

Andrzej KOTOWSKI  
Politechnika Wrocławska

## ANALIZA METODOLOGII MODELOWANIA OPADÓW DO WYMIAROWANIA KANALIZACJI

Opracowane w latach 50. ubiegłego wieku zasady wymiarowania odwodnień terenów w Polsce są nieodpowiednie, zaniżają bowiem wyniki obliczeń miarodajnych strumieni opadów. Zasady te wymagają weryfikacji; pilnego zastąpienia wymaga zwłaszcza model Błaszczyka nowymi, dokładniejszymi modelami o zasięgu lokalnym, na podstawie których byłoby możliwe opracowanie szczegółowego atlasu opadów w Polsce – na wzór atlasu KOSTRA w Niemczech. Podstawą niniejszej pracy były wyniki pomiarów pluwiograficznych ze stacji meteorologicznej IMGW Wrocław–Strachowice z lat 1960-1990. Na tej podstawie sformułowano i zweryfikowano w praktyce metodologię do fizykalnego bądź probabilistycznego opracowywania wyników pomiarów opadów do zastosowania na innych stacjach meteorologicznych w kraju.

### 1. Wprowadzenie

Nasilające się w ostatnich dziesięcioleciach ekstremalne zjawiska przyrodnicze, takie jak gwałtowne, długotrwałe opady i związane z nimi powodzie czy wylewy z kanalizacji, powodują znaczne straty gospodarcze. Aby ograniczyć te straty, powinno się ciągle doskonalić zasady wymiarowania odwodnień terenów, w tym systemów melioracyjnych i systemów kanalizacyjnych. Współczesne metody badawcze stosowane w hydrologii, w tym monitoring opadów, w powiązaniu z wiedzą z zakresu statystyki, rachunku prawdopodobieństwa i modelowania matematycznego stają się obecnie niezbędnymi narzędziami do wykorzystania w praktyce inżynierskiej.

Projektowanie systemów odwodnień terenów zurbanizowanych, zwłaszcza kanalizacji deszczowej bądź ogólnospławnej wraz z obiektami typu separatory, przelewy burzowe, zbiorniki retencyjne czy oczyszczalnie ścieków, w Polsce jest zadaniem trudnym ze względu na brak wiarygodnej metody określania miarodajnego do wymiarowania kanalizacji natężenia deszczu. Model opadów Błaszczyka z 1954 r., który jest wciąż najczęściej stosowany do projektowania systemów kanalizacyjnych w Polsce [1÷3], znacznie zaniża wyniki obliczeń strumieni deszczu, co wykazano w licznych analizach porównawczych [4÷12]. Ma to swoje konsekwencje przy wymiarowaniu odwodnień terenów w Polsce według zaleceń normy europejskiej PN-EN 752:2008 [13], wpływając bezpośrednio na większą częstość wylewów z kanalizacji czy też brak możliwości

odbioru wód opadowych. Norma ta ogranicza częstość występowania tych niekorzystnych zjawisk do rzadkich „akceptowanych społecznie” powtarzalności: raz na 10 lat w przypadku terenów wiejskich oraz raz na 20, 30 lub 50 lat dla terenów miejskich – odpowiednio dla rodzaju zagospodarowania przestrzennego. Wynika stąd konieczność pilnego zastąpienia modelu Błaszczyka nowymi dokładniejszymi modelami, w tym o zasięgu lokalnym, na podstawie których byłoby możliwe opracowanie szczegółowego atlasu opadów w Polsce – na wzór niemieckiego atlasu KOSTRA. Dlatego tak ważne stają się obecnie systematyczne badania opadów dążące do określenia statystycznej częstości występowania maksymalnych wysokości czy natężeń jednostkowych deszczy. Niezbędny jest do tego odpowiednio długi i jednorodny materiał archiwalny z obserwacji opadów [12, 14]. Aby uzyskać porównywalne modele opadów pochodzących z różnych stacji meteorologicznych, wyniki pomiarów wysokości czy natężeń opadów powinny być opracowywane i uogólniane jedną wspólną metodologią, którą proponuje się w pracy na przykładzie opisu opadów we Wrocławiu.

## 2. Metody badawcze

### 2.1. Ogólne charakterystyki opadów

Opady atmosferyczne będące nieciągłym elementem meteorologicznym charakteryzują się dużą zmiennością czasową i przestrzenną występowania oraz znacznym zróżnicowaniem sum wysokości. O zjawisku opadowym określonego obszaru decydują liczne uwarunkowania środowiskowe, spośród których do najważniejszych zalicza się: położenie geograficzne, odległość od mórz i oceanów, ukształtowanie powierzchni i wyniesienie obszaru nad poziomem morza, pokrycie i sposób użytkowania terenu itp.

Podstawową formą ilościowego opisu deszczy są modele zależności: intensywności  $I$ , mm/min, lub natężenia jednostkowego  $q$ ,  $\text{dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha})$  bądź wysokości  $h$ , mm, opadu od czasu jego trwania  $t$  i prawdopodobieństwa wystąpienia  $p$ :

$$I = I(t, p), \quad q = q(t, p), \quad h = h(t, p) \quad (1)$$

Związki te prezentowane są najczęściej w postaci krzywych typu IDF (ang. *Intensity-Duration-Frequency*) bądź też krzywych typu DDF (ang. *Depth-Duration-Frequency*) dla różnych prawdopodobieństw  $p$  (lub zamiennie częstości  $C = 1/p$ ) wystąpienia opadu. Krzywe IDF stanowią rodzinę hiperbol o ogólnym równaniu [1]:

$$I = \frac{a}{(t + b)^n} + c \quad (2)$$

gdzie  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $n$  – współczynniki empiryczne zależne od prawdopodobieństwa pojawienia się danego deszczu oraz od czynników klimatycznych i fizjograficznych zlewni. Do ich ustalenia niezbędna jest seria kilkudziesięciu lat homogenicznych obserwacji [15]. Krzywe deszczu miarodajnych typu IDF czy DDF są z założenia tworamı całkowicie sztucznymi – syntetycznymi. Na ich podstawie tworzony jest model blokowy opadu w zlewni o stałej wartości natężenia, który jest podstawą wymiarowania kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej tzw. metodami czasu przepływu [2, 16].

Miarodajne do projektowania bezpiecznych systemów odwodnień terenów są deszcze zarówno krótkotrwałe o dużym natężeniu jednostkowym ( $q$ ), jak i długotrwałe o znacznym zasięgu terytorialnym ( $A$ ), a więc o dużej wydajności ( $Q = qA$ ). W projektowaniu systemów kanalizacyjnych największe znaczenie mają intensywne opady. Wywołują one bowiem największe przepływy w kanałach deszczowych czy ogólnospławnych. Do wyodrębnienia opadów intensywnych (silne deszcze, ulewy, silne ulewy czy deszcze nawalne) najczęściej stosowane jest jakościowe kryterium Chomicza [17] (rys. 1.):

$$U_k = \sqrt{2^k} \cdot \sqrt{t} \quad (3)$$

gdzie:  $U_k$  – wysokość opadu kategorii  $k$  w skali Chomicza, mm,

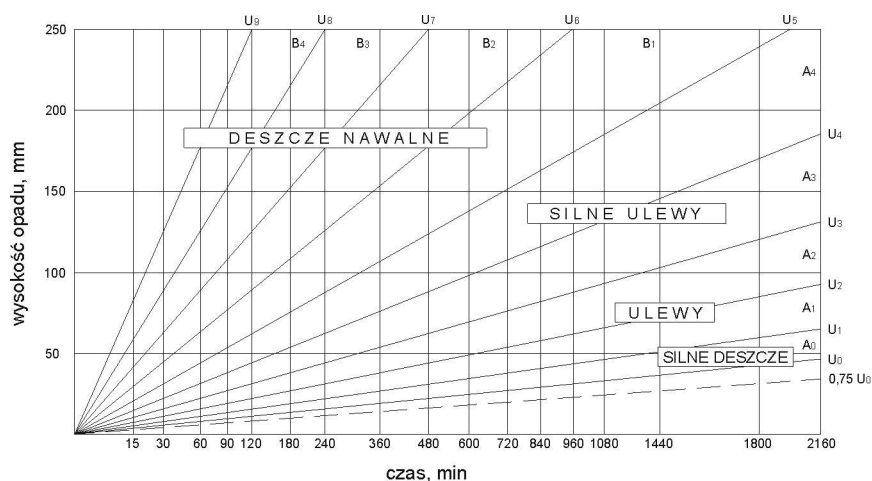
$k$  – numer skali (kategorii) opadu:  $k = 0, 1, 2, 3, \dots, 9$ ,

$t$  – czas trwania deszczu, min.

