czasowi przepływu ścieków (t_p) w kanale, $\text{dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha})$,

ψ_s – szczytowy (maksymalny) współczynnik spływu, zależny od stopnia uszczelnienia terenu, spadków powierzchni i częstości (C) opadu, – ,

F – powierzchnia zlewni deszczowej, ha,

F_{zr} – zredukowana (szczelna) powierzchnia zlewni deszczowej, ha.

3. METODYKI ANALITYCZNEGO WYMIAROWANIA ZBIORNIKÓW RETENCYJNYCH W POLSCE

Zbiorniki retencyjne budowane są głównie w celu zabezpieczenia sieci kanalizacyjnych przez przeciążeniem hydraulicznym, w tym ochrony przed wylewami z kanałów i w efekcie podtopieniami terenów [3, 5, 12, 15] oraz do ochrony wód odbiornika przed nadmiernym zanieczyszczeniem [25, 26].

Głównym parametrem eksploatacyjnym zbiornika retencyjnego ścieków deszczowych jest współczynnik redukcji strumieni β , określane ze wzoru:

$$\beta = Q_o / Q_{dm} \quad (4)$$

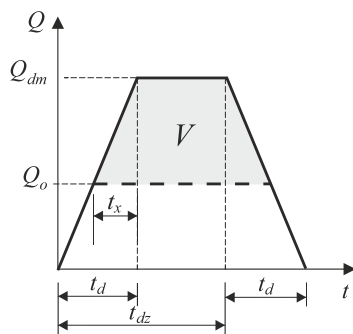
gdzie:

Q_o – strumień objętości ścieków odpływających ze zbiornika, m^3/s ,

Q_{dm} – miarodajny strumień objętości ścieków dopływających do zbiornika, m^3/s .

Odnosnie zbiorników przelewowych, dotychczasową podstawą określenia ich objętości czynnej był modelowy hydrogram dopływu ścieków deszczowych Q_{dm} – obliczany z zastosowaniem wzoru W. Błaszczyka (1), oraz hydrogram odpływu o stałej wartości Q_o ($\beta = \text{idem}$). Wymaganą objętość komory retencyjnej zbiornika (V) określano analitycznie, całkując bryłę wykresu (pole trapezu) na rysunku 1 [7, 19]:

$$V = 60(t_{dz} - t_d + t_x)(Q_{dm} - Q_o) \quad (5)$$



Rys. 1. Modelowe hydrogramy dopływu i odpływu oraz objętości (V) akumulacji ścieków deszczowych dla zbiornika przepływowego

Interwał czasu t_x , określający początek akumulacji ścieków w komorze retencyjnej, wyznaczano z zasady przystawania trójkątów:

$$\frac{t_x}{Q_{dm} - Q_o} = \frac{t_d}{Q_{dm}} \Rightarrow t_x = \frac{Q_{dm} - Q_o}{Q_{dm}} t_d = \left(1 - \frac{Q_o}{Q_{dm}}\right) t_d \quad (6)$$

Po wstawieniu za t_x zależność (6) do wzoru (5) otrzymuje się:

$$V = 60 \left(t_{dz} - \frac{Q_o}{Q_{dm}} t_d \right) (Q_{dm} - Q_o) \quad (7)$$

W dotychczasowej metodyce wymiarowania przelewowych zbiorników retencyjnych, opracowanej przez Dziopaka [7], wykorzystywano wzór Błaszczyka (1) o dogodnej analitycznie postaci:

$$q = \frac{A(C, H)}{t_d^{2/3}} \quad (8)$$

w której stała $A(C, H) = 6,67 C^{1/3} H^{2/3}$. Stąd w MGN miarodajny strumień objętości ścieków Q_{dm} zapisywany był jako:

$$Q_{dm} = \frac{6,67 \sqrt[3]{C H^2} \psi F}{t_d^{2/3} 1000} = q F_{zr} / 1000 \quad (9)$$

