

Paweł Licznar, Janusz Łomotowski

Analiza średnich natężeń deszczów miarodajnych we Wrocławiu

W ostatnich latach obserwuje się znaczny wzrost zainteresowania racjonalnym odprowadzaniem wód deszczowych, co wynika z obniżania się zwierciadła wód gruntowych na terenach zurbanizowanych, a także z problemów związanych z eksploatacją systemów kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej [1]. Wiele czynników (zmiana stylu życia, rozwój motoryzacji) wpływa znacząco na infrastrukturę, zwłaszcza dużych miast. Zauważalna jest potrzeba budowy nowych dróg, w tym autostrad, a także modernizacji starych. Przyrost powierzchni uszczelnionych można najłatwiej zauważyć przy nowych dużych centrach handlowych. Negatywnym skutkiem uszczelniania powierzchni terenu jest wzrost prędkości spływu powierzchniowego wód opadowych do odbiornika, co – przy intensywnych opadach atmosferycznych i roztopach – prowadzi do wzrostu stanów wód (zagrożenie powodzią), a także do zwiększenia ładunków zanieczyszczeń wprowadzanych wraz z wodami opadowymi do wód powierzchniowych [1].

Podstawowym zadaniem, jakie musi rozwiązać projektant systemu kanalizacji, jest ustalenie natężenia deszczu miarodajnego. Na obserwowany przepływ ścieków opadowych w sieci kanałów ma wpływ intensywność opadów atmosferycznych, procesy zachodzące w zlewni (przekształcające warstwę opadu atmosferycznego w spływ powierzchniowy) oraz transformacja przepływu w samej sieci kanalizacyjnej [2–4].

W Polsce od dawna problem analizy opadów o dużej wydajności był właściwie rozumiany i doceniany [5]. Do pierwszych opracowań dla obszaru Polski istotnych w tym zakresie należy zaliczyć prace wykonane jeszcze w okresie międzywojennym przez prof. Adama Różańskiego i prof. Karola Pomianowskiego [6]. W Niemczech już w latach 30. ub. wieku rozpoczęto program budowy autostrad i dróg ekspresowych. Powstały nowe lotniska niezbędne dla rozrastającej się Luftwaffe. Projektowanie odwodnień tych obiektów było istotnym wyzwaniem inżynierskim, na które odpowiedzią były wytyczne opublikowane przez F. Reinