

Andrzej KOTOWSKI
Politechnika Wrocławska

FIZYKALNE MODELOWANIE OPADÓW DO WYMIAROWANIA KANALIZACJI

Podstawą niniejszej pracy były wyniki pomiarów pluwiograficznych ze stacji meteorologicznej IMGW Wrocław-Strachowice z lat 1960÷2009. Celem wyodrębnienia z pluwiogramów intensywnych deszczów, do analiz statystycznych częstości ich występowania przyjęto własne kryterium wysokości opadów, które pozwoliło na wyselekcjonowanie dla każdego roku od kilku do kilkunastu najintensywniejszych opadów. Łącznie z okresu 50 lat obserwacji wyodrębniono 514 opadów syntetycznych, które następnie były szeregowane według nierosnących wysokości w 16 przedziałach czasowych ich trwania (od 5 min do 72 godz.). Na tej podstawie opracowano modele fizykalne na maksymalną wysokość opadów, w tym przekształcone na natężenie jednostkowe, do projektowania odwodnień terenów w warunkach wrocławskich.

1. Wprowadzenie

W celu zwiększenia niezawodności działania systemów odwadniania terenów (w tym kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej), projektowanych i budowanych w Polsce zgodnie z wymaganiami PN-EN 752:2008, pilna staje się potrzeba uściślenia zasad ich wymiarowania opartego na ciągłych pomiarach opadów z okresu kilkudziesięciu lat, celem wychwycenia ewentualnego trendu zmian klimatycznych. O wiarygodności każdej metody obliczeniowej, jak wynika z teorii niezawodności, decyduje najsłabsze ogniwo, w tym wypadku dokładność danych bądź algorytmów ich opracowywania.

Sformułowane w latach 50. XX w. i utrwalone w literaturze przedmiotu [1÷4] zasady wymiarowania odwodnień terenów w Polsce, w tym zwłaszcza systemów kanalizacyjnych – z wyjściowym modelem Błaszczyka na natężenie deszczu – są coraz częściej kontestowane jako nieodpowiednie, tzn. zaniżające wyniki obliczeń miarodajnych strumieni opadów, a tym samym prowadzące do niewłaściwego, czyli „zbyt oszczędnego” wymiarowania sieci i obiektów kanalizacyjnych [5÷8]. Chodzi tutaj zwłaszcza o systemy ogólnospławne przeżywające w wielu krajach swój renesans, a w tym szczególnie o podstawy projektowania zbiorników retencyjnych, wymiarowanych z wykorzystaniem modelu Błaszczyka [9÷14], czy też towarzyszących im przelewów burzowych [15÷18], a także separatorów [19÷21] i regulatorów przepływu ścieków [22÷24] na kana-

lizacji deszczowej. Zasady te wymagają więc weryfikacji, a zwłaszcza pilnego zastąpienia modelu Błaszczyka nowymi, dokładniejszymi modelami o zasięgu lokalnym, na podstawie których możliwe byłoby w przyszłości opracowanie szczegółowego atlasu opadów w Polsce (na wzór atlasu KOSTRA w Niemczech). Dlatego tak ważne stają się obecnie systematyczne badania opadów w celu określenia statystycznej częstości występowania maksymalnych wysokości czy natężeń jednostkowych deszczów. Niezbędny jest do tego odpowiednio długi materiał archiwalny z obserwacji opadów [25, 26].

2. Materiał pluwiograficzny i metody badawcze

Materiałem badawczym wykorzystanym w pracy były archiwalne pluwiogramy ze stacji IMGW Wrocław-Strachowice za lata 1960÷2009 [26]. Do roku 2006 pomiary opadów były rejestrowane za pomocą pluwiografu pływakowego (zegarowego), a od 2007 r. przez deszczomierz automatyczny SEBA, z zapisem elektronicznym. Opracowując dostępne materiały archiwalne (pluwiogramy), ograniczono ich analizę do okresu maj÷październik (V÷X), bowiem materiał z kwietnia i listopada był często niekompletny z powodu występujących przymrozków, a co się z tym wiąże – niewłaściwego odzwierciedlenia przebiegu opadów. Ponadto nie w każdym roku w tych miesiącach prowadzono pomiary. Jak wykazano w pracy [27], w 30-leciu 1961÷1990 w 63 stacjach meteorologicznych w Polsce największe w roku wysokości opadów dobowych zdarzyły się w półroczu zimowym (XI÷IV) 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 półroczu ciepłego (V÷X) może być uznane za miarodajne dla opadów maksymalnych.

W IMGW opracowywanie pluwiogramów papierowych dokonuje się standardowo dla sztywnych przedziałów godzinowych, poprzez wyznaczenie wysokości opadu i czasu jego trwania. Konsekwencją tego stanu rzeczy jest to, że „rzeczywista” wysokość opadu (z pluwiogramu) z kolejnych 60 min jego trwania jest zawsze większa bądź co najwyżej równa wysokości opadu w sztywnym przedziale jednej godziny. W tym przypadku muszą być stosowane współczynniki korekcyjne (>1) [27]. Na potrzeby niniejszej pracy taka dokładność była niewystarczająca, w związku z czym wyznaczano wysokość opadu z pluwiogramów dla przedziałów 5-minutowych. Taka dokładność jest wymagana m.in. przy sporządzaniu opadów modelowych (typu Eulera), serii opadów nawalnych bądź deszczów syntetycznych generowanych losowo, niezbędnych do modelowania hydrodynamicznego systemów odwodnień terenów [28, 29]. Wyznaczenie z zapisu na pluwiogramie papierowym przedziałów czasowych krótszych niż 5-minutowe byłoby trudne i obarczone już znaczną niedokładnością. Sytuacja uległa zmianie w momencie zastosowania w meteorologii elektronicznego zapisu przebiegu opadów atmosferycznych. Dzięki pluwiogramom możliwe jest

określenie całkowitej wysokości opadu w rzeczywistym czasie jego trwania bądź w wybranych jego częściach – metodą ruchomej sumy. Wysokości opracowywanych opadów określano dla następujących 16 przedziałów czasu ich trwania: 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90 i 120 min oraz 3, 6, 12, 18, 24, 36, 48 i 72 godz.

Wyznaczenie powtarzalności (czyli częstości C) bądź prawdopodobieństwa p występowania opadów deszczu o danej wysokości bądź intensywności I , bądź też wartości natężenia jednostkowego q odbywa się najczęściej na drodze szeregowania opadów według nierosnących wartości tych wskaźników [26]. W ten sposób, w pierwszym wierszu znajdzie się opad o najwyższej zaobserwowanej wartości intensywności czy natężenia, a w ostatnim – o najniższej zmierzonej wartości wskaźnika. Odnosić to można zarówno do całego okresu trwania opadu (metoda „średnich wartości”), jak i do poszczególnych jego fragmentów o znanych przedziałowych wartościach h , I czy q (metoda „maksymalnych wartości”). Druga metoda jest odpowiednia do formułowania podstaw bezpiecznego projektowania kanalizacji.

Przy wyodrębnianiu intensywnych deszczów do analiz statystycznych przyjęto własne kryterium wysokości opadów: $h \geq 0,75t^{0,5}$, opierające się na kryterium Chomicza: $h_{U0} \geq t^{0,5}$ – w odniesieniu do granicznej wysokości opadu (U_0) dla silnych deszczów [30]. Zaniżenie kryterium Chomicza o 25% (poniżej krzywej U_0) miało na celu wyodrębnienie do rocznych zestawień większej liczby intensywnych deszczów – więc nie tylko silnych deszczów, ulew, silnych ulew czy deszczów nawalnych – tak aby każdy sezon pluwiograficzny był reprezentowany przez co najmniej kilka intensywnych opadów (nawet w latach „suchych”). Przyjęte kryterium pozwoliło na wyselekcjonowanie dla każdego roku z okresu 1960÷2009 od kilku do kilkunastu najbardziej intensywnych opadów (w sezonie V÷X). Łącznie, z okresu 50 lat obserwacji do szczegółowej analizy statystycznej wyselekcjonowano 514 opadów syntetycznych (co dało przeciętnie ok. 10 opadów na rok), które następnie były szeregowane według malejących wysokości opadów w poszczególnych przedziałach czasowych. Podstawy metodologiczne fizykalnego i probabilistycznego modelowania opadów miarodajnych do wymiarowania kanalizacji sformułowano i uogólniono w pracy [26].