Wyjściowe równanie bilansu (7) daje się sprowadzić (po odpowiednich przekształceniach) do postaci kanonicznej równania drugiego stopnia, którego rozwiązaniem dla

miarodajnego czasu trwania deszczu do wymiarowania objętości zbiornika $t_d = t_{dz}$, jest pierwiastek [19]:

$$t_{dz} = \left[\frac{K_1}{\sqrt{K_2^2 + 3K_1Q_o} - K_2} \right]^3 \quad (10)$$

dla stałych:

$$K_1 = 6,67 \sqrt[3]{C H^2 \psi} F/1000 \quad \text{oraz} \quad K_2 = Q_o^2 t_d / K_1$$

Do wyznaczenia objętości czynnej zbiorników retencyjnych stosowano także inne metody analityczne (np. Mołokowa [2], Annena i Londonga [10]) oraz metody wskaźnikowe (m.in. P. Błaszczyka [23, 24], Mrowca [21]).

W pracy zaprezentowano nową, uogólnioną metodę analitycznego obliczania objętości czynnej zbiorników przelewowych. Podstawą jest tutaj również modelowy hydrogram dopływu ścieków deszczowych do zbiornika Q_{dm} (obliczany z nowych modeli opadów maksymalnych wg MMN) oraz modelowy hydrogram odpływu ścieków Q_o – przy stałym współczynniku redukcji strumieni $\beta = \text{idem}$ (rysunek 1).

Miarodajny strumień objętości dopływu ścieków do zbiornika $Q_{dm} = Q_{dz}$, podczas miarodajnego dla zbiornika opadu deszczowego o natężeniu $q = q_{dz}$, o częstości występowania C i czasie trwania t_{dz} oraz spływu wód deszczowych (z określonej powierzchni zlewni F o współczynniku spływu ψ_s), określić można z uniwersalnego równania hiperboli:

$$q_{dz} = \frac{A(C)}{t_{dz}^m} \quad (11)$$

a stąd:

$$Q_{dz} = \frac{A(C)}{t_{dz}^m} \frac{1}{1000} F \psi_s = q_{dz} F_x / 1000 \quad (12)$$

przy czym stałe $A(C)$ i m należy wyznaczyć na drodze aproksymacji dla konkretnej miejscowości, na podstawie opracowań statystycznych opadów (metodyka ich tworzenia przedstawiona jest m.in. w [15, 16]).

Wymaganą objętość czynną zbiornika przelewowego (V) określić można z równania wyjściowego bilansu:

$$V = 60 \left(t_{dz} - \frac{Q_o}{Q_{dz}} t_d \right) (Q_{dz} - Q_o) \quad (13)$$

Wprowadzając stałą pomocniczą K_1 :

$$K_1 = \frac{A(C)F_x}{1000} \quad (14)$$

i podstawiając ją do wzoru (13), przyjmie on postać:

$$V = 60 \left(K_1 t_{dz}^{1-m} - Q_o t_{dz} - Q_o t_d + \frac{Q_o^2 t_d t_{dz}^m}{K_1} \right) \quad (15)$$

Oznaczając drugą stałą K_2 , jako:

$$K_2 = \frac{Q_o^2 t_d}{K_1} \quad (16)$$

wzór (15) otrzyma uogólnioną postać analityczną:

$$V(t_{dz}) = 60 \left(K_1 t_{dz}^{1-m} - Q_o t_{dz} - Q_o t_d + K_2 t_{dz}^m \right) \quad (17)$$

W celu wyznaczenia wartości t_{dz} , dla której funkcja (17) przyjmuje wartość ekstremalną, rozwiązać należy następujące równania:

$$\frac{dV}{dt_{dz}} = 60 \left((1-m) K_1 t_{dz}^{-m} - Q_o + m K_2 t_{dz}^{m-1} \right) = 0 \quad (18)$$

$$(1-m) K_1 t_{dz}^{-m} + m K_2 t_{dz}^{m-1} - Q_o = 0 \quad (19)$$

Wprowadzając zastępczą niewiadomą X :

$$X = t_{dz}^{m-1} \quad (20)$$

oraz oznaczając dwie kolejne stałe: $K_3 = (1-m)K_1$ oraz $K_4 = mK_2$, równanie (20) zapisać można jako:

$$K_3 X^{m/(1-m)} + K_4 X - Q_o = 0 \quad (21)$$

Równanie (21) należy rozwiązać numerycznie, ale szczególne jego przypadki można rozwiązać analitycznie (np. dla $m = 2/3$ – jak w modelu Błaszczyka (1) [19]). Po rozwiązaniu równania (21), możliwe jest obliczenie miarodajnego czasu trwania deszczu t_{dz} dla zbiornika:

$$t_{dz} = X^{\frac{1}{m-1}} \quad (22)$$

4. METODYKA WYMIAROWANIA ZBIORNIKÓW RETENCYJNYCH W NIEMCZECH

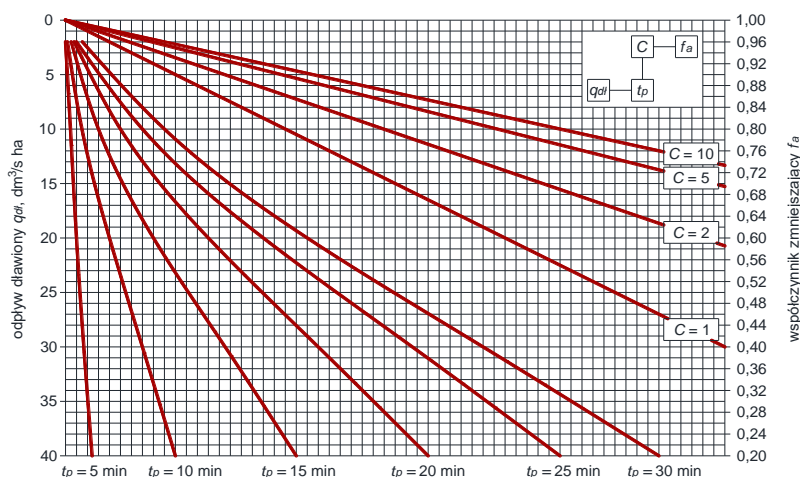
Wytyczne techniczne DWA-117:2006 [6], wprowadzone w Niemczech, przedstawiają obecnie dwie metody wymiarowania zbiorników retencyjnych, a ich wybór uzależniają przede wszystkim od wielkości powierzchni zlewni skanalizowanej oraz czasu przepływu w analizowanej sieci. W niniejszej pracy znajduje zastosowanie tzw. metoda wskaźnikowa wg wytycznej DWA-A 117, która powstała w wyniku statystycznego uogólnienia szeregów czasowych opadów z 10 różnych miast niemieckich, z uwzględnieniem ryzyka przewyższenia obliczanej objętości zbiornika w zakresie częstości opadów $C \in [1; 10]$ lat (na podstawie metodologii zawartej w pracy [9]). Jest to metoda nadająca się do wyznaczania objętości użytkowej zbiornika retencyjnego dla małych zlewni (do 200 ha) oraz dla krótkich czasów przepływu w sieci (do 30 minut) [20]. Zgodnie z tą metodyką, objętość użytkowa V_u (w m^3) zbiornika z dławionym odpływem może być obliczona ze wzoru [6, 15]:

$$V_u = V_j \cdot F_{zr} = 0,06 [q_{\max}(t) - q_{dt}] \cdot t_d \cdot f_a \cdot f_z \cdot F_{zr} \quad (23)$$

gdzie:

- V_j – wskaźnik jednostkowej objętości retencyjnej zbiornika – odniesiony do zredukowanej powierzchni F_{zr} (ha) zlewni, $dm^3/(s \cdot ha)$,
- $q_{\max}(t)$ – maksymalne jednostkowe natężenie deszczu o czasie trwania t_d (minut) i częstości występowania C (lat), $dm^3/(s \cdot ha)$,
- q_{dt} – jednostkowy dławiony odpływ ze zbiornika, $dm^3/(s \cdot ha)$,
- f_a – współczynnik opóźnienia (redukcji), zależny od czasu przepływu w sieci t_p (minut) i częstości występowania deszczu C (lat): $f_a \leq 1$,
- f_z – współczynnik ryzyka przewyższenia obliczanej objętości: $f_z \in [1,1; 1,2]$, –.

Wartość współczynnika redukcji f_a , dla zakresu jednostkowego dławionego odpływu $q_o \in [2; 40] dm^3/(s \cdot ha)$, czasu przepływu $t_p \in [5; 30]$ min oraz częstości występowania deszczu $C \in [1; 10]$ lat określa się z rysunku 2, wg [6].

Rys. 2. Nomogram do odczytu wartości współczynnika redukcyjnego f_a

Zalecaną obecnie [20], bezpieczną wartością współczynnika ryzyka przewyższenia obliczanej objętości zbiornika jest przyjęcie $f_z = 1,2$.

5. PORÓWNANIE WYNIKÓW OBLICZEŃ OBJĘTOŚCI UŻYTKOWEJ ZBIORNIKA

W celu porównania obliczanych objętości użytkowej przelewowego zbiornika retencyjnego ścieków deszczowych, uzyskanych przy pomocy metody wskaźnikowej (wg DWA-A 117), względem polskich metod analitycznych, tj.: metodyki Dziopaka – przy wykorzystaniu dotychczas stosowanego modelu opadów Błaszczyka oraz nowej, uogólnionej metody analitycznej – z modelem opadów maksymalnych dla Wrocławia, wykonano obliczenia dla rzeczywistej zlewni ścieków deszczowych w warunkach hydrologicznych miasta Wrocławia. Zlewnia ma powierzchnię zredukowaną $F_{zr} = 8,42$ ha. Czas przepływu w sieci kanalizacyjnej (przed zbiornikiem) wynosi $t_p = 10$ minut, a dyspozycyjna przepustowość istniejącego kolektora $Q_o = Q_{dt} = 200$ dm³/s. Stąd wartość jednostkowego dławionego odpływu ze zbiornika wyniesie: $q_{dt} = Q_{dt} / F_{zr} = 200/8,42 = 23,7$ dm³/(s·ha).

W pierwszej kolejności wykonano obliczenia z wykorzystaniem metodyki niemieckiej. Niezbędną do obliczeń objętości retencyjnej zbiornika przelewowego częstość deszczu obliczeniowego przyjęto jako równą $C = 5$ lat, natomiast czas trwania deszczu t założono jako równy czasowi przepływu ($t_d = t_p = 10$ minut). Do obliczeń przyjęto ponadto: współczynnik redukcyjny $f_a = 0,97$ (odczytany z rys. 2) oraz współczynnik ryzyka przewyższenia obliczanej objętości $f_z = 1,20$.

Natężenie jednostkowe deszczu obliczono z uproszczonego fizykalnego modelu opadów maksymalnych dla Wrocławia, postaci (2). Wyniki obliczeń objętości retencyjnej zbiornika zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki obliczeń objętości użytkowej zbiornika retencyjnego obliczonej wg DWA-A 117

Czas trwania opadu t_d [min]	Natężenie deszczu q_{\max} [$\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{ha})$] wg wzoru (2)	Jednostkowy dławiony odpływ q_{d1} [$\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{ha})$]	Różnica: $q_{\max}-q_{d1}$ [$\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{ha})$]	Jednostkowa objętość zbiornika V_j [m^3/ha (F_{zr})]	Objętość użytkowa zbiornika V_u [m^3]	Uwagi
10	270,1	23,7	246,4	172,1	1449	
15	201,3	23,7	177,6	186,1	1567	
30	121,8	23,7	98,1	205,5	1730	
45	90,8	23,7	67,1	210,9	1776	maksimum
60	73,7	23,7	50,0	209,5	1764	
90	54,9	23,7	31,2	196,1	1651	

Uzyskane wyniki obliczeń wg metody wskaźnikowej DWA-A 117 pozwoliły na ustalenie maksymalnej wymaganej objętości użytkowej zbiornika retencyjnego, jako równej około 1780 m^3 (tabela 2).