Wyznaczenie powtarzalności – częstości  $C$  (w latach) czy też prawdopodobieństwa  $p$  (w ułamku lub w %) występowania opadów deszczu o danej lub większej wysokości  $h$  (w mm) bądź intensywności  $I$  (w mm/min), bądź też wartości natężenia jednostkowego  $q$  (w  $\text{dm}^3/\text{s ha}$ ) odbywa się najczęściej poprzez szeregowanie opadów według nierosnących wartości tych wskaźników [1, 15, 18÷28]. W ten sposób w pierwszym wierszu znajdzie się opad o najwyższej zaobserwowanej wysokości (intensywności czy natężenia), a w ostatnim – o najniższej zmierzonej wartości wskaźnika. Wartości te można odnieść zarówno do całego okresu trwania opadu – metoda „średnich wartości”, jak i do poszczególnych jego fragmentów o znanych (wyznaczanych bądź odczytywanych z pluwiogramów) przedziałowych wartościach  $h$ ,  $I$  czy  $q$  – metoda „chwilowych–maksymalnych wartości”. Ta druga metoda jest właściwa do formułowania podstaw bezpiecznego projektowania systemów odwodnień terenów, a zwłaszcza kanalizacji. Na tej podstawie tworzone są modele deszczu miarodajnych, które – w zależności od przyjętej metodologii do ich opracowania – można podzielić na dwie klasy:

- modele fizykalne oparte na empirycznym przyporządkowaniu częstości występowania zmierzonych szeregów czasowych w rzeczywistym okresie ich obserwacji,

- modele probabilistyczne opracowane na podstawie doboru teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa występowania empirycznych szeregów częstości w szerszym niż rzeczywisty okres obserwacji opadów.



Rys. 1. Klasyfikacja opadów deszczu w skali Chomicza; linią przerywaną oznaczono własne kryterium wyboru opadów do analiz statystycznych, na podstawie [12]

Pierwsze historyczne już modele opadów, opisujące związki natężenia (intensywności bądź wysokości) z czasem trwania i częstością występowania deszczy w postaci krzywych typu DDF czy IDF, powstały w Polsce na podstawie pomiarów wysokości opadów za pomocą prostych rejestratorów typu deszczomierz Hellmanna o małej dokładności, zwłaszcza dla opadów o czasach trwania od 5 do 60 min. Często też wykorzystywano zarejestrowane sumy wysokości opadów godzinowych, przeliczane następnie na mniejsze interwały czasowe. Wzorowano się przy tym na modelach radzieckich (Aleksiejewa i Gorbaczewa), niemieckich (Reinholda) czy francuskich (Guillota i Dubanda). Z tych względów modele te należy uznać z założenia za przybliżone. Współczesne modele fizykalne i probabilistyczne oparte są już na dyskretyzacji danych pluwiograficznych, odczytywanych z pluwiogramów w określonych przedziałach czasu, np. 5, 10, 15, 30 min itd., aż do 72 h, dla rzeczywistego początku i końca trwania opadów, bądź zliczanych metodą sumy ruchomej. Wymagane są tutaj możliwie jak najdłuższy okres obserwacji opadów (minimum 30 lat, optimum 50 lat) i homogeniczność danych pluwiograficznych pod względem stosowanych przyrządów i technik pomiarowych (zwykle deszczomierz Hellmanna i pluwiograf z zapisem analogowym bądź cyfrowym), ale także niezmienność urbanistyczno-przyrodnicza otoczenia stacji meteorologicznej.

## 2.2. Modele fizykalne opadów Błaszczyka i Chomicza

Do projektowania odwodnień terenów w Polsce najczęściej stosowany jest model opadów Błaszczyka z 1954 r., wzorowany na strukturze formuły Gorbaczewa, w postaci [1]:

$$q = \frac{6,631 \sqrt[3]{H^2 C}}{t^{0,67}} \quad (4)$$

gdzie:  $q$  – jednostkowe (miarodajne) natężenie deszczu,  $\text{dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha})$ ,

$t$  – czas trwania deszczu, min,

$H$  – wysokość opadu normalnego (średniego z wielolecia), mm,

$C$  – częstość występowania deszczu o natężeniu  $q$  (z przewyższeniem), lata.

Model Błaszczyka oparty jest na analizie statystycznej zbioru 79 silnych deszczy, ulew oraz deszczy nawalnych, spełniających kryterium średniej wysokości  $h > t^{0,5}$  – dla  $t$  z całego okresu trwania deszczu (czyli powyżej krzywej  $U_0$ ) według skali (3) Chomicza (rys. 1.), zarejestrowanych w Warszawie w latach 1837÷1891 i 1914÷1925. Z łącznego okresu 67 lat obserwacji analizie poddano jedynie opady z 37 lat – odrzucono lata, w których nie odnotowano ani jednego silnego deszczu, ulewy bądź deszczu nawalnego. Zmienność opadów na obszarze kraju scharakteryzowano za pomocą opadu normalnego ( $H$ ).

Chomicz z materiału badawczego wykorzystanego przez Błaszczyka, tj. z 79 intensywnych opadów, wyeliminował 8 silnych deszczy, ograniczając statystyczną analizę do pozostałych 71 ulew i deszczy nawalnych, spełniających kryterium  $h > (2t)^{0,5}$  dla całego okresu trwania opadu (czyli powyżej krzywej  $U_1$ , rys. 1.) [20]. Dla wybranych przez Błaszczyka 37 lat obserwacji (1837÷1839, 1841, 1844÷1845, 1847÷1848, 1851, 1853, 1855, 1857, 1861÷1865, 1869÷1875, 1878, 1882, 1889÷1891, 1914÷1916, 1918÷1920, 1922 i 1925) określił wysokość maksymalnego opadu zależnością:

$$h_{\max} = a\sqrt{t} - bt \quad (5)$$

gdzie:  $h_{\max}$  – wysokość maksymalnego opadu deszczu, mm,

$t$  – czas trwania deszczu, min,

$a, b$  – parametry zależne od prawdopodobieństwa wystąpienia opadu (według tab. 1.).

Tabela 1. Wartości parametrów  $a$  i  $b$  do modelu (5)

Prawdopodobieństwo $p$ , %			
10	20	50	100
$a = 7,4$	$a = 6,1$	$a = 4,7$	$a = 3,1$
$b = 0,29$	$b = 0,22$	$b = 0,16$	$b = 0,10$

Chomicz do sformułowania modelu fizycznego opadów maksymalnych wykorzystał jedynie 37 (spośród 71 z okresu 67 lat obserwacji) deszczy o największej intensywności. Po ich uszeregowaniu według malejących natężeń częstość  $C = 1$  rok przyporządkował dla opadu na 37. pozycji. Jak już wspomniano, Błaszczyk do sformułowania modelu (4) przyjął 67 opadów, jako miarodajnych dla tego samego okresu obserwacji, i po uszeregowaniu 79 deszczy według malejących natężeń przypisał częstość  $C = 1$  rok opadowi dopiero na 67. pozycji. Jak należało oczekiwać, model Chomicza wykazał znacznie wyższe wartości natężeń opadów w porównaniu z modelem Błaszczyka. Przykładowo dla czasów trwania opadów  $t \leq 180$  min i częstości występowania  $C = 1, 2, 5$  i 10 lat różnice obliczanych natężeń deszczy ( $q$ ) wynoszą od 34 do 95% [10]. W szczególności dla  $t = 15$  min i  $C = 1$  rok z modelu (4) Błaszczyka (przyjmując  $H = 600$  mm) otrzymano  $q_{15,1} = 76,6 \text{ dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha})$ , a z modelu Chomicza (5) już  $q_{15,1} = 116,7 \text{ dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha})$ , czyli aż o 52% większą wartość. Model opadów maksymalnych Chomicza nie znalazł jednak zastosowania w praktyce projektowania systemów kanalizacyjnych w Polsce.

### 2.3. Model probabilistyczny opadów Bogdanowicza i Stachego

Bogdanowicz i Stachy, na podstawie ogólnopolskich pomiarów deszczy zebranych na 20 stacjach meteorologicznych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej w latach 1960÷1990, opublikowali w 1998 roku tzw. „charakterystyki projektowe” opadów w postaci modelu probabilistycznego maksymalnych wysokości, będących kwantylem przyjętego rozkładu prawdopodobieństwa [21]:

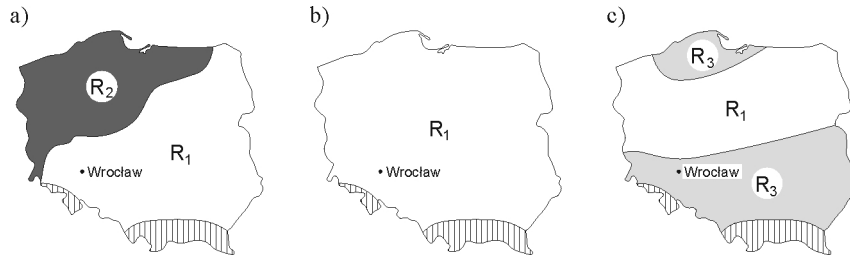
$$h_{\max} = 1,42t^{0,33} + \alpha(-\ln p)^{0,584} \quad (6)$$

gdzie:  $h_{\max}$  – maksymalna wysokość opadu, mm,

$t$  – czas trwania deszczu, min,

$p$  – prawdopodobieństwo przewyższenia opadu:  $p \in (0;1]$ ,

$\alpha$  – parametr zależny od regionu Polski i czasu  $t$  (według rys. 2.).