3. Analiza i fizykalna interpretacja szeregów częstości opadów maksymalnych we Wrocławiu-Strachowicach

3.1. Serie czasowe opadów maksymalnych

W fizykalnej interpretacji wyników pomiarów opadów przypisuje się (a priori) uporządkowanym nierosnąco seriom czasowym zmierzonych, przedziałowych wysokości empiryczną częstość ich występowania – lecz nie większą niż długość okresu obserwacji opadów. W tabeli 1. uszeregowano malejąco przedziałowe wysokości opadów (o czasie trwania od 5 min do 72 godz.)

z $N = 50$ lat obserwacji i poddano interpretacji 50 największych serii czasowych deszczów syntetycznych, przypisując im empiryczne częstości występowania:

$$C(m, N) = (N + 1)/m \quad (1)$$

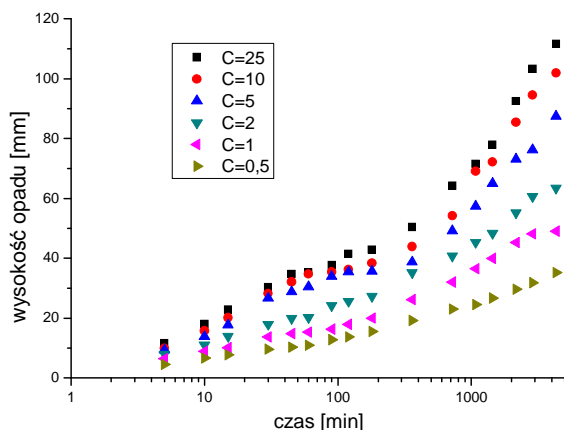
gdzie m – numer wiersza (szeregu): $m = 1, 2, 3, \dots, 50, \dots, 100$.

I tak, deszcz syntetyczny w 50. wierszu odpowiada częstości występowania $C = 1$ rok, odpowiednio: deszcz w 25. wierszu odpowiada $C = 2$ lata, w 10. – $C = 5$ lat, w 5. – $C = 10$ lat, w 2. – $C = 25$ lat oraz w 1. – $C = 50$ lat. Dodatkowo, podano przykładowo 100. szereg czasowy, odpowiadający częstości występowania $C = 0,5$ roku, czyli występujący dwa razy w roku.

Tabela 1. Uszeregowanie największych przedziałowych wysokości opadów h [mm] z 514 wyselekcjonowanych deszczów z 50 lat obserwacji we Wrocławiu-Strachowicach (dla $C = 50 \div 0,5$)

Nr	C [lata]	Czas trwania opadu [min]															
		5	10	15	30	45	60	90	120	180	360	720	1080	1440	2160	2880	4320
1	50	13,1	18,7	24,7	32,9	34,7	35,3	42,7	57,7	61,9	63,1	64,2	72,9	80,1	92,6	103,9	116,9
2	25	11,6	18,0	22,8	30,3	34,7	35,3	37,7	41,5	42,8	50,4	64,2	71,5	77,9	92,5	103,2	111,6
5	10	9,9	15,7	20,1	28,2	32,1	34,7	35,4	36,2	38,4	43,9	54,2	69,1	72,2	85,4	94,5	101,9
10	5	9,3	13,8	17,7	26,7	28,8	30,5	33,9	35,4	35,7	38,7	49,2	57,4	65,0	73,1	76,2	87,5
25	2	8,0	11,0	13,9	17,9	19,9	20,2	24,2	25,6	27,3	35,2	40,8	45,3	48,3	55,2	60,6	63,4
50	1	6,4	8,9	10,1	13,7	14,8	15,3	16,3	17,9	20,0	26,2	32,0	36,5	39,9	45,2	48,1	49,0
100	0,5	4,5	6,6	7,7	9,6	10,3	10,9	12,8	13,7	15,5	19,2	23,0	24,5	26,7	29,6	31,8	35,2

Na rysunku 1. zobrazowano trendy zmian zmierzonych, przedziałowych wysokości opadów w czasie (DDF) dla serii czasowych opadów syntetycznych o częstości występowania $C = 0,5; 1; 2; 5; 10$ i 25 lat. Z rysunku wynika, że przykładowe zależności $h(t, C)$ stanowią rodzinę krzywych o ogólnym równaniu $h(t, C) = at^n$.



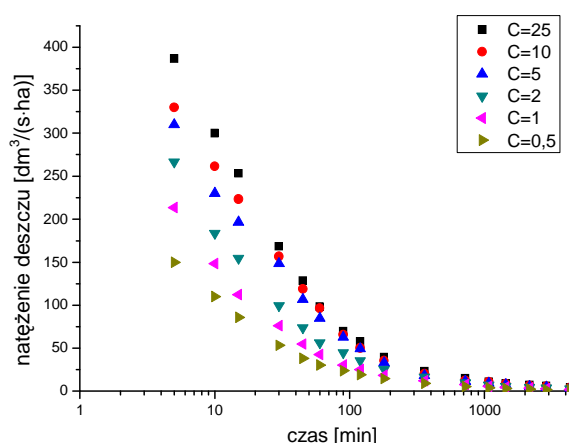
Rys. 1. Trendy zmian przedziałowych wysokości opadów h w czasie t dla serii czasowych (typu DDF) o częstości $C = 0,5; 1; 2; 5; 10$ i 25 lat (logarytmiczna skala czasu)

W tabeli 2. przedstawiono przedziałowe wysokości opadów (z tab. 1.) przeliczone na natężenia jednostkowe q [$\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{ha})$]. Podobnie jak w tab. 1., przedziałowe natężenia syntetycznego deszczu w 50. wierszu odpowiadają częstości występowania $C = 1$ rok i analogicznie: natężenia deszczu w 25. wierszu odpowiadają $C = 2$ lata, w 10. – $C = 5$ lat, w 5. – $C = 10$ lat itd. Dodatkowo, w tab. 2. podano 100. szereg czasowy, odpowiadający częstości występowania deszczu $C = 0,5$, tj. dwa razy w roku.

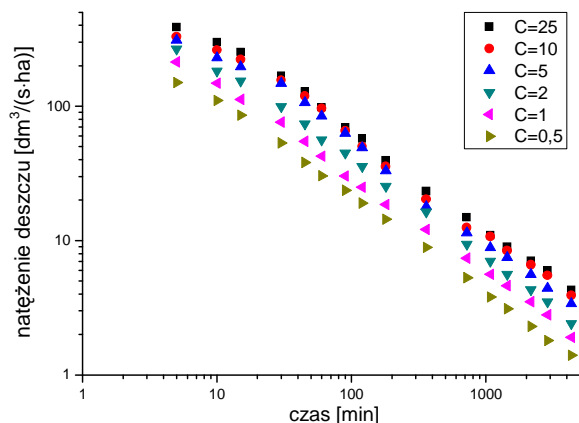
Tabela 2. Uszeregowanie największych przedziałowych natężeń jednostkowych q [$\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{ha})$] z 514 wyselekcjonowanych deszczów syntetycznych z 50 lat obserwacji we Wrocławiu-Strachowicach