Następnie obliczenia niezbędnej pojemności retencyjnej zbiornika przeprowadzono przy wykorzystaniu polskich metod analitycznych. Do obliczenia miarodajnego strumienia objętości ścieków dopływających do zbiornika, w przypadku dotychczasowej metody wymiarowania przyjęto model opadów Błaszczyka (1) ($m = 2/3$; $A(C) = 6,67C^{1/3}H^{2/3}$), natomiast w przypadku nowej – uogólnionej metodyki – model opadów maksymalnych dla Wrocławia (2) ($m = 0,725$; $A(C) = 166,7(-11,93C^{-0,218} + 17,0)$).

W przypadku modelu (1) przyjęto opad roczny H w wysokości 590 mm, jak dla warunków hydrologicznych Wrocławia. Z uwagi na świadomość zaniżania wyników obliczeń jednostkowych natężeń opadów przez wzór Błaszczyka, w celach porównawczych obliczenia przeprowadzono zarówno dla częstości deszczu obliczeniowego $C = 5$ lat jak i dla $C = 10$ lat (wg zaleceń [15]). Miarodajny strumień objętości ścieków, dla czasu trwania deszczu $t_d = t_p = 10$ minut oraz częstości deszczu obliczeniowego $C = 5$ lat, wynosi $Q_{dm} = 1446 \text{ dm}^3/\text{s}$, stąd współczynnik redukcji przepływu dla tej wartości Q_{dm} wyniesie:

$$\beta = Q_{d1} / Q_{dm} = 200/1446 = 0,14$$

Analogicznie, dla częstości $C = 10$ lat, miarodajny strumień ścieków dopływających do zbiornika wynosi $Q_{dm} = 1821 \text{ dm}^3/\text{s}$, co przekłada się na współczynnik redukcji β równy około 0,11.

Obliczony wg modelu (2) strumień objętości ścieków (dla czasu trwania opadu $t_d = t_p = 10$ minut oraz częstości $C = 5$ lat) Q_{dm} wyniósł $2275 \text{ dm}^3/\text{s}$. Obliczony dla tego strumienia Q_{dm} współczynnik redukcji przepływów β wyniósł około 0,09.

W celu umożliwienia porównania wyników obliczeń objętości retencyjnej zbiornika - uzyskanych różnymi metodami (niemiecką i dwoma polskimi), dla przypadku wykorzystania modelu Błaszczyka oraz modelu opadów maksymalnych dla Wrocławia, zastosowano współczynnik bezpieczeństwa, zwiększający obliczoną objętość zbiornika tymi metodami - analogicznie do współczynnika ryzyka przewyższenia obliczanej objętości (wg metody DWA-A 117), o wartości 1,20.

Dla przejrzystości wyników analiz przyjęto jednakową częstość deszczu zarówno dla kanału dopływowego, jak i zbiornika retencyjnego ($C = C_z$), a także założono równość współczynników spływu ($\psi = \psi_s$) w MGN i MMN - bilansowania strumieni Q_{dm} .

Wyniki obliczonych objętości użytkowych zbiornika retencyjnego przy pomocy analizowanych metod, dla podanych częstości C wystąpienia opadu oraz czasu trwania opadu $t_d = t_p = 10$ minut, przedstawiono w tabeli 3. Ponadto zestawiono uzyskane dla każdej z metod współczynniki redukcji przepływów β oraz czas trwania deszczu dla zbiornika t_{dz} .

Tabela 3. Porównanie objętości użytkowych zbiornika retencyjnego obliczanych analizowanymi w pracy metodami

Metodyka obliczeń	Częstość opadu C [lata]	Współczynnik redukcji strumieni β	Czas trwania deszczu t_{dz} [min]	Objętość użytkowa zbiornika V_u [m^3]	Stosunek objętości zbiornika w stosunku do metodyki DWA-A 117 $V_u/V_{u \text{ DWA-A117}}$
1	2	3	4	5	6
Dotychczasowa metodyka - z modelem opadów Błaszczyka (1)	5	0,14	40	974	0,55
	10	0,11	56	1426	0,80
Nowa metodyka - z modelem (2)	5	0,09	50	1708	0,96
Metodyka wg DWA-A117 - z modelem (2)	5	0,14	45	1776	1,00

Wyniki ilościowych porównań obliczanych – względnych objętości zbiornika $V_u/V_{u \text{ DWA-A117}}$, podane w kolumnie 6 w tabeli 3, wskazują jednoznacznie na silne zaniżenie objętości użytkowej V_u zbiornika w przypadku zastosowania dotychczas stosowanego modelu Błaszczyka (1), w stosunku do modelu opadów maksymalnych dla Wrocławia (2), będącego obecnie miarodajnym do wymiarowania sieci i obiektów kanalizacyjnych. Wielkość względnego niedoszacowania objętości $V_u/V_{u \text{ DWA-A117}}$ jest różna w zależności od częstości opadu C oraz współczynnika redukcji strumieni β . Zastosowanie modelu opadów Błaszczyka powoduje zaniżenie wymaganej objętości zbiornika sięgające nawet 45% - dla częstości opadu $C = 5$ lat. Obliczenia sprawdzające

dla $C = 10$ lat (wg zaleceń [15]) również wykazały niedoszacowanie wymaganej objętości użytkowej, ale już tylko o 20%.

Natomiast obliczenia wymaganej objętości czynnej zbiornika nową, uogólnioną metodą – przy zastosowaniu modelu (2), są porównywalne z wynikami uzyskanymi metodą wskaźnikową – wg DWA-A 117. Różnica $V_u/V_{uDWA-A117}$ wynosi 4% - co mieści się w klasie dokładności opisu opadów i metod wymiarowania zbiorników. Potwierdza to konieczność zastąpienia wzoru Błaszczyka przy wymiarowaniu systemów kanalizacyjnych w Polsce współczesnymi modelami opadów maksymalnych, co jest postulowane m.in. w pracach [14, 15, 16].

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Zbiorniki retencyjne są coraz częściej stosowane jako zabezpieczenie sieci kanalizacyjnych lub oczyszczalni ścieków przed przeciążeniem hydraulicznym, prowadzącym do wylewów z kanałów oraz podtopień terenów zurbanizowanych. Systematyczne ocieplenie się klimatu spowoduje prawdopodobnie zwiększenie liczby ekstremalnych zjawisk opadowych, co może prowadzić do coraz częściej występujących tzw. powodzi miejskich. Z uwagi na ten aspekt niezmiernie istotne jest prawidłowe wymiarowanie zbiorników retencyjnych, tak aby były one w stanie prawidłowo pełnić swoją funkcję również w przyszłości.

W pracy analizowano dotychczasową metodę wymiarowania przelewowych zbiorników retencyjnych, opierającą się na wzorze Błaszczyka na natężenie jednostkowe opadów. Przedstawiono też nową, uogólnioną metodykę do analitycznego obliczania objętości zbiorników przelewowych, opartą na fizykalnym modelu opadów maksymalnych dla Wrocławia, a także metodę wskaźnikową wg niemieckiej wytycznej DWA-A 117, zalecaną dla małych zlewni deszczowych.

Przeprowadzono porównawcze obliczenia dla przykładowej małej zlewni deszczowej w warunkach wrocławskich, z wykorzystaniem przedstawionych trzech metod wymiarowania przelewowego zbiornika retencyjnego. Uzyskane wyniki potwierdzają znaczne zaniżenie wymaganej objętości użytkowej zbiornika w przypadku zastosowania modelu Błaszczyka, jako podstawy do obliczeń miarodajnych strumieni ścieków. Jednocześnie stwierdzono dużą zgodność wyników obliczeń przeprowadzonych przy wykorzystaniu nowej, uogólnionej metodyki do analitycznego wymiarowania zbiorników przelewowych, z zastosowaniem modelu opadów maksymalnych dla Wrocławia, z wynikami uzyskanymi przy pomocy metody wskaźnikowej stosowanej w Niemczech, a uznanej za bezpieczną metodę określania objętości użytkowej zbiorników retencyjnych ścieków deszczowych [15]. Wykazano tym samym zasadność stosowania nowej metody analitycznej, jako dającej miarodajne wyniki wymiarowania.

W przypadku dużych zlewni kanalizacyjnych objętość użytkową zbiornika można ustalić jedynie na podstawie badań symulacyjnych, opartych na rzeczywistej charakterystyce hydrologicznej danej zlewni oraz charakterystyce hydraulicznej analizowanego systemu odwodnieniowego, uwzględniając zmiany w czasie zasięgu opadu oraz jego natężenia [15, 18].

Pracę zrealizowano w ramach tematu badawczego pt. „Zasady bezpiecznego projektowania i modernizacji systemów odwodnień terenów zurbanizowanych”, finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, w ramach działalności statutowej Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej w 2015 roku.

LITERATURA

- [1] BŁASZCZYK W., *Spyły deszczowe w sieci kanalizacyjnej*, GWiTS, 1954, No. 9, 262–271.
- [2] BŁASZCZYK W., ROMAN M., STAMATELLO H., *Kanalizacja*, Tom I. Wyd. Arkady, Warszawa 1974.
- [3] BOGACZ A., WOŹNICZKA P., BURSZTA-ADAMIAK E., KOLASIŃSKA K., *Metody zwiększenie retencji wodnej na terenach zurbanizowanych*. Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, 2013, Vol. 22 (1), No. 59, 27–35.
- [4] BOGDANOWICZ E., STACHY J., *Maksymalne opady deszczu w Polsce. Charakterystyki projektowe*. Materiały bad. Seria Hydrologia i Oceanologia nr 23. Wyd. IMiGW, Warszawa 1998.
- [5] BURSZTA-ADAMIAK E., *Analysis of stormwater retention on green roofs*, Archives of Environmental Protection, 2012, Vol. 38, No. 4, 3–13.
- [6] DWA-A 117: Bemessung von Regenrückhalteräumen. DVWK, Hennef 2006.
- [7] DZIOPAK J., *Analiza teoretyczna i modelowanie wielokomorowych zbiorników kanalizacyjnych*, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 1992.
- [8] DZIOPAK J., *Modelowanie wielokomorowych zbiorników retencyjnych w kanalizacji*, Oficyna Wyd. Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004.
- [9] HUNN V.: Nachweis und Bemessung von Regenrückhalteräumen in Siedlungsgebieten, Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz. Band 19. SuG-Verlag, Hannover 1999.
- [10] IMHOFF K., IMHOFF K. R., *Kanalizacja miast i oczyszczanie ścieków*, Poradnik. Wyd. Projprzem-EKO, Bydgoszcz 1996.
- [11] IPCC Climate Change: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press 2014.
- [12] KAŹMIERCZAK B., *Modelowanie matematyczne przelewu burzowego z cylindrycznym regulatorem wirowym odpływu*, Annual Set of Environment Protection, 2013, Vol. 15, 2158–2174.
- [13] KAŹMIERCZAK B., KOTOWSKI A., *The influence of precipitation intensity growth on the urban drainage systems designing*, Theoretical and Applied Climatology, 2014, Vol. 118, No. 1, 285–296.
- [14] KAŹMIERCZAK B., KOTOWSKI A., *Weryfikacja przepustowości kanalizacji deszczowej w modelowaniu hydrodynamicznym*, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.
- [15] KOTOWSKI A., *Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów (Wydanie II)*, Tom I – Sieci kanalizacyjne, Tom II – Obiekty specjalne, Wyd. Seidel-Przywecki, Warszawa 2015.
- [16] KOTOWSKI A., KAŹMIERCZAK B., DANCEWICZ A., *Modelowanie opadów do wymiarowania kanalizacji*, Wyd. KILiW PAN. Studia z zakresu Inżynierii nr 68, Warszawa 2010.