Rys. 2. Regiony opadów maksymalnych: a) dla czasów trwania deszczy  $t \in [5; 60)$  min, b) dla  $t \in [60; 720)$  min, c) dla  $t \in [720; 4320]$  min;  $R_1$  – region centralny,  $R_2$  – region północno-zachodni,  $R_3$  – regiony południowy i nadmorski

Do opracowania modelu (6) przyjęto za podstawę 31 opadów maksymalnych, po jednym największym z każdego roku obserwacji (1960÷1990), dla każdej z 20 stacji meteorologicznych IMGW. Po uszeregowaniu malejąco przedziałowych wartości wysokości opadów w 14 interwałach czasowych (od 5 min do 72 h) deszcz syntetyczny na 31. pozycji otrzymał prawdopodobieństwo przewyższenia  $p = 1$  (czyli częstość występowania  $C = 1$  rok). Tak więc dla  $p = 1$  model (6) upraszcza się do funkcji będącej dolnym ograniczeniem rozkładu prawdopodobieństwa Weibulla [21]:

$$h_{\max} = 1,42t^{0,33} \quad (7)$$

Przykładowo dla prawdopodobieństwa przewyższenia  $p < 1$  (czyli dla  $C > 1$ ) w regionie centralnym Polski ( $R_1$ ) parametr  $\alpha$  obliczany jest ze wzorów (rys. 2.):

- dla  $t \in [5; 120)$  min

$$\alpha = 4,693\ln(t+1) - 1,249 \quad (8)$$

- dla  $t \in [120; 1080)$  min

$$\alpha = 2,223\ln(t+1) + 10,639 \quad (9)$$

- dla  $t \in [1080; 4320]$  min

$$\alpha = 3,01\ln(t+1) + 5,173 \quad (10)$$

Model Bogdanowicza i Stachego, oparty na obserwacjach intensywnych deszczy w Polsce z okresu 1960÷1990, jest jednak niespójny, obciążony dużym błędem odnośnie wysokości opadów dla częstości deszczy pojawiających się raz na rok. Wykazano to w licznych analizach porównawczych [6÷11] z innymi

modelami. Zostanie to również udowodnione w niniejszej pracy, na podstawie wyników pomiarów wysokości opadów we Wrocławiu w tym samym okresie obserwacyjnym, tj. w latach 1960÷1990. Łatwo bowiem wykazać, że z przekształcenia wzoru (7) do postaci wzoru na jednostkowe natężenie deszczu  $q$ ,  $\text{dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha})$ , dla  $C = 1$  rok otrzyma się:

$$q_{\max} = 236,7/t^{0,67} \quad (11)$$

a ze wzoru Błaszczyka (4) dla  $H = 600$  mm i  $C = 1$  rok:

$$q = 470/t^{0,67} \quad (12)$$

a zatem otrzyma się identyczne funkcje czasu  $t$ , lecz różniące się wartością współczynnika w liczniku aż dwukrotnie. Tak więc wyniki obliczeń  $q$  ze wzoru (11) będą dwukrotnie mniejsze w stosunku do wzoru (12). Przykładowo dla  $t = 15$  min ze wzoru (7) Bogdanowicza-Stachego otrzymuje się  $h_{15,1} = 3,5$  mm, stąd  $q_{15,1} = 38,6 \text{ dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha})$ , a ze wzoru (4) Błaszczyka  $q_{15,1} = 76,6 \text{ dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha})$ . Prowadzi to wprost do znacznego zaniżenia projektowanych średnic kanałów [4÷7, 10, 11] czy też obliczanych objętości zbiorników retencyjnych [8, 9]. Tak duże różnice otrzymanych wyników są bezpośrednim następstwem nieodpowiednich założeń wyjściowych przyjętych w pracy [21]: szeregowano malejąco jedynie największe w roku wysokości opadów z lat 1960÷1990 w interwałach czasowych od 5 min do 72 h i uznawano najmniejsze z największych rocznych *a priori* za odpowiadające częstości występowania  $C = 1$  rok. Wspomniane różnice jakościowe danych o opadach, założeń wyjściowych i metod badawczych zastosowanych do wyprowadzania przedstawionych modeli doprowadziły w rezultacie do znacznych wzajemnych różnic ilościowych. Przyczyny tego stanu rzeczy wymagają wyjaśnienia, co jest celem niniejszego artykułu.

Szeregowanie opadów według nierosnących przedziałowych wartości natężeń (intensywności czy wysokości) ma na celu przyporządkowanie odpowiednich statystycznych częstości ( $C$ ) bądź zamiennie prawdopodobieństwa ( $p$ ) występowania danych natężeń opadów wraz z wyższymi tworzonym w ten sposób szeregom częstości opadów syntetycznych (typu IDF). Jak ważne jest przyjęcie odpowiedniego kryterium wyboru opadów do analiz i w konsekwencji liczebności „próby statystycznej”, będącej jednocześnie poziomem odniesienia wyników dla częstości występowania opadu  $C = 1$  rok (czyli o prawdopodobieństwie  $p = 1,0 = 100\%$ ), ilustrują wyniki badań osiągnięte przez Błaszczyka i Chomicza. Dysponując tym samym materiałem badawczym deszczy w Warszawie, tj. z tego samego okresu 67 lat obserwacji, Błaszczyk przyjął do opracowania swojego modelu 67 intensywnych deszczy i po uszeregowaniu ich w kolejności malejącej przyporządkował częstości  $C = 1$  rok ( $p = 100\%$ ) deszcz na 67. pozycji. Chomicz w swoich obliczeniach przyjął tylko 37 najintensywniejszych deszczy i konsekwentnie deszcz na 37. pozycji otrzymał częstość  $C = 1$  rok. Rozbieżno-



ści interpretacyjne liczebności próby statystycznej i poziomu odniesienia wyników pomiarów dla częstości występowania deszczy  $C = 1$  rok doprowadziły do 50% wzajemnych różnic wyników otrzymywanych z modeli fizykalnych obu autorów (i w konsekwencji do jeszcze większych różnic dla  $C = 2, 5$  i 10 lat [12]).

Bogdanowicz i Stachy, do sformułowania modelu probabilistycznego opadów maksymalnych, przyjęli za podstawę 31 syntetycznych deszczy rocznych z okresu 1960÷1990 – po jednym największym z każdego roku obserwacji opadów. Wykorzystali do tego dwie bazy danych o największych w roku opadach o czasach trwania: 5, 10, 15, 30, 60 i 120 min – odczytywanych bezpośrednio z pluwiogramów, oraz o czasach trwania: 1, 2, 3, 6, 12, 18, 24, 36, 48 i 72 h – ustalanych metodą ruchomej sumy z zestawień pluwiograficznych dla przedziałów godzinowych i korygowane następnie współczynnikami zwiększającymi (np.: 1,13 dla 1. godz., 1,04 dla 2. godz. itp. [21]). W wyniku uszeregowania malejąco przedziałowych, największych rocznych wartości wysokości opadów syntetycznych z 31 lat obserwacji przyjęli, jako poziom odniesienia wyników (dla  $C = 1$  rok), wartości z 31. wiersza. Otrzymany szereg (typu DDF), jako najmniejszy z największych rocznych (z 31 lat), jednak znacząco różnił się (*in minus*) od wyników badań innych autorów [12].

Uwzględniając fakt, że w niektórych latach mogą nie występować bardzo intensywne opady, a w innych latach mogą one pojawić się wielokrotnie, eliminowanie *a priori* tzw. „lat suchych” jest niewłaściwe. Zastosowanie pracochłonnej metody przeglądu zupełnego opadów wydaje się również niecelowe, przedmiotem rozważania są bowiem opady maksymalne, a analizowanie opadów o małej czy nawet średniej intensywności wydłużyłoby tylko listę szeregów częstości opadów znacznie poza interpretowany zakres. Należy więc ustalić „obiektywne” kryterium wyboru próby losowej opadów do analiz na tyle niskie, aby każdy rok był reprezentowany przez co najmniej kilka największych w danym roku opadów. Natężenie deszczu nie jest jednak stałe ani w czasie jego trwania, ani w przestrzeni objętej opadem. Chwilowe natężenie opadu może być wielokrotnie większe od średniego. Duża intensywność może też występować raz lub nawet kilkakrotnie podczas trwania opadu, pojawiając się w dowolnej sekwencji czasu. Dyskretyzacja danych pluwiograficznych jest zatem niezbędna.