Nr	C [lata]	Czas trwania opadu [min]															
		5	10	15	30	45	60	90	120	180	360	720	1080	1440	2160	2880	4320
1	50	436,7	311,7	274,4	182,8	128,5	98,1	79,1	80,1	57,3	29,2	14,9	11,3	9,3	7,1	6,0	4,5
2	25	386,7	300,0	253,3	168,3	128,5	98,1	69,8	57,6	39,6	23,3	14,9	11,0	9,0	7,1	6,0	4,3
5	10	330,0	261,7	223,3	156,7	118,9	96,4	65,6	50,3	35,6	20,3	12,5	10,7	8,4	6,6	5,5	3,9
10	5	310,0	230,0	196,7	148,3	106,7	84,7	62,8	49,2	33,1	17,9	11,4	8,9	7,5	5,6	4,4	3,4
25	2	266,7	183,3	154,4	99,4	73,7	56,1	44,8	35,6	25,3	16,3	9,4	7,0	5,6	4,3	3,5	2,4
50	1	213,3	148,3	112,2	76,1	54,8	42,5	30,2	24,9	18,5	12,1	7,4	5,6	4,6	3,5	2,8	1,9
100	0,5	150,0	110,0	85,6	53,3	38,2	30,3	23,7	19,0	14,4	8,9	5,3	3,8	3,1	2,3	1,8	1,4

Rys. 2. Trendy zmian jednostkowych natężeń q deszczów w czasie t dla syntetycznych opadów o częstości występowania $C = 0,5$; 1; 2; 5; 10 i 25 lat (w układzie półlogarytmicznym)



Na rysunkach 2. i 3. zobrazowano trendy zmian przedziałowych natężeń opadów (uzyskanych z przeliczenia wysokości opadów z tab. 1.) dla serii czasowych syntetycznych deszczów o częstości występowania $C = 0,5$; 1; 2; 5; 10 i 25 lat. Z rysunków tych wynika, że zmierzone zależności $q(t, C)$ stanowią rodzinę krzywych (typu IDF) o ogólnym równaniu $q(t, C) = 166,7at^{n-1}$. Świadczy o tym zwłaszcza równoległość linii $q(t)$ dla $C = 0,5$ –25 lat na rys. 3. Zarówno z uszeregowania największych przedziałowych wysokości opadów (tab. 1., rys. 1.), jak i największych przedziałowych natężeń opadów (tab. 2., rys. 2. i 3.)



Rys. 3. Trendy zmian jednostkowych natężeń q deszczów w czasie t dla syntetycznych opadów o częstości występowania $C = 0,5$; 1; 2; 5; 10 i 25 lat (w układzie podwójnie logarytmicznym)

wynika, że zależności $h(t)$ i $q(t)$ dla przykładowych powtarzalności opadów $C = 0,5$; 1; 2; 5; 10 i 25 lat stanowią rodziny krzywych, odpowiednio typu DDF i IDF.

3.2. Modele fizyczne opadów maksymalnych

Adaptacja modeli literaturowych

W celu sformułowania modelu fizycznego na maksymalną wysokość opadów (dla różnych częstości występowania) w latach 1960÷2009 przyjęto wstępnie dwuparametrowe równanie wyjściowe na badaną rodzinę zależności h od t i C , postaci:

$$h_{\max}(t, C) = a(C)t^{n(C)} \quad (2)$$

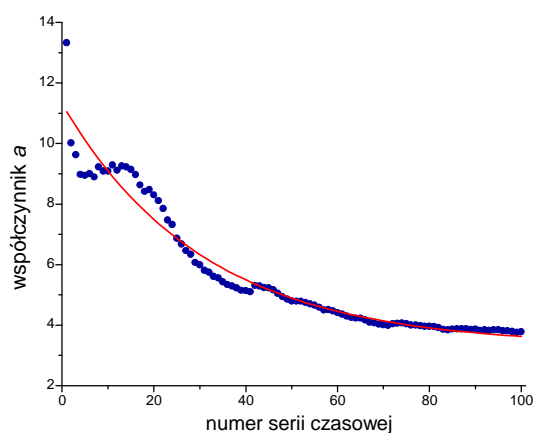
zwanej w literaturze modelem Lindleya, dla której należy ustalić z pomiarów wartości współczynników a i n w funkcji C . Na tej podstawie, dla każdego z 50 wierszy w tab. 1., o przyporządkowanej malejącej częstości serii czasowych opadów od $C = 50$ do $C = 1$, wyestymowano wartości współczynników a i n metodą najmniejszych kwadratów. Ponadto uwzględniono dodatkowo 50 kolejnych wierszy, aż do 100. ($C = 0,5$). Wyniki tych obliczeń zamieszczono w tab. 3.

Tabela 3. Wyniki estymacji wartości współczynników a i n równania $h_{\max}(t, C) = a(C)t^{n(C)}$ dla wybranych serii czasowych

Nr	C	a	n
1	50	13,33	0,255
2	25	10,02	0,288
5	10	8,95	0,291
10	5	9,09	0,268
25	2	6,87	0,270
50	1	4,80	0,286
100	0,5	3,78	0,268

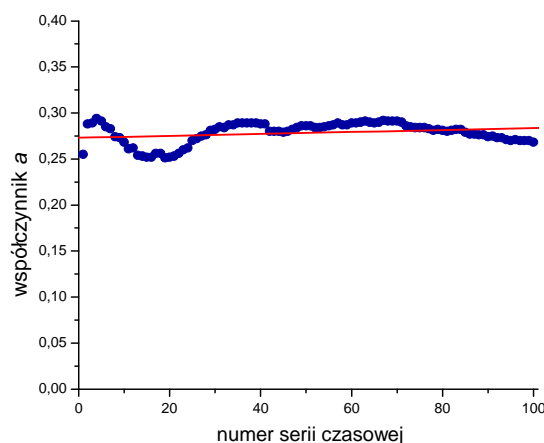
Dla danych z tab. 3. opracowano ilustrację trendów zmian wartości badanych współczynników $a(C)$ i $n(C)$ zależności (2), które przedstawiono na rys. 4. i 5.

Rys. 4. Trend zmian wartości współczynnika a w równaniu $h_{\max}(t, C) = a(C)t^{n(C)}$ dla 100 opadów syntetycznych o częstości występowania od $C = 50$ do $C = 0,5$



Współczynnik $a(C)$ ma wyraźny krzywoliniowy, wykładniczy trend zmian badanej zależności (rys. 4.), określony dla 100 szeregów częstości od $C = 50$ do $C = 0,5$ (z 50 lat obserwacji opadów – tab. 3.).

Rys. 5. Trend zmian wartości współczynnika n w równaniu $h_{\max}(t, C) = a(C)t^{n(C)}$ dla 100 opadów syntetycznych o częstości występowania od $C = 50$ do $C = 0,5$



Współczynnik $n(C)$ nie ma natomiast wyraźnego trendu zmian badanej zależności (rys. 5.). Średnia wartość wykładnika n w równaniu (2) dla 100 deszczów syntetycznych wynosi 0,278 (zmiany od 0,251 do 0,294), a dla 50 największych deszczów syntetycznych (od $C = 50$ do $C = 1$) $n = 0,275$. Średnie te są zbliżone. Jednak za miarodajną uznano drugą średnią – stałą wartość wykładnika potęgowego n w równaniu wyjściowym (2), które przyjmuje teraz postać:

$$h_{\max}(t, C) = a(C)t^{0,275} \quad (3)$$

Dla wstępnie uszczegółowionej postaci (3) równania wyjściowego (2) wyznaczono nowe wartości parametru – współczynnika $a(C)$. Wyniki obliczeń przy zastosowaniu metody najmniejszych kwadratów zamieszczono w tab. 4.