- [17] KOTOWSKI A., KAŻMIERCZAK B., NOWAKOWSKA M., *Analiza obciążenia systemu odwadniania terenu w przypadku prognozowanego zwiększenia częstości i intensywności deszczów z powodu zmian klimatycznych*, Ochrona Środowiska, 2013, Vol. 35, No. 1, 25–32.
- [18] KOTOWSKI A., KAŻMIERCZAK B., WARTALSKI A., *O projektowaniu i modelowaniu działania zbiornika retencyjnego ścieków deszczowych w warunkach hydrologicznych miasta Wrocławia*, GWiTS, 2015, No. 11, 403–410.
- [19] KOTOWSKI A., WARTALSKI J., WARTALSKI A., *Stosować przepływowe czy przelewowe zbiorniki retencyjne ścieków deszczowych?* GWiTS, 2009, No. 2, 18–22.
- [20] Merkblatt Nr. 4.3/9: Hinweise zur Anwendung des Arbeitsblattes DWA-A 117 „Bemessung von Regenrückhalteräumen“ vom April 2006. Bayerischen Landesamtes für Umwelt, 2012.
- [21] MROWIEC M., *Propozycja wymiarowania zbiorników retencyjnych odciążających hydraulicznie sieć kanalizacyjną*, VI Zjazd Kanalizatorów Polskich POLKAN'07, Łódź 6–7.12.2007. Monografie KIŚ PAN, Lublin 2007, Vol, 46, 153–162.
- [22] PN-EN 752:2008: Drain and sewer systems outside buildings. PKN, Warszawa 2008.
- [23] PRACA ZBIOROWA, *Zasady planowania i projektowania systemów kanalizacyjnych w aglomeracjach miejsko-przemysłowych i dużych miastach*, Wyd. IKŚ, Warszawa 1983.
- [24] TABERNACKI J., *Deszczowe zbiorniki retencyjne w kanalizacji*, Nowa Technika w Inż. Sanitarnej. Wodociągi i Kanalizacja, No. 11. Wyd. Arkady, Warszawa 1980.
- [25] ZAWILSKI M., BRZEZIŃSKA A., *Areal rainfall intensity distribution over an urban area and its effect on a combined sewerage system*, Urban Water Journal, 2013, Vol. 10, 1–11.
- [26] ZAWILSKI M., SAKSON G., *Ocena emisji zawiesin odprowadzanych kanalizacją deszczową z terenów zurbanizowanych*, Ochrona Środowiska, 2013, Vol. 35, No. 2, 33–40.

A COMPARISON OF METHODS FOR DIMENSIONING STORM WATER RESERVOIRS IN HYDROLOGICAL CONDITIONS OF THE CITY OF WROCLAW

The paper presents several methods of dimensioning overflow storm water reservoirs. Previous analytical method was analyzed, in which Błaszczyk's formula for the rainfall intensity is used. A new, generalized method of dimensioning storm water reservoirs was presented, that is based on current maximum precipitation models, and the simplified method of dimensioning according to the German guideline DWA-A 117. Calculations for mentioned methodologies were performed for the specific catchment of the city of Wrocław. Results obtained confirm that using Błaszczyk's formula lead to underestimation of the required reservoir volume. Likewise, the utility of the new, generalized method of estimating overflow storm water reservoirs volume was demonstrated, due to giving comparable results to that obtained with the use of the method from guideline DWA-A 117, considered as a safe methodology of dimensioning storage tanks.