Aby wyodrębnić intensywne deszcze do analiz statystycznych, zaproponowano własne kryterium wysokości opadów  $h \geq 0,75t^{0,5}$ , oparte na orientacyjnym kryterium (1) Chomicza  $h_{U_0} \geq t^{0,5}$  – w odniesieniu do granicznej wysokości opadu ( $U_0$ ) dla silnych deszczy. Zaniżenie kryterium Chomicza o 25% (poniżej krzywej  $U_0$ , rys. 1.) miało na celu wyodrębnienie dla rocznych zestawień większej liczby intensywnych deszczy (nie tylko silnych deszczy, ulew, silnych ulew czy deszczy nawalnych), tak aby każdy sezon pluwiograficzny był reprezentowany przez co najmniej kilka opadów, nawet w „latach suchych”. Tak więc z pluwiogramów wyodrębniano opady o wysokościach:  $h \geq 1,7$  mm dla interwału  $t = 5$  min i/lub  $h \geq 2,4$  mm dla  $t = 10$  min, i/lub  $h \geq 2,9$  mm dla  $t = 15$  min itp.

oraz  $h \geq 10,0$  mm dla  $t = 180$  min, aż do  $h \geq 20,0$  mm dla  $t \geq 720$  min (do 4320 min włącznie). Dla zjawisk opadowych o  $t \geq 12$  h (do 72 h włącznie) przyjęto, że zestawieniom powinny podlegać opady o łącznej wysokości  $h \geq 20,0$  mm – zliczane metodą ruchomej sumy. W przypadku opadów o długich czasach trwania, gdy w ich przebiegu na pluwiogramach występują wyraźne braki przyrostów wysokości opadów, wyodrębniane i opisywane powinny być fragmenty opadów traktowane jako tzw. epizody wewnętrzne.

### **3. Analiza i interpretacja szeregów częstości opadów maksymalnych**

#### **3.1. Seria czasowa $C = 1$ rok według interpretacji Bogdanowicza i Stachego**

W pracy dokonano analizy i interpretacji wyników badań maksymalnych wysokości opadów we Wrocławiu dla testowego okresu obserwacji 1960÷1990. Dla tego okresu otrzymane parametry porównano z wynikami obliczeń uzyskanymi z modelu (7) Bogdanowicza i Stachego dla  $C = 1$  rok w odniesieniu do regionu centralnej Polski, do którego został zaliczony Wrocław (rys. 2.).

Materiałem badawczym wykorzystanym w pracy były archiwalne pluwiogramy ze stacji IMGW Wrocław–Strachowice za lata 1960÷2009 [12]. Przyjęte kryteria pozwoliły na wyselekcjonowanie dla każdego roku z testowego okresu 1960÷1990 od kilku do kilkunastu najbardziej intensywnych opadów, które wystąpiły w sezonie od maja do października. Łącznie z okresu 31 lat obserwacji do szczegółowej analizy statystycznej wyselekcjonowano 348 opadów syntetycznych. Na podstawie rocznych zestawień tabelarycznych wyselekcjonowanych deszczy ustalano maksymalne przedziałowe wartości wysokości opadów, z których tworzony był następnie syntetyczny opad roczny w 16 interwałach czasu – od 5 min do 72 h. Jak wykazano w pracy [21], w 30-leciu 1961÷1990 na 63 stacjach meteorologicznych w Polsce największe w roku wysokości opadów dobowych występowały w półroczu zimowym (listopad–kwiecień) jedynie sporadycznie, przeciętnie 2 razy na 30 lat i były znacznie niższe od średniej z najwyższych opadów dobowych. Tak więc oparcie się na wynikach pomiarów opadów z półrocza ciepłego (maj–październik) może być uznane za miarodajne dla opadów maksymalnych, tj. silnych deszczy, ulew, silnych ulew czy deszczy nawalnych – według klasyfikacji i kryterium (1) Chomicza.

Szeregowanie opadów, według malejących przedziałowych wartości natężeń wraz z wyższymi, ma na celu przyporządkowanie odpowiednich statystycznych częstości ( $C$ ), bądź zamiennie prawdopodobieństwa ( $p$ ) występowania, tworzonym w ten sposób seriom czasowym opadów syntetycznych. Do uszeregowanych już opadów można zastosować dwie odmienne metodologie interpretacji i uogólnień wyników badań. Pierwszy historyczny już sposób, zastosowany m.in. przez Błaszczyka [1] czy Chomicza [20], polega na przyjęciu hipotezy, że

uszeregowanym malejąco opadom o danym natężeniu (wraz z wyższymi) można *a priori* przypisać empiryczne prawdopodobieństwo występowania – odniesione co najwyżej do długości okresu obserwacji opadów. Uogólnienie wyników w tej metodzie polega na estymacji (metodą najmniejszych kwadratów) współczynników empirycznych przyjętej postaci modelu fizykalnego opadów. Druga metodologia, zastosowana m.in. przez Bogdanowicza i Stachego [21], zakłada wygładzanie metodami probabilistycznymi zmierzonych serii czasowych opadów i na tej podstawie przypisywanie im statystycznych częstości występowania, nawet w okresie dłuższym (np. 100 lat) niż okres obserwacji opadów (np. 30 lat). Uogólnieniem wyników w tej metodologii jest model probabilistyczny opadu w postaci wyestymowanego kwantyla przyjętego rozkładu prawdopodobieństwa, którego dolna granica odpowiada wartości funkcji dla  $C = 1$  rok.

W pierwszej kolejności weryfikacji poddano, na testowym materiale pluwiograficznym z Wrocławia–Strachowic z lat 1960÷1990, założenie wyjściowe Bogdanowicza i Stachego o szeregowaniu maksymalnych rocznych opadów syntetycznych – po jednym największym z każdego roku obserwacji – w interwałach czasu trwania od 5 min do 72 h. Następnie zastosowano odmienną interpretację próby losowej opadów, zakładając szeregowanie największych (według własnego kryterium wyboru) opadów syntetycznych niezależnie od ich rozkładu w tym samym okresie obserwacji, co praktycznie oznacza, że z niektórych lat uwzględniano ich kilka, a z innych żadnego. Na tych podstawach sformułowano wzory na wysokość opadu dla częstości  $C = 1$  rok – o strukturze analogicznej do modelu (7) Bogdanowicza-Stachego (i postaci (4) Błaszczyka), co znalazło zastosowanie w bezpośrednich porównaniach ilościowych obu interpretacji próby losowej opadów. W rezultacie do opracowania opadów maksymalnych we Wrocławiu–Strachowicach, dla testowego okresu 1960÷1990 obserwacji, zastosowane będą dwie odmienne metody interpretacyjne: Bogdanowicza i Stachego oraz własna. Na podstawie analizy i dyskusji wyników obu metod do opracowywania modeli opadów zaleca się poprawniejszą pod względem ilościowym i jakościowym metodę interpretacji serii czasowych opadów syntetycznych.

W tabeli 2. zestawiono wyniki szeregowania wysokości opadów według metody Bogdanowicza i Stachego, tj. uszeregowano malejąco 31 największych rocznych opadów syntetycznych, o największych w danym roku wysokościach (w mm) w przedziałach od 5 min do 72 h z  $N = 31$  lat obserwacji, przypisując im odpowiednie empiryczne częstości występowania  $C(m, N) = (N+1)/m$ , gdzie  $m$  oznacza numer wiersza ( $m = 1, 2, 3, \dots, 31$ ). I tak deszcz syntetyczny w 1. wierszu odpowiada częstości występowania  $C = 32$  lata, a deszcz w 31. wierszu odpowiada  $C = 1$  rok. Do celów porównawczych, w wierszu 31\* w tab. 2. podano deszcz syntetyczny o częstości występowania  $C = 1$  rok, ustalony dla danych ze stacji Warszawa–Bielany z tego samego okresu obserwacji opadów (1960÷1990), na podstawie materiałów źródłowych zamieszczonych w pracy

[21] (podobnie w wierszu 1\* – 1. szereg dla danych ze stacji Warszawa–Bielany z okresu 1960÷1990).

Tabela 2. Uszeregowanie największych rocznych przedziałowych wysokości opadów ( $h_{max}$ , mm) z 31 lat obserwacji we Wrocławiu w latach 1960÷1990 – metoda Bogdanowicza i Stachego

Nr	Czas trwania opadu, min															
	5	10	15	30	45	60	90	120	180	360	720	1080	1440	2160	2880	4320
1	11,4	18,7	24,7	32,9	34,1	34,8	42,7	57,7	61,9	63,1	64,2	69,1	72,1	92,6	101,1	108,5
2	10,4	18,0	20,7	28,6	32,1	34,7	37,7	41,5	42,8	50,4	63,1	63,1	68,0	86,9	96,2	101,9
3	9,9	15,7	20,2	28,4	30,2	33,6	36,5	36,5	38,4	46,0	52,9	60,4	67,5	80,3	85,8	100,4
4	9,8	14,6	20,1	28,2	29,0	31,7	34,7	36,1	36,7	41,0	50,0	57,4	65,0	73,1	76,2	97,5
5	9,6	14,5	20,0	24,3	27,9	30,5	33,7	34,9	36,5	40,7	48,4	56,8	62,1	70,3	73,4	90,0
6	9,3	13,8	16,6	22,1	24,5	29,1	33,2	33,2	35,1	38,5	46,5	53,9	61,9	69,2	73,1	84,0
7	9,2	13,8	16,5	19,8	21,5	24,6	30,6	32,4	33,2	36,9	43,9	52,8	61,0	62,1	66,5	82,9
8	9,0	13,3	14,6	18,0	20,7	24,0	29,3	29,3	32,8	36,5	41,2	50,9	56,9	57,0	61,1	76,6
9	9,0	12,9	14,6	17,7	19,9	23,5	27,9	28,7	32,4	33,9	40,1	45,0	56,4	56,9	59,5	75,2
10	8,6	12,4	14,0	17,5	19,6	19,9	24,2	26,9	29,3	33,2	39,3	44,4	52,8	56,4	58,5	61,2
11	8,3	10,7	14,0	16,4	19,0	19,9	19,9	22,2	27,3	32,8	39,0	44,1	48,3	55,2	56,4	60,4
12	8,2	10,6	13,7	15,6	18,3	18,5	19,6	19,9	27,0	32,4	38,0	43,9	47,8	52,8	56,3	60,1
13	8,0	10,5	13,2	15,3	17,7	17,7	18,8	19,9	25,6	29,3	37,6	41,2	45,3	48,0	55,5	59,8
14	7,9	10,2	13,0	15,2	16,3	16,9	17,7	19,6	22,6	27,8	36,5	41,2	45,2	47,3	51,6	58,5
15	7,8	10,2	12,6	15,2	16,1	16,6	17,1	18,9	21,9	26,1	35,2	40,3	45,2	47,2	51,0	57,0
16	7,7	9,8	11,9	15,1	16,0	16,6	17,0	18,8	21,5	24,9	35,1	39,6	43,4	47,2	49,0	55,7
17	6,9	9,6	11,4	15,1	15,7	15,9	16,6	18,8	20,4	24,2	32,0	39,3	42,1	46,6	48,9	51,4
18	6,9	9,1	11,1	14,7	15,6	15,9	16,4	18,6	20,2	23,1	31,6	39,3	41,0	46,4	48,6	51,1
19	6,3	9,1	10,6	14,5	15,1	15,5	16,1	17,9	19,9	22,6	31,3	39,3	40,3	45,3	48,1	50,0
20	6,0	8,7	10,3	14,3	15,1	15,3	16,0	17,9	19,2	22,2	30,8	37,9	39,4	45,2	47,7	49,7
21	6,0	8,6	9,8	13,7	14,9	15,1	15,5	17,7	18,9	22,0	30,2	36,5	38,5	45,2	46,2	47,7
22	6,0	8,6	9,3	13,7	14,5	15,1	16,1	16,3	17,8	21,7	29,5	36,4	37,9	41,2	45,3	45,5
23	5,8	8,3	9,2	11,6	14,2	14,5	15,1	15,2	16,7	21,7	27,8	35,1	35,1	38,0	42,6	44,8
24	5,5	8,1	9,2	10,8	12,2	13,4	14,5	14,5	16,4	21,3	27,8	30,8	30,8	38,0	39,8	44,3
25	5,0	7,0	7,9	10,6	12,1	12,4	13,6	13,8	15,8	20,6	27,0	29,2	29,2	35,8	38,0	44,2
26	4,7	6,4	7,7	10,4	11,8	12,3	13,3	13,6	15,5	20,4	26,8	28,5	28,8	35,7	36,1	40,8
27	4,7	6,1	7,2	9,5	10,1	12,1	13,1	13,1	14,8	19,9	24,1	27,8	28,5	35,1	35,1	38,7
28	4,5	5,7	6,6	7,9	10,1	11,0	12,9	13,0	13,6	19,2	22,2	25,9	28,3	31,9	32,1	38,0
29	4,1	5,6	6,4	7,8	10,0	10,8	12,8	13,0	13,4	17,5	21,2	22,6	25,8	28,5	31,0	35,1
30	3,8	5,2	6,2	7,2	7,9	8,1	11,3	11,9	13,0	17,0	18,4	22,1	23,5	26,8	29,9	30,3
31	3,3	4,7	5,6	5,9	6,3	6,9	10,3	11,3	12,4	16,0	17,7	20,5	22,0	22,0	22,2	26,8
31*	2,0	3,4	3,8	5,6	-	7,2	-	10,1	11,4	14,5	16,2	16,2	17,9	27,2	27,2	27,5
1*	20,6	21,8	28,0	36,6	-	38,9	-	49,5	50,4	57,0	68,0	69,2	80,1	99,0	109,7	113,3

31\* – 31. szereg dla danych ze stacji Warszawa–Bielany z okresu 1960÷1990, podany w pracy [21]

1\* – 1. szereg dla danych ze stacji Warszawa–Bielany z okresu 1960÷1990, podany w pracy [21]

Z porównania serii czasowych opadów syntetycznych o przypisanej częstości  $C = 1$  rok dla Wrocławia–Strachowic i dla Warszawy–Bielany (wiersze 31. i 31\* w tab. 2.) wynika, że różnią się one znacznie przedziałowymi wartościami wysokości opadów: *in minus* dla interwałów czasu  $t \leq 1440$  min ( $\leq 24$  h), względem danych z Wrocławia, oraz tylko nieznacznie *in plus* dla interwałów czasu: 2160, 2880 i 4320 min. Natomiast, porównując wiersze 1. i 1\* – największych zmierzonych wysokości opadów w latach 1960÷1990, należy zauważyć,

że są one dla Warszawy nieco wyższe (wyjątkowo dla interwału 5 min aż o 80% – 11,4 i 20,6 mm).

### 3.2. Seria czasowa $C = 1$ rok według własnej interpretacji

W tabeli 3. zestawiono wyniki szeregowania przedziałowych wysokości opadów według własnej interpretacji liczebności próby losowej. W analizie statystycznej uwzględniono wszystkie wyselekcjonowane intensywne opady z okresu pomiarowego 1960÷1990, w liczbie 348 – przewyższające wartością przyjęte w pracy kryteria przedziałowych wysokości opadów. W tabeli podano także przykładowe serie czasowe opadów syntetycznych – w kolejności 86, 89 i 103, do statystycznej interpretacji częstości ich występowania.

Tabela 3. Uszeregowanie największych przedziałowych wysokości opadów ( $h_{max}$ , mm) z 348 intensywnych deszczy z 31 lat obserwacji we Wrocławiu w latach 1960÷1990 – metoda własna