Tabela 4. Wyestymowane nowe wartości współczynnika $a(C)$ przy ustalonym $n = 0,275$ dla serii czasowych $C = 50 \div 1$

Nr	C	a
1	50	11,627
2	25	10,969
5	10	10,030
10	5	8,691
25	2	6,639
50	1	5,205

W pierwszej próbie do opisu zależności $a(C)$ wykorzystano znany model opadów Błaszczyka, sprowadzony do postaci:

$$h_{\max}(t, C) = a_1 \sqrt[3]{C} t^{0,33} \quad (4)$$

gdzie

$$a(C) = a_1 C^{0,333} \quad (5)$$

Ogólnie, dla dowolnej wartości wykładnika m_i

$$a(C) = a_1 C^{m_i} \quad (6)$$

Dla danych z tab. 4. uszczegółowiono zależność (6) przy $R = 0,965$ (rys. 6.):

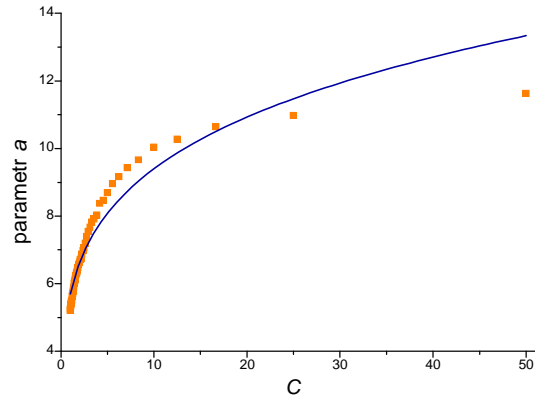
$$a(C) = 5,698 C^{0,217} \quad (7)$$

skąd uzyskano I model fizyczny postaci:

$$h_{\max}(t, C) = 5,698 C^{0,217} t^{0,275} \quad (8)$$

Jak wynika z rys. 6., przyjęte wstępnie i uszczegółowione równanie (6) nie jest odpowiednie do opisu badanej zależności $a(C)$ w warunkach wrocławskich. W drugiej próbie do opisu zależności $a(C)$ wykorzystano postać modelu Stachy na wysokość opadów maksymalnych, zaczerpniętą z Atlasu hydrologicznego Polski z 1986 r. [31]:

$$h_{\max}(t, p) = \{a_1 - a_2 [-\ln(-\ln(1 - p))]\} t^{-n} \quad (9)$$



Rys. 6. Próba dopasowania funkcji $a(C) = 5,698C^{0,217}$ w równaniu $h_{\max}(t, C) = a(C)t^{0,275}$ dla 50 quasi-wygładzonych szeregów częstości opadów ($C = 1 \div 50$)

skąd otrzymano:

$$a(p) = a_1 - a_2[-\ln(-\ln(1-p))] \quad (10)$$

a po przekształceniu względem C :

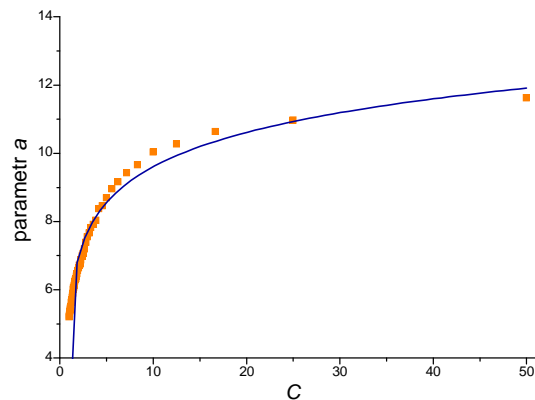
$$a(C) = a_1 - a_2[-\ln(-\ln(1-1/C))] \quad (11)$$

Dla postaci (11) i danych z tab. 4. uzyskano przy $R = 0,984$ równanie (rys. 7.):

$$a(C) = 6,417 + 1,396[-\ln(-\ln(1-1/C))] \quad (12)$$

a stąd II model fizykalny (przy ograniczeniu $C > 1$) postaci:

$$h_{\max}(t, C) = \{6,417 + 1,396[-\ln(-\ln(1-1/C))]\} t^{0,275} \quad (13)$$



Rys. 7. Próba dopasowania funkcji $a(C) = 6,417 - 1,396[-\ln(-\ln(1-1/C))]$ w równaniu $h_{\max}(t, C) = a(C)t^{0,275}$ dla 50 quasi-wygładzonych szeregów częstości opadów ($C = 1 \div 50$)

Własne modele fizyczne opadów maksymalnych

Próby opisu zależności $a(C)$ oparte na modelach literaturowych nie przyniosły zadowalających rezultatów. Zaproponowano zatem własną postać ogólną poszukiwanego równania:

$$a(C) = a_1 C^{m_2} + a_2 \quad (14)$$

W wyniku estymacji parametrów, wykorzystując dane z tab. 4., uzyskano dla III modelu fizycznego funkcję:

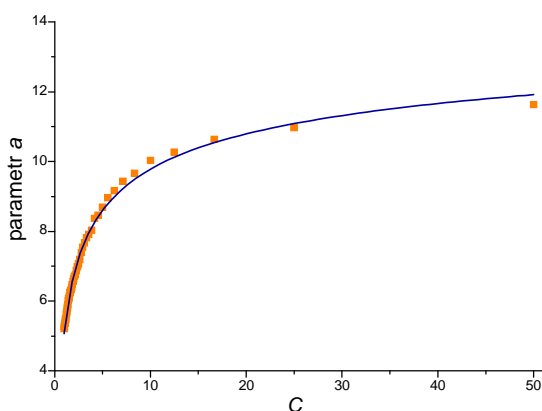
$$a(C) = -11,928 C^{-0,218} + 17,0 \quad (15)$$

Wzór (15), uzyskany przy $R = 0,998$, najlepiej z dotychczasowych przybliża charakter badanej zależności $a(C)$ (rys. 8.). Zatem III model fizyczny na maksymalną wysokość opadów we Wrocławiu-Strachowicach przyjmuje postać:

$$h_{\max}(t, C) = a(C)t^{0,275} = (-11,928 C^{-0,218} + 17,0)t^{0,275} \quad (16)$$

a po przekształceniach:

$$q_{\max}(t, C) = \frac{166,67h(t, C)}{t} = (-1988 C^{-0,218} + 2834)t^{-0,725} \quad (17)$$



Rys. 8. Próba dopasowania funkcji $a(C) = -11,928 C^{-0,218} + 17,0$ w równaniu $h_{\max}(t, C) = a(C)t^{0,275}$ dla 50 quasi-wygładzonych szeregów częstości opadów ($C = 1 \div 50$)

W czwartej próbie sprawdzono przydatność innej niż przyjęta na wstępie tego punktu wyjściowa dwuparametrowa postać modelu (2) opadów maksymal-

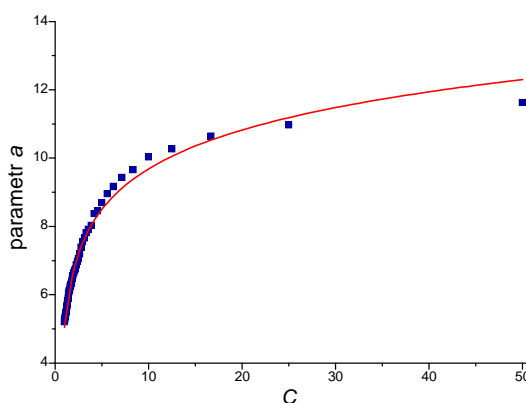
nych we Wrocławiu. Zaproponowano mianowicie trójparametrowy model IV postaci:

$$h_{\max}(t, C) = a(C)(t - b(C))^{n(C)} \quad (18)$$

dla której wyznaczono parametry a , b i n w sposób analogiczny jak we wcześniej opisanych próbach. Dla IV modelu fizykalnego przyjęto również (jak poprzednio) stałą wartość wykładnika potęgowego $n(C)$. Tak więc, dla postaci (18) ustalono $n = 0,265$ oraz stałą wartość współczynnika $b = 3,450$, stąd ostatecznie uzyskano model:

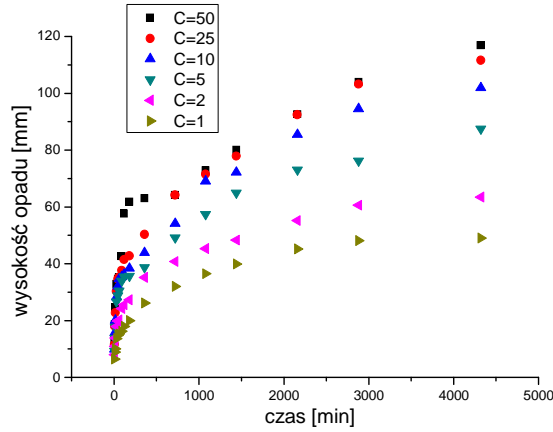
$$h_{\max}(t, C) = (6,670 + 1,677 \ln(C - 0,530)) (t - 3,45)^{0,265} \quad (19)$$

Wynik czwartej próby dopasowania funkcji $a(C) = 6,670 + 1,677 \ln(C - 0,530)$ przy $R = 0,995$ (tutaj do równania wyjściowego postaci (18)) nie zwiększył jednak ogólnej dokładności statystycznej modelu (rys. 9.) względem poprzedniego III modelu, gdzie dla $a(C)$ uzyskano $R = 0,998$ i w rezultacie również znacznie dokładniejszy opis, zwłaszcza szeregu o częstotliwości $C = 50$ lat (porównaj rys. 8. i 9.). Jednak IV model fizykalny okazał się także dokładniejszy w opisie dwóch pierwszych interwałów (5 i 10 min) czasu trwania opadów, co zostanie wykazane w dalszej części pracy.

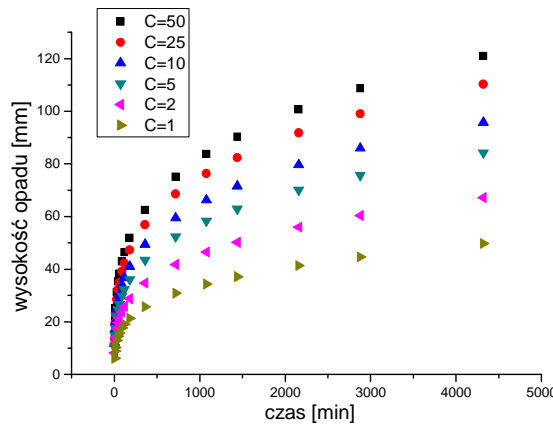


Rys. 9. Próba dopasowania funkcji $a(C) = 6,670 + 1,677 \ln(C - 0,530)$ w równaniu $h_{\max}(t, C) = a(C)(t - 3,45)^{0,265}$ dla 50 quasi-wygładzonych szeregów częstości opadów ($C = 1 \div 50$)

Rysunki 10. i 11. to odpowiednio: zbiorcze zestawienie zmierzonych szeregów częstości maksymalnych wysokości opadów syntetycznych we Wrocławiu-Strachowicach z okresu 1960÷2009 oraz zbiorcze zestawienie krzywych typu DDF, wygładzonych modelem (19).



Rys. 10. Zbiorcze zestawienie zmierzonych (niewygładzonych) szeregów częstości maksymalnych wysokości opadów syntetycznych we Wrocławiu-Strachowicach z okresu 1960÷2009



Rys. 11. Zbiorcze zestawienie krzywych typu DDF – maksymalnych wysokości opadów z okresu 1960÷2009 wygładzonych modelem (19) dla Wrocławia-Strachowic

4. Ocena ilościowa uzyskanych modeli fizycznych opadów maksymalnych

Dalej zestawiono cztery modele fizyczne opadów maksymalnych, uzyskane z 50 lat obserwacji na stacji IMGW Wrocław-Strachowice, przy zastosowaniu pierwszego sposobu interpretacji wyników pomiarów, który polega m.in. na uogólnieniu statystycznym niewygładzonych, probabilistycznie zmierzonych serii czasowych opadów syntetycznych o $t \in [5; 4320]$ min i $C \in [1; 50]$ lat:

- model I (8): $h_{\max}(t, C) = 5,698C^{0,217}t^{0,275}$,
- model II (13): $h_{\max}(t, C) = \{6,417 + 1,396[-\ln(-\ln(1 - 1/C))]\}t^{0,275}$,
- model III (16): $h_{\max}(t, C) = (-11,928C^{-0,218} + 17,0)t^{0,275}$,
- model IV (19): $h_{\max}(t, C) = (6,670 + 1,677\ln(C - 0,530))(t - 3,45)^{0,265}$,

dla których ogólnie:

$$q_{\max}(t, C) = 1000h_{\max}(t, C)/(6t) \quad (20)$$

W tabeli 5. porównano wyniki zmierzonych maksymalnych wysokości opadów h [mm] we Wrocławiu-Strachowicach w okresie 1960÷2009 dla $C = 1 \div 50$ lat oraz t od 5 min do 72 godz. (przeliczonych według zależności (20) na natężenia jednostkowe q [$\text{dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha})$]) z obliczonymi według czterech opracowanych w artykule modeli fizykalnych opadów. Z przedstawionej oceny dokładności można sformułować następujące wnioski:

- stwierdzono duże odchylenia wyników obliczeń względem danych pomiarowych dla dwóch najkrótszych interwałów czasowych trwania deszczów w przypadku trzech pierwszych modeli, a zwłaszcza dla interwału 5-minutowego rzędu $+(20 \div 50)\%$ i nieco mniejsze dla 10-minutowego rzędu $+(10 \div 20)\%$,
- w pozostałych 14 interwałach czasowych (od 15 min do 72 godz.) wyniki obliczeń z trzech pierwszych modeli są w miarę zgodne z wynikami pomiarów, a różnice są rzędu $\pm 15\%$, z wyjątkiem przypadków, gdzie dane pomiarowe wizualnie w zdecydowany sposób odbiegają od wyznaczonych linii trendów, lecz i wówczas mieszczą się one w 95% przedziałach ufności uzyskanych modeli [26],
- IV model fizykalny (19), jako najdokładniejszy w porównaniu z trzema pierwszymi (różnice z wynikami pomiarów rzędu $\pm 10\%$), ma znaczenie praktyczne.

Tabela 5. Porównanie zmierzonych maksymalnych wysokości opadów h [mm] we Wrocławiu-Strachowicach, przeliczonych na natężenia jednostkowe q [$\text{dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha})$], z obliczonymi dla czterech analizowanych fizykalnych modeli opadów

C [lata]	t [min]	Dane pomiarowe		Model I (8)		Model II (13)		Model III (16)		Model IV (19)	
		h	q	q	Δq	q	Δq	q	Δq	q	Δq
$C = 1$	5	6,4	213,3	295,7	38,6%	222,2	4,2%	263,3	23,4%	202,6	-5,2%
	10	8,9	148,3	178,9	20,6%	134,4	-9,4%	159,3	7,4%	148,4	-0,1%
	15	10,1	112,2	133,3	18,8%	100,2	-10,7%	118,7	5,8%	114,8	2,3%
	30	13,7	76,1	80,7	6,0%	60,6	-20,4%	71,8	-5,7%	71,7	-5,9%
	45	14,8	54,8	60,1	9,7%	45,2	-17,5%	53,5	-2,4%	53,8	-2,0%
	90	16,3	30,2	36,4	20,5%	27,3	-9,6%	32,4	7,3%	32,7	7,9%
	180	20,0	18,5	22	18,9%	16,5	-10,8%	19,6	5,9%	19,7	6,5%
	360	26,2	12,1	13,3	9,9%	10	-17,4%	11,9	-1,7%	11,9	-1,7%
	720	32,0	7,4	8,1	9,5%	6,1	-17,6%	7,2	-2,7%	7,2	-4,1%
	1440	39,9	4,6	4,9	6,5%	3,7	-19,6%	4,3	-6,5%	4,3	-6,5%
	2880	48,1	2,8	2,9	3,6%	2,2	-21,4%	2,6	-7,1%	2,6	-7,1%
	4320	49,0	1,9	2,2	15,8%	1,7	-10,5%	2	5,3%	1,9	0,0%

Tabela 5. (cd.)

C [lata]	t [min]	Dane pomiarowe		Model I (8)		Model II (13)		Model III (16)		Model IV (19)	
		h	q	q	Δq	q	Δq	q	Δq	q	Δq
$C = 2$	5	8,0	266,7	343,7	28,9%	359,5	34,8%	350,1	31,3%	273,8	2,7%
	10	11,0	183,3	207,9	13,4%	217,5	18,7%	211,8	15,5%	200,5	9,4%
	15	13,9	154,4	155	0,4%	162,1	5,0%	157,9	2,3%	155,4	0,7%
	30	17,9	99,4	93,8	-5,6%	98,1	-1,3%	95,5	-3,9%	96,9	-2,5%
	45	19,9	73,7	69,9	-5,2%	73,1	-0,8%	71,2	-3,4%	72,7	-1,2%
	90	24,2	44,8	42,3	-5,6%	44,2	-1,3%	43,1	-3,8%	44,2	-1,3%
	180	27,3	25,3	25,6	1,2%	26,8	5,9%	26,1	3,2%	26,7	5,5%
	360	35,2	16,3	15,5	-4,9%	16,2	-0,6%	15,8	-3,1%	16,1	-1,2%
	720	40,8	9,4	9,4	0,0%	9,8	4,3%	9,5	1,1%	9,7	3,2%
	1440	48,3	5,6	5,7	1,8%	5,9	5,4%	5,8	3,6%	5,8	3,6%
	2880	60,6	3,5	3,4	-2,9%	3,6	2,9%	3,5	0,0%	3,5	0,0%
	4320	63,4	2,4	2,6	8,3%	2,7	12,5%	2,6	8,3%	2,6	8,3%
$C = 5$	5	9,3	310,0	419,3	35,3%	441,6	42,5%	446,5	44,0%	343,2	10,9%
	10	13,8	230,0	253,7	10,3%	267,2	16,2%	270,1	17,4%	251,4	9,5%
	15	17,7	196,7	189,1	-3,9%	199,1	1,2%	201,3	2,3%	194,8	-0,8%
	30	26,7	148,3	114,4	-22,9%	120,5	-18,7%	121,8	-17,9%	121,4	-18,0%
	45	28,8	106,7	85,2	-20,1%	89,8	-15,8%	90,8	-14,9%	91,1	-14,4%
	90	33,9	62,8	51,6	-17,8%	54,3	-13,5%	54,9	-12,6%	55,4	-11,8%
	180	35,7	33,1	31,2	-5,7%	32,9	-0,6%	33,2	0,3%	33,4	1,2%
	360	38,7	17,9	18,9	5,6%	19,9	11,2%	20,1	12,3%	20,1	12,8%
	720	49,2	11,4	11,4	0,0%	12	5,3%	12,2	7,0%	12,1	6,1%
	1440	65,0	7,5	6,9	-8,0%	7,3	-2,7%	7,4	-1,3%	7,3	-2,7%
	2880	76,2	4,4	4,2	-4,5%	4,4	0,0%	4,5	2,3%	4,4	0,0%
	4320	87,5	3,4	3,1	-8,8%	3,3	-2,9%	3,3	-2,9%	3,2	-2,9%
$C = 10$	5	9,9	330,0	487,3	47,7%	496	50,3%	507,6	53,8%	390,0	18,5%
	10	15,7	261,7	294,8	12,6%	300,1	14,7%	307,1	17,3%	285,7	9,4%
	15	20,1	223,3	219,7	-1,6%	223,7	0,2%	228,9	2,5%	221,4	-0,7%
	30	28,2	156,7	132,9	-15,2%	135,3	-13,7%	138,5	-11,6%	138,0	-11,7%
	45	32,1	118,9	99,1	-16,7%	100,8	-15,2%	103,2	-13,2%	103,6	-12,7%
	90	35,4	65,6	59,9	-8,7%	61	-7,0%	62,4	-4,9%	62,9	-3,8%
	180	38,4	35,6	36,3	2,0%	36,9	3,7%	37,8	6,2%	38,0	7,0%
	360	43,9	20,3	21,9	7,9%	22,3	9,9%	22,9	12,8%	22,9	12,8%
	720	54,2	12,5	13,3	6,4%	13,5	8,0%	13,8	10,4%	13,8	10,4%
	1440	72,2	8,4	8	-4,8%	8,2	-2,4%	8,4	0,0%	8,3	-1,2%
	2880	94,5	5,5	4,9	-10,9%	4,9	-10,9%	5,1	-7,3%	5,0	-9,1%
	4320	101,9	3,9	3,6	-7,7%	3,7	-5,1%	3,8	-2,6%	3,7	-5,1%
$C = 25$	5	11,6	386,7	594,5	53,7%	564,7	46,0%	575,4	48,8%	449,3	16,2%
	10	18	300,0	359,7	19,9%	341,6	13,9%	348,1	16,0%	329,1	9,7%
	15	22,8	253,3	268,1	5,8%	254,6	0,5%	259,5	2,4%	255	0,7%
	30	30,3	168,3	162,2	-3,6%	154	-8,5%	157	-6,7%	159	-5,5%
	45	34,7	128,5	120,9	-5,9%	114,8	-10,7%	117	-8,9%	119,3	-7,2%
	90	37,7	69,8	73,1	4,7%	69,5	-0,4%	70,8	1,4%	72,5	3,9%
	180	42,8	39,6	44,2	11,6%	42	6,1%	42,8	8,1%	43,8	10,6%
	360	50,4	23,3	26,8	15,0%	25,4	9,0%	25,9	11,2%	26,4	13,3%
	720	64,2	14,9	16,2	8,7%	15,4	3,4%	15,7	5,4%	15,9	6,7%
	1440	77,9	9,0	9,8	8,9%	9,3	3,3%	9,5	5,6%	9,5	5,6%
	2880	103,2	6,0	5,9	-1,7%	5,6	-6,7%	5,7	-5,0%	5,7	-5,0%
	4320	111,6	4,3	4,4	2,3%	4,2	-2,3%	4,3	0,0%	4,3	0,0%

Tabela 5. (cd.)

C [lata]	t [min]	Dane pomiarowe		Model I (8)		Model II (13)		Model III (16)		Model IV (19)	
		h	q	q	Δq	q	Δq	q	Δq	q	Δq
C = 50	5	13,1	436,7	691	58,2%	615,6	41,0%	618,4	41,6%	493,2	12,9%
	10	18,7	311,7	418,1	34,1%	372,5	19,5%	374,2	20,1%	361,3	15,9%
	15	24,7	274,4	311,6	13,6%	277,6	1,2%	278,9	1,6%	279,9	2,0%
	30	32,9	182,8	188,5	3,1%	167,9	-8,2%	168,7	-7,7%	174,5	-4,5%
	45	34,7	128,5	140,5	9,3%	125,2	-2,6%	125,7	-2,2%	131	1,9%
	90	42,7	79,1	85	7,5%	75,7	-4,3%	76,1	-3,8%	79,6	0,6%
	180	61,9	57,3	51,4	-10,3%	45,8	-20,1%	46	-19,7%	48,1	-16,1%
	360	63,1	29,2	31,1	6,5%	27,7	-5,1%	27,8	-4,8%	28,9	-1,0%
	720	64,2	14,9	18,8	26,2%	16,8	12,8%	16,8	12,8%	17,4	16,8%
	1440	80,1	9,3	11,4	22,6%	10,1	8,6%	10,2	9,7%	10,5	12,9%
	2880	103,9	6,0	6,9	15,0%	6,1	1,7%	6,2	3,3%	6,3	5,0%
	4320	116,9	4,5	5,1	13,3%	4,6	2,2%	4,6	2,2%	4,7	4,4%

W tabeli 6. zestawiono wyniki obliczeń natężenia opadów z modelu (19) i z modeli innych autorów [26] dla $C = 1 \div 10$ lat i t od 5 min do 3 godz., do względnych porównań ilościowych w warunkach wrocławskich (opad normalny: $H = 590$ mm [26]).

Tabela 6. Zestawienie wyników obliczeń maksymalnych natężeń opadów z modelu fizykalnego (19) i z modeli innych autorów dla $C = 1 \div 10$ lat i $t = 5 \div 180$ min, na tle wyników z modelu Błaszczyka*

Częstość deszczu C	Czas trwania deszczu t	Dane z pomiarów h	Dane z pomiarów z przeliczone na q	q – obliczone z modelu (19)	Błaszczyk* $H = 590$ mm	Stachy Wrocław-Strachowice	Sowiński	Licznar-Łomotowski Wrocław-Swojczyce	Bogdanowicz-Stachy	Reinhold $q_{15,1} = 112,2$ $\text{dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha})$
[lata]	[min]	[mm]	$[\text{dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha})]$		$[\text{dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha})]$					
C = 1	5	6,4	213,3	202,6	158,7	**	**	186,7	80,5	192,4
	10	8,9	148,3	148,4	99,7	**	**	128,2	50,6	141,7
	15	10,1	112,2	114,8	76,0	**	**	98,8	38,6	112,2
	30	13,7	76,1	71,7	47,7	**	**	60,4	24,2	69,1
	45	14,8	54,8	53,8	36,4	**	**	44,8	18,5	49,9
	90	16,3	30,2	32,7	22,9	**	**	27,2	11,6	27,2
	180	20,0	18,5	19,7	14,4	**	**	17,4	7,3	14,3
C = 2	5	8,0	266,7	273,8	199,9	292,8	*	214,3	273,2	250,0
	10	11,0	183,3	200,5	125,7	182,8	170,4	172,3	185,2	184,2
	15	13,9	154,4	155,4	95,7	138,7	137,5	141,3	144,1	145,8
	30	17,9	99,4	96,9	60,2	86,6	79,9	86,3	90,9	89,7
	45	19,9	73,7	72,7	45,9	65,7	55,0	59,7	68,5	64,8
	90	24,2	44,8	44,2	28,8	41,0	27,6	32,2	41,4	35,3
	180	27,3	25,3	26,7	18,1	**	**	22,9	23,9	18,5

* – model z metody średnich natężeń,

** – poza zakresem stosowalności modelu.

Tabela 6. (cd.)

Częstość deszczu C	Czas trwania deszczu t	Dane z pomiarów h	Dane z pomiarów z przeliczone na q	q – obliczone z modelu (19)	Błaszczk* $H = 590$ mm	Stachy Wrocław-Strachowice	Sowiński	Licznar-Łomotowski Wrocław-Swojczyce	Bogdanowicz-Stachy	Reinhold $q_{15,1} = 112,2$ $\text{dm}^3/(\text{s} \cdot \text{ha})$
[lata]	[min]	[mm]	[dm ³ /(s · ha)]		[dm ³ /(s · ha)]					
$C = 5$	5	9,3	310,0	343,2	271,3	409,8	**	321,4	395,6	343,2
	10	13,8	230,0	251,4	170,5	255,8	250,1	238,0	270,8	252,9
	15	17,7	196,7	194,8	129,9	194,2	198,7	185,9	211,1	200,2
	30	26,7	148,3	121,4	81,6	121,2	114,8	108,4	133,3	123,2
	45	28,8	106,7	91,1	62,3	92,0	79,0	75,8	100,2	89,0
	90	33,9	62,8	55,4	39,1	57,4	39,9	42,3	60,3	48,5
	180	35,7	33,1	33,4	24,6	**	**	28,1	34,4	25,4
$C = 10$	5	9,9	330,0	390,0	341,8	487,3	**	486,9	468,9	429,4
	10	15,7	261,7	285,7	214,9	304,2	310,7	270,9	322,0	316,4
	15	20,1	223,3	221,4	163,7	230,9	244,0	212,1	251,3	250,4
	30	28,2	156,7	138,0	102,9	144,1	139,5	140,4	158,7	154,1
	45	32,1	118,9	103,6	78,4	109,4	96,2	107,3	119,3	111,3
	90	35,4	65,6	62,9	49,3	68,3	48,5	60,1	71,6	60,7
	180	38,4	35,6	38,0	31,0	**	**	21,1	40,7	31,8

* – model z metody średnich natężeń,

** – poza zakresem stosowalności modelu.

Z analizy wyników obliczeń natężeń opadów maksymalnych w warunkach wrocławskich (tab. 6.) wynika, że porównywane modele można uznać pod względem ilościowym za jednorodne, poza modelem Bogdanowicz-Stachy dla $C = 1$ rok oraz oczywiście modelem Błaszczyka – ustalonym metodą średnich natężeń, gdzie wyniki obliczeń znacznie odbiegają (in minus) od pozostałych. Model Błaszczyka zaniża średnio aż o 40% miarodajne do wymiarowania kanałów natężenia opadów. Nie powinien być więc dalej stosowany w praktyce.

Należy zaznaczyć, że modele opadów maksymalnych pozostałych autorów zostały ustalone na podstawie innych danych źródłowych i z różnych okresów pomiarowych, a więc ich bezpośrednie porównywanie ilościowe z modelem dla Wrocławia-Strachowice jest niewłaściwe. Ponadto autorzy ci stosowali różne metody wyboru próby losowej opadów do analiz statystycznych częstości ich występowania. Różnice obliczanych wysokości opadów maksymalnych wynikają również z samej klasy dokładności porównywanych modeli (fizyczne i probabilistyczne), ich regionalnego (model Bogdanowicz-Stachy czy Reinholda) bądź lokalnego zasięgu, czy wreszcie lokalizacji stacji pomiarowych na terenie Wrocławia (Swojczyce w przypadku modelu Licznar-Łomotowskiego czy Strachowice w przypadku modelu Bogdanowicz-Stachy i modelu fizycznego (19)).

5. Podsumowanie

Materiałem badawczym wykorzystanym w pracy były archiwalne pluwiogramy ze stacji IMGW Wrocław-Strachowice, za okres od 1960 do 2009 r. Celem wyodrębnienia z pluwiogramów intensywnych deszczów, na potrzeby analizy statystycznej częstości ich występowania przyjęto własne kryterium wysokości opadów, które pozwoliło na wyselekcjonowanie dla każdego roku od kilku do kilkunastu najintensywniejszych opadów. Łącznie z okresu 50 lat obserwacji do szczegółowej analizy statystycznej wyodrębniono 514 opadów syntetycznych, które następnie były szeregowane według nierosnących wysokości w poszczególnych 16 przedziałach czasowych ich trwania (od 5 min do 72 godz.).

Do sformułowania modelu fizykalnego na maksymalną wysokość opadów, o różnych częstościach występowania w latach 1960÷2009, przyjęto wstępnie dwuparametrowe równanie na badaną rodzinę zależności typu DDF, o postaci zwanej w literaturze modelem Lindleya, dla której wyestymowano wartości współczynników regresji metodą najmniejszych kwadratów. W efekcie uzyskano trzy modele fizykalne o różnej klasie dokładności, jednak niezadowolającej w odniesieniu do dwóch najkrótszych czasów trwania opadów (5 i 10 min). W czwartej próbie sprawdzono przydatność trójparametrowego modelu (19), o ogólnej postaci modelu Reinholda. W tym przypadku uzyskano dostatecznie dokładny opis zmierzonych wysokości opadów w czasie dla badanych rodzin krzywych typu DDF, o różnych częstościach występowania na stacji Wrocław-Strachowice.

Model opadów Błaszczyka (z 1954 r.) zaniża średnio o 40% miarodajne do wymiarowania kanałów i obiektów nateżenia deszczów. Nie powinien być więc dalej stosowany do projektowania systemów kanalizacyjnych w Polsce, co jest postulowane m.in. w pracach [5÷8].

Przeprowadzone badania i studia pozwalają na wyciągnięcie wniosków końcowych o znaczeniu metodologicznym.

1. Zweryfikowana na opadach we Wrocławiu-Strachowicach metoda interpretacji (selekcji i wyboru) intensywnych deszczów, miarodajnych do analiz statystycznych częstości ich występowania, cechuje się następującymi założeniami:
 - analizowane są wszystkie intensywne opady w każdym roku (nie tylko zaliczane do silnych deszczów nawalnych), z ciągłego okresu kilkudziesięciu (min. 30, opt. 50) lat jednorodnych obserwacji,
 - zaproponowane 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 (prawdopodobieństwa) ich występowania.
2. Materiał badawczy opadów (w przypadku Wrocławia rejestrowany na kilku stacjach) powinien być ciągle aktualizowany i w konsekwencji należy wery-

fikować okresowo postać matematyczną opracowanych modeli, w celu zwiększenia ich dokładności, zwłaszcza przy rzadkiej powtarzalności opadów ($C = 10\div 50$ lat).

3. W celu uzyskania porównywalności modeli opadów pochodzących z różnych stacji meteorologicznych wyniki pomiarów wysokości opadów powinny być opracowywane i uogólniane jedną wspólną metodologią, zaproponowaną w tej pracy.

Literatura

1. Błaszczyk W., Roman M., Stamatello H.: *Kanalizacja*, t. I, Arkady, Warszawa 1974.
2. Błaszczyk P. (red.): *Zasady planowania i projektowania systemów kanalizacyjnych w aglomeracjach miejsko-przemysłowych i dużych miastach*, IKŚ, Warszawa 1983.
3. Błaszczyk W., Stamatello H., Błaszczyk P.: *Kanalizacja. Sieci i pompownie*, Arkady, Warszawa 1983.
4. Kwietniewski M., Nowakowska-Błaszczyk A., Olszewski W., Ways M.: *Kanalizacja. Materiały do projektowania*, Wydawn. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1985.
5. Suligowski Z.: Zagospodarowanie wód opadowych. Szczególne problemy, *Forum Eksploatatora*, nr 3-4, 2004, s. 24-27.
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, 6-7.12.2007. *Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN*, vol. 46, 2007, s. 27-37.
8. Dziopak J., Hypiak J.: Analiza metodologii wymiarowania kanalizacji ogólnospławnej, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, nr 276, seria Budownictwo i Inżynieria Środowiska, z. 58 (2/11).
9. Tabernacki J.: Deszczowe zbiorniki retencyjne w kanalizacji. Nowa technika w inżynierii sanitarnej, *Wodociągi i Kanalizacja*, nr 11, Arkady, Warszawa 1980.
10. Dziopak J.: *Analiza teoretyczna i modelowanie wielokomorowych zbiorników kanalizacyjnych*, Wydawn. Politechniki Krakowskiej, Kraków 1992.
11. Dziopak J., Słyś D.: *Modelowanie zbiorników klasycznych i grawitacyjno-pompowych w kanalizacji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007.
12. Kisiel A.: Przegląd najnowszych rozwiązań zbiorników kanalizacyjnych (część I i II), *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 5 (cz. I) i 6 (cz. II), 2000.
13. 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.

14. Kotowski A.: Weryfikacja zasad wymiarowania zbiorników retencyjnych ścieków deszczowych w Polsce, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, nr 4, 2009, s. 14-21.
15. Kotowski A.: Podstawy wymiarowania bocznych przelewów burzowych z rurą dławiającą, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998.
16. Kotowski A.: Grundlagen der hydraulischen Dimensionierung der Regenueberlaeu-fe mit gedrosseltem Ablauf aus der beruhigten Kammer hinter dem seitlichen Streichwehr, *Das Gas und Wasserfach – Wasser/Abwasser*, Jg. 141, nr 8, 2000, s. 516-526.
17. Kotowski A.: Verfahren und Beispiel der Dimensionierung des verbesserten Rege-nueberlaufs mit Drosselrohr in Mischwasserkanalisation, *Das Gas und Wasserfach – Wasser/Abwasser*, Jg. 142, nr 12, 2001, s. 843-850.
18. Kotowski A., Wartalski J., Wójtowicz P.: Dimensioning of non-conventional storm overflows with the new method of throttling the outflow to the treatment plant, Wydawn. Taylor and Francis, London 2007, s. 165-173.
19. Kotowski A., Szewczyk H.: Hydraulische Berechnungen von Leichtflüssigkeitsab-scheidern, *Korespondenz Abwasser/Abfall*, Jg. 54, nr 3, 2007, s. 260-267.
20. Kotowski A., Szewczyk H.: Hydraulics of light liquid separators with overflows inside bypasses, *Chemical and Process Engineering*, vol. 29, nr 4, 2008, s. 1037-1051.
21. Kotowski A., Szewczyk H.: Verfahren und Beispiel zur Dimensionierung eines Leichtflüssigkeits-abscheiders mit innerem Umlaufkanal, *Das Gas und Wasserfach –Wasser/Abwasser*, Jg. 150, nr 6, 2009, s. 467-473.
22. Kotowski A., Wójtowicz P.: Analysis of hydraulic parameters of cylindrical vortex regulators, *Environment Protection Engineering*, vol. 34, nr 2, 2008, s. 43-56.
23. Wójtowicz P., Kotowski A.: Badania modelowe cylindrycznych regulatorów hydro-dynamicznych, *Ochrona Środowiska*, nr 2, 2008, s. 35-41.
24. Wójtowicz P., Kotowski A.: Influence of design parameters on throttling efficiency of cylindrical and conical vortex valves, *Journal of Hydraulic Research*, vol. 47, nr 5, 2009, s. 559-565.
25. 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.
26. Kotowski A., Kaźmierczak B., Dancewicz A.: Modelowanie opadów do wymiaro-wania kanalizacji, Wydawn. Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Instytut Podstawowych Problemów Techniki. Studia z zakresu inżynierii sanitarnej, War-szawa 2010.
27. Bogdanowicz E., Stachy J.: Maksymalne opady deszczu w Polsce. Charakterystyki projektowe, Materiały badawcze, Seria: Hydrologia i Oceanologia, nr 23, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa 1998.
28. Licznar P.: Generatory syntetycznych szeregów opadowych do modelowania sieci kanalizacji deszczowych i ogólnospławnych, Wydawn. Uniwersytetu Przyrodnicze-go we Wrocławiu, Wrocław 2009.
29. Schmitt T.G.: Kommentar zum Arbeitsblatt A 118 „Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen“, DWA, Hennef 2000, Wydawn. Seidel-Przywecki, Warszawa 2007.

30. Chomicz K.: Ulewy i deszcze nawalne w Polsce, Wiadomości Służby Hydrologicznej, PIHM, t. 2, z. 3, Warszawa 1951.
31. Stachy J. (red.): Atlas hydrologiczny Polski, t. I, Wydawn. Geologiczne, Warszawa 1987.

PHYSICAL MODELING OF PRECIPITATION FOR THE PURPOSES OF SEWAGE SYSTEMS DIMENSIONING

S u m m a r y

The basis of this work were pluviographic measurements from IMGW meteorological station in Wrocław-Strachowice for the period of 1960÷2009. For choosing pluviograms of intensive rainfalls and for statistic analysis of the frequency of their appearance, the own criterion of precipitation amount was accepted. It allowed to choose several most intensive precipitations for each year. For 50-years period of observations the total amount of 514 rainfalls were singled out. Afterwards they were ranged into 16 time intervals according to their periods of lasting (from 5 minutes to 72 hours). On this basis the physical models were formulated for the maximal precipitation amount for the purposes of designing the drainage of Wrocław area.

Złożono w Oficynie Wydawniczej w kwietniu 2010 r.