Nr	Czas trwania opadu, min													
	5	10	15	30	45	60	90	120	180	360	720	1080	1440	2160
1	11,4	18,7	24,7	32,9	34,1	34,8	42,7	57,7	61,9	63,1	64,2	69,1	72,2	92,6
2	10,4	18,0	20,7	30,3	32,1	34,7	37,7	41,5	42,8	50,4	64,2	69,1	72,1	86,9
3	9,9	16,6	20,2	28,6	31,9	33,6	36,5	36,5	41,3	46,0	63,1	63,1	68,0	80,3
4	9,8	15,7	20,1	28,4	30,2	32,4	34,7	36,2	38,4	43,9	52,9	60,4	67,5	75,3
5	9,6	14,6	20,0	28,2	29,0	31,7	33,7	36,1	36,7	41,0	50,0	57,4	65,0	73,1
6	9,6	14,5	19,8	26,7	28,8	30,5	33,2	34,9	36,5	40,7	48,4	56,8	63,1	70,3
7	9,3	14,3	19,2	24,3	27,9	30,3	33,2	33,2	35,1	38,5	46,5	56,8	62,1	69,2
8	9,2	13,8	17,8	22,3	24,5	29,1	32,3	33,2	34,9	36,9	44,6	53,9	61,9	65,6
9	9,0	13,8	17,0	22,1	24,3	27,5	31,7	33,2	34,4	36,9	44,5	53,5	61,0	65,4
10	9,0	13,3	16,6	21,1	23,8	24,6	30,6	32,4	33,2	36,5	43,9	52,8	56,9	62,1
11	8,6	12,9	16,5	19,8	21,5	24,5	29,3	29,3	32,8	34,9	41,5	50,9	56,4	62,1
12	8,5	12,4	14,6	18,0	20,7	24,0	27,9	28,7	32,4	34,4	41,3	48,9	54,1	57,0
13	8,3	12,4	14,6	17,9	19,9	23,5	24,7	26,9	29,3	33,9	41,2	45,2	54,1	57,0
14	8,2	11,3	14,4	17,7	19,6	19,9	24,2	25,6	27,3	33,2	40,1	45,0	52,8	56,9
15	8,2	11,2	14,0	17,5	19,0	19,9	21,0	23,6	27,0	32,8	39,3	44,4	51,2	56,4
16	8,2	10,7	14,0	16,4	18,3	19,2	19,9	22,2	25,6	32,4	39,0	44,1	48,3	55,2
17	8,0	10,6	13,7	15,6	17,7	18,5	19,6	21,1	25,6	30,8	38,0	43,9	48,3	52,8
18	7,9	10,6	13,4	15,6	17,2	17,7	18,8	20,3	25,0	30,5	37,6	41,2	47,8	51,2
19	7,9	10,5	13,2	15,3	16,5	17,3	18,1	19,9	23,0	30,4	36,5	41,2	45,8	51,0
20	7,8	10,4	13,0	15,2	16,3	16,9	17,7	19,9	22,6	29,3	35,2	41,0	45,3	50,9
21	7,8	10,2	13,0	15,2	16,1	16,6	17,1	19,6	21,9	29,3	35,1	40,6	45,2	50,1
22	7,7	10,2	12,6	15,1	16,0	16,6	17,0	19,6	21,5	28,0	34,9	40,3	45,2	48,1
23	7,0	9,8	11,9	15,1	15,8	15,9	16,9	19,0	21,1	27,9	34,5	39,6	44,4	48,0
24	7,0	9,7	11,4	14,7	15,7	15,9	16,7	18,9	20,4	27,8	33,9	39,3	43,5	47,3
25	6,9	9,6	11,1	14,7	15,6	15,9	16,6	18,8	20,3	26,2	32,8	39,3	43,4	47,2
26	6,9	9,2	10,6	14,5	15,6	15,6	16,4	18,8	20,2	26,2	32,0	39,3	42,3	47,2
27	6,8	9,1	10,5	14,3	15,2	15,5	16,3	18,6	19,9	26,1	31,6	39,3	42,1	46,6
28	6,8	9,1	10,3	14,2	15,1	15,3	16,1	17,9	19,2	24,9	31,3	39,0	41,7	46,4
29	6,6	8,9	10,3	13,9	15,1	15,3	16,1	17,9	19,1	24,3	30,9	38,0	41,0	45,8
30	6,6	8,9	10,0	13,8	14,9	15,1	16,1	17,9	18,9	24,2	30,8	37,9	40,3	45,3
31	6,5	8,7	9,8	13,7	14,8	15,1	16,0	17,7	18,8	23,8	30,2	36,5	40,1	45,2
86	3,6	5,1	6,2	7,8	8,8	9,0	10,0	11,2	12,6	16,0	18,6	20,5	22,0	23,0
89	3,5	5,1	6,0	7,7	8,7	8,8	10,0	11,0	12,4	15,8	18,5	20,1	21,8	22,8
103	3,1	4,7	5,6	7,1	7,8	8,1	9,4	10,5	10,9	14,2	17,2	18,0	19,6	21,0

Jak łatwo zauważyć, parametry zawarte w tab. 2. i 3. znacznie się różnią. Różnice te dotyczą głównie wyników szeregowania przedziałowych wysokości opadów, zwłaszcza w dolnych ich częściach. W obu tabelach 31. wiersz wskazuje na różne ilościowo syntetyczne szeregi opadów (typu DDF) dla Wrocławia, a przyporządkowane tej samej częstości występowania  $C = 1$  rok ( $p = 100\%$ ). Wynika to z faktu, że w przypadku tab. 2., opracowanej według metody Bogdanowicza i Stachego, przy szeregowaniu opadów nie uwzględniono znacznej liczby intensywnych deszczy, które jednak nie były największe w danym roku. Ma to duże znaczenie zwłaszcza w tych latach, w których silne deszcze, ulewy czy deszcze nawalne zdarzały się stosunkowo często (ujęto je w tab. 3.). Wydaje się zatem, że pominięcie znacznej liczby intensywnych deszczy występujących w okresie 1960–1990 jest główną przyczyną zaniżenia wyników obliczeń z modelu opadów Bogdanowicza-Stachego dla częstości  $C = 1$  rok, w porównaniu z modelami proponowanymi przez innych autorów, a także w porównaniu z rzeczywistymi opadami występującymi w tym okresie we Wrocławiu–Strachowicach. Przykładowo na podstawie danych zawartych w tab. 2. (opracowanej według metody Bogdanowicza–Stachego) dla  $t = 15$  min i  $C = 1$  rok dany jest opad o wysokości  $h_{15, 1} = 5,6$  mm, stąd otrzyma się natężenie  $q_{15, 1} = 62,2$  dm<sup>3</sup>/(s · ha), natomiast z tab. 3. (według własnej metody, z większą liczbą selekcionowanych opadów) dla  $C = 1$  jest już  $h_{15, 1} = 9,8$  mm, a stąd  $q_{15, 1} = 108,9$  dm<sup>3</sup>/(s · ha). Wynika to stąd, że 31. największy deszcz 15-minutowy – biorąc pod uwagę tylko maksima roczne – jest dopiero w kolejności malejącej 103. deszczem 15-minutowym, przy uwzględnieniu wszystkich intensywnych opadów, które zdarzyły się w 31-letnim okresie badawczym (tab. 3., wiersz 103.). Taki opad ma więc częstość  $C = (31+1)/103 = 0,31$ , czyli występuje przeszło trzy razy częściej. Korzystając z modelu (7) Bogdanowicza–Stachego, dla Wrocławia można obliczyć  $h_{15, 1} = 3,5$  mm, a stąd  $q_{15, 1} = 38,9$  dm<sup>3</sup>/(s · ha). Względna różnica wyników wyniesie więc ok. 60% dla danych zawartych w tab. 2. (według metody Bogdanowicza–Stachego) oraz aż 180% (prawie trzykrotnie więcej) dla danych w tab. 3. (według własnej metody).

Podobna sytuacja występuje w przypadku deszczy o innych czasach trwania. Przykładowo 31. największy deszcz 3-godzinny, biorąc pod uwagę tylko maksima roczne, jest dopiero 89. deszczem 3-godzinnym, uwzględniając wszystkie intensywne opady syntetyczne, które zdarzyły się w 31-letnim okresie badawczym (tab. 3., wiersz 89.). W szczególności więc deszcz syntetyczny o czasie trwania  $t = 180$  min i wysokości opadu  $h_{180, 1} = 12,4$  mm (tab. 2., ostatni wiersz), czyli o natężeniu jednostkowym  $q_{180, 1} = 11,5$  dm<sup>3</sup>/(s · ha), jest deszczem o częstości występowania  $C = (31+1)/89 = 0,36$ , a więc występuje 3 razy w roku. Właściwym statystycznie opadem o częstości  $C = 1$  rok dla  $t = 180$  min jest deszcz o  $h_{180, 1} = 18,8$  mm (tab. 3., wiersz 31.) i  $q_{180, 1} = 17,4$  dm<sup>3</sup>/(s · ha), a więc o ok. 50% większej wartości  $h$  i  $q$ . Podobnie jest z największym opadem dobowym z tab. 2., który znajduje się dopiero na 86. miejscu w tab. 3. i w konse-

kwencji jest opadem nie o częstotliwości występowania  $C = 1$  rok, lecz o częstotliwości  $C = (31+1)/86 = 0,37$ , czyli występuje 2,7 razy częściej.

### 3.3. Porównanie ilościowe i jakościowe testowych serii czasowych

Wzajemne różnice jakościowe obu metod interpretacyjnych próby losowej opadów, zastosowanych do tego samego okresu obserwacji opadów (1960÷1990) we Wrocławiu, przekładają się bezpośrednio na znaczne różnice ilościowe wyników badań. Są one m.in. rezultatem wspomnianego wcześniej pominięcia części materiału badawczego przy szeregowaniu opadów według metody Bogdanowicza i Stachego, co wskazuje również na dużą niedokładność samego modelu Bogdanowicza i Stachego – opracowanego dla całego obszaru Polski (z pominięciem obszarów górskich, rys. 2.) w odniesieniu do wysokości opadów we Wrocławiu–Strachowicach. Do celów porównawczych, na podstawie wyników szeregowania opadów (podanych w tab. 2. i 3.), wyznaczono wzory na maksymalną wysokość opadów syntetycznych o częstotliwości  $C = 1$  rok w postaci  $h_{\max} = at^{0,33}$  (wzór przyjęty przez Bogdanowicza i Stachego [21]). W przypadku metody Bogdanowicza i Stachego dla 31. wiersza z tab. 2. wzór empiryczny z regresji metodą najmniejszych kwadratów, przy  $R = 0,969$ , przyjmie dla Wrocławia–Strachowic postać:

$$h_{\max} = 1,854t^{0,33} \quad (13)$$

Dla porównania model (7) Bogdanowicza–Stachego ma postać  $h_{\max} = 1,42t^{0,33}$ . Wartości mnożników przy  $t$  w obu wzorach różnią się zatem o 30%. Po przekształceniu wzoru (13) otrzymuje się równanie na natężenie deszczu dla  $C = 1$  rok (w postaci przyjętej przez Błaszczyka):

$$q_{\max} = \frac{309,0}{t^{0,67}} \quad (14)$$

Model (4) Błaszczyka dla Wrocławia, dla  $H = 590$  mm i  $C = 1$  rok, przyjmuje szczegółową postać  $q = 466,5/t^{0,67}$ . Różnice wartości liczników w obu wzorach sięgają 34%. Tak więc przy zastosowaniu metody Bogdanowicza–Stachego, w przypadku wzoru (13), ma się do czynienia z wyższymi wartościami wysokości opadów we Wrocławiu (w okresie 1960÷1990), lecz porównując odpowiadające temu natężenia obliczane ze wzoru (14) indywidualnie dla Wrocławia – z zaniżeniem wyników w stosunku do wartości otrzymanych ze wzoru Błaszczyka.

W przypadku zastosowania własnej metody interpretacji próby losowej opadów, tj. dla 31. wiersza z tab. 3, będącego wynikiem uszeregowania wszystkich 348 wyselekcjonowanych intensywnych opadów z okresu 31 lat obserwacji, dla Wrocławia przy  $R = 0,991$  otrzymuje się:

$$h_{\max} = 3,470t^{0,33} \quad (15)$$

a po przekształceniu równania (15) wzór na natężenie deszczu:

$$q_{\max} = \frac{578,3}{t^{0,67}} \quad (16)$$

W tym przypadku wzory (15) i (16) wskazują na znacznie wyższe wartości, zarówno wysokości, jak i natężenia opadów, w porównaniu z wzorami (13) i (14). Przykładowo wartość mnożnika 3,47 przy  $t$  we wzorze (15) różni się o 144% w stosunku do wartości 1,42 we wzorze (7) Bogdanowicza–Stachego, który po przekształceniu na  $q$  przyjmuje dla  $C = 1$  rok postać (11)  $q_{\max} = 236,7/t^{0,67}$ . Wartość licznika 309 we wzorze (14) jest zatem większa o 30%, a we wzorze (16) o 144% od wartości  $236,7 = 100\%$  ze wzoru (7).

Należy zauważyć, że średnie dla Polski wartości wykładników potęgowych przy czasie trwania deszczy ( $t$ ), zarówno w modelach (6) i (7) Bogdanowicza–Stachego na wysokość opadów ( $n = 0,33$ ), jak i w modelu (4) Błaszczyka na natężenie ( $n = 0,33 - 1 = -0,67$ ), nie muszą być właściwe do opisu opadów we Wrocławiu–Strachowicach. Ogólnie wartość tego wykładnika we wzorach na  $q$  może się zmieniać w granicach od  $-0,62$  do  $-0,76$  [1]. Odpowiada to zmianom wartości  $n$  we wzorach na  $h$  od  $0,38$  do  $0,24$ . Wykazano, że wyjściowe postacie wzorów (13) i (15) – ze stałym wykładnikiem potęgowym  $n = 0,33$  przy  $t$ , a także wzorów (14) i (16) – z  $n = 0,67$  przy  $t$ , są statystycznie niewłaściwe dla Wrocławia. Lepsze wyniki aproksymacji są do osiągnięcia przy innych wartościach  $n$ , tj.  $n < 0,33$  we wzorach na wysokość opadu lub  $n > 0,67$  we wzorach na natężenie opadu. Stosując metodologię Bogdanowicza–Stachego, otrzymuje się:

$$h_{\max} = 2,855t^{0,270} \quad (17)$$

przy  $R = 0,984$ , a po przekształceniu równania (17) wzór na natężenie deszczu:

$$q_{\max} = \frac{475,8}{t^{0,730}} \quad (18)$$

Stosując własną metodę szeregowania opadów, otrzymano zależność:

$$h_{\max} = 4,459t^{0,295} \quad (19)$$

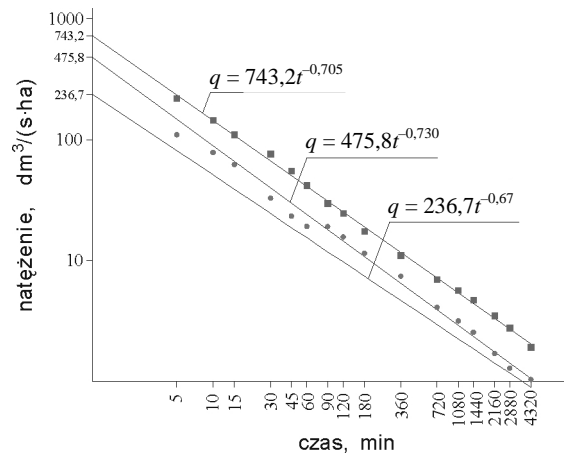
przy  $R = 0,995$ , a stąd wzór na natężenie deszczu:

$$q_{\max} = \frac{743,2}{t^{0,705}} \quad (20)$$



Wynik analizy dokładności otrzymanych wzorów empirycznych jest łatwy do przewidzenia. Przykładowo z uszeregowania syntetycznych deszczy według metody Bogdanowicza i Stachego dla  $C = 1$  rok i  $t = 15$  min z pomiarów otrzymuje się (tab. 2., wiersz 31.):  $h_{15,1} = 5,6$  mm, a stąd po przeliczeniu  $q_{15,1} = 62,2 \text{ dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha}) = 100\%$ . Ze wzoru (14) można obliczyć:  $q_{15,1} = 50,3 \text{ dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha})$ , natomiast ze wzoru (18):  $q_{15,1} = 65,9 \text{ dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha})$ . Błędy względne wynoszą odpowiednio:  $-19\%$  i  $+6\%$ . W przypadku uszeregowanych opadów syntetycznych według własnej metody z pomiarów otrzymuje się (tab. 3., wiersz 31.):  $h_{15,1} = 9,8$  mm, a stąd  $q_{15,1} = 108,9 \text{ dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha}) = 100\%$ . Korzystając ze wzoru (16), otrzymuje się  $q_{15,1} = 94,2 \text{ dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha})$ , a ze wzoru (20):  $q_{15,1} = 110,1 \text{ dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha})$ . Błędy względne wyniosą odpowiednio:  $-13,5\%$  i  $+1,1\%$ . Z modelu (7) Bogdanowicza–Stachego można uzyskać niewiarygodnie małe wartości:  $h_{15,1} = 3,5$  mm i  $q_{15,1} = 38,6 \text{ dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha})$ . Graficzną ilustrację wykazanych różnic stanowi rys. 3., na którym przedstawiono dwa szeregi o częstości  $C = 1$  rok opadów we Wrocławiu–Strachowicach wyznaczone dla okresu 1960÷1990 obiema metodami, na tle wyników obliczeń z modelu (7) Bogdanowicza i Stachego.

Rys. 3. Zależności natężenia od czasu trwania opadu o częstości  $C = 1$  rok dla Wrocławia (1960÷1990) według interpretacji Bogdanowicza–Stachego i własnej oraz według modelu (7)



#### 4. Wnioski końcowe

Podstawą niniejszej pracy były wyniki pomiarów pluwiograficznych zebrane na stacji meteorologicznej IMGW Wrocław–Strachowice z lat 1960-1990. Na ich podstawie sformułowano i zweryfikowano w praktyce metodologię do fizycznego bądź probabilistycznego opracowywania wyników pomiarów opadów miarodajnych do wymiarowania kanalizacji. Przeprowadzone badania i studia literaturowe pozwalają na wyciągnięcie wniosków końcowych o charakterze metodologicznym.

1. Miarodajne do projektowania bezpiecznych systemów odwodnień terenów zurbanizowanych, w tym zwłaszcza systemów kanalizacyjnych, są maksymalne wysokości opadów o czasach trwania od kilku minut do kilku godzin, które występują z reguły w okresach długotrwałych zjawisk opadowych, trwających nawet kilka dni.
2. Zweryfikowana w pracy, znana z literatury przedmiotu, metoda interpretacji częstości występowania maksymalnych wysokości opadów oparta na założeniu, że każdy rok obserwacyjny może być reprezentowany przez jeden największy w roku opad syntetyczny jest niewłaściwa. Prowadzi to bowiem do znacznego zaniżenia wysokości opadów dla częstości występowania  $C = 1$  rok.
3. Opracowana i zweryfikowana na podstawie danych o opadach we Wrocławiu–Strachowicach metoda selekcji i wyboru intensywnych deszczy, miarodajnych do analiz statystycznych częstości ich występowania, cechuje się następującymi założeniami:
  - analizowane powinny być wszystkie intensywne opady w czasie dla każdego roku, nie tylko te zaliczane do silnych deszczy, ulew czy deszczy nawalnych, z ciągłego okresu kilkudziesięciu lat jednorodnych obserwacji,
  - zaproponowane w pracy kryterium selekcyjne przedziałowych wysokości opadów, zaliczanych do intensywnych:  $h \geq 0,75t^{0,5}$ , pozwala na wyodrębnienie w każdym roku od kilku do kilkunastu opadów syntetycznych jako miarodajnych do analiz statystycznych częstości ich występowania.
4. Właściwe jest tworzenie modeli na maksymalną wysokość opadów o zasięgu lokalnym, odrębnie dla każdej stacji meteorologicznej, a następnie tworzenie na tej podstawie map opadów na terenie całego kraju na drodze interpolacji wyników pomiędzy stacjami. Próby tworzenia jednego uniwersalnego dla całej Polski, bądź dla wybranych regionów kraju, modelu opadów jak i map opadów skazane jest na niepowodzenie, ze względu na zbyt małą dokładność, a więc i małą przydatność do projektowania – co wykazano w pracy.
5. W celu uzyskania porównywalności modeli opadów pochodzących z różnych stacji meteorologicznych wyniki pomiarów wysokości opadów powinny być opracowywane jedną wspólną metodologią, którą proponuje się w pracy na przykładzie opisu opadów we Wrocławiu.

## Literatura

- [1] Błaszczyk W.: Spływy deszczowe w sieci kanalizacyjnej (Wytyczne do normatywu), Gaz, Woda i Technika Sanitarna, nr 9, 1954, s. 262÷271.
- [2] Błaszczyk W., Roman M., Stamatello H.: Kanalizacja, t. I. Wydawn. Arkady, Warszawa 1974.

- [3] Błaszczyk P.: Zasady planowania i projektowania systemów kanalizacyjnych w aglomeracjach miejsko-przemysłowych i dużych miastach, Wydawn. IKŚ, Warszawa 1983.
- [4] Suligowski Z.: Zagospodarowanie wód opadowych. Szczególne problemy, Forum Eksploatatora, nr 3÷4, 2004, s. 24÷27.
- [5] Kotowski A.: Wybrane aspekty wymiarowania i sprawdzania przepustowości kanałów deszczowych i ogólnospławnych, Forum Eksploatatora, nr 1, 2006, s. 18÷25.
- [6] Kotowski A.: O potrzebie dostosowania zasad wymiarowania kanalizacji w Polsce do wymagań normy PN-EN 752 i zaleceń Europejskiego Komitetu Normalizacji, Gaz, Woda i Technika Sanitarna, nr 6, 2006, s. 20÷26.
- [7] Kotowski A.: Dyskusja nad zaleceniami normy PN-EN 752 odnośnie zasad wymiarowania odwodnień terenów w Polsce, VI Zjazd Kanalizatorów Polskich POLKAN, Łódź 6÷7 grudnia 2007 r., Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, vol. 46, 2007, s. 27÷37.
- [8] Kotowski A.: O wiarygodności podstaw modelowania zbiorników retencyjnych ścieków deszczowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Prace Naukowe. Seria Inżynieria Środowiska, z. 57, 2009, s. 79÷91.
- [9] Kotowski A.: Weryfikacja zasad wymiarowania zbiorników retencyjnych ścieków deszczowych w Polsce, Gaz, Woda i Technika Sanitarna, nr 4, 2009, s. 14÷21.
- [10] Kaźmierczak B., Kotowski A.: Analiza porównawcza wzorów na natężenie deszczy do projektowania kanalizacji, II Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna INFRAEKO, Rzeszów–Niepołomice 4÷5 czerwca 2009 r., Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009, s. 101÷116.
- [11] Kotowski A., Kaźmierczak B.: Ocena przydatności dotychczasowych wzorów na natężenie opadów deszczowych do projektowania odwodnień terenów w Polsce, Gaz, Woda i Technika Sanitarna, nr 11, 2009, s. 11÷17.
- [12] Kotowski A., Kaźmierczak B., Dancewicz A.: Analiza maksymalnych wysokości opadów we Wrocławiu–Strachowicach w latach 1960-2009. Modelowanie opadów miarodajnych do wymiarowania kanalizacji, Raporty Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, Seria SPR, nr 26/2009.
- [13] PN-EN 752:2008: Drain and sewer systems outside buildings (Zewnętrzne systemy kanalizacyjne), PKN, Warszawa 2008.
- [14] Kossakowska-Cezak U. (red.): Climatological normals (CLINO) for the period 1961-1990, WMO, no 847, Geneva 1996, Przegląd Geofizyczny, t. 44, nr 1÷2, 1999.
- [15] Lambor J.: Obliczenie prawdopodobieństwa pojawienia się deszczów nawalnych w Polsce, Gospodarka Wodna, nr 12, 1953, s. 456÷457.
- [16] Schmitt T.G.: Kommentar zum Arbeitsblatt A 118 „Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen“, Wydawn. Seidel-Przywecki, Warszawa 2007.
- [17] Chomicz K.: Ulewy i deszcze nawalne w Polsce, Wiadomości Służby Hydrologicznej, PIHM Warszawa, t. 2, z. 3, 1951.

- [18] Ciepeliowski A., Dąbkowski S.L.: Metody obliczeń przepływów maksymalnych w małych zlewniach rzecznych (z przykładami), Oficyna Wydawnicza Projprzem-EKO, Bydgoszcz 2006.
- [19] Reinhold F.: Regenspenden in Deutschland, Archive für Wasserwirtschaft, 1940.
- [20] Chomicz K.: Normy opadowe dla potrzeb kanalizacji miast, Gospodarka Wodna, nr 10, 1953, s. 377÷382.
- [21] Bogdanowicz E., Stachy J.: Maksymalne opady deszczu w Polsce. Charakterystyki projektowe, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Materiały badawcze, Hydrologia i Oceanologia, nr 23, Warszawa 1998.
- [22] Chomicz K.: O jednolite normy opadowe przy projektowaniu sieci kanalizacyjnej miast, Gospodarka Wodna, nr 3, 1952, s. 81÷85.
- [23] Stachy J. (red.): Atlas hydrologiczny Polski, t. I, Wydawn. Geologiczne, Warszawa 1987.
- [24] Wołoszyn J.: Średnie natężenie, średni czas trwania i rozkład natężenia normalnych opadów we Wrocławiu, Zeszyty Naukowe WSR we Wrocławiu, Melioracja, nr 61, 1961, s. 23÷41.
- [25] Sowiński M.: Wyznaczenie maksymalnego natężenia opadu o T-letnim okresie powtarzalności na przykładzie Wrocławia, Wiadomości IMGW, t. VI, z. 3÷4, 1980, s. 117÷126.
- [26] Licznar P., Łomotowski J., Rojek M.: Pomiary i przetwarzanie danych opadowych dla potrzeb projektowania i eksploatacji systemów odwodnieniowych, Wydawn. FUTURA, Poznań 2005.
- [27] Strupczewski W., Napiórkowski J.: Rozkłady maksymalnych sezonowych wysokości opadów atmosferycznych i ich sum na podstawie modelu serii czasowej, Przegląd Geofizyczny, vol. XXVI, nr 1÷2, 1981, s. 25÷36.
- [28] Bartels H. i in.: Starkniederschlagshöhen für Deutschland. KOSTRA, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main 1997.

## **ANALYSIS OF METHODOLOGY OF PRECIPITATION MODELING FOR SEWERAGE DIMENSIONING**

### **S u m m a r y**

The rules of measuring of drainage area in Poland, which were worked out in the fifties of last century, are frequently not suitable, that means lower results of calculations of unreliable precipitation stream. Those rules need verification, particularly urgent change of the Błaszczyk's model with new precise models, including local range, on which base would be probable to develop the precipitation atlas in Poland – like KOSTRA atlas in Germany. The basis of this work were pluviographic measurements form IMGW meteorological station in Wrocław-Strachowice from years 1960-1990. On this basis methodology were elaborated, verified in practice for the use in other meteorological stations in the country, for the physical or probabilistic description of rainfall measurement results.

*Złożono w Oficynie Wydawniczej w kwietniu 2010 r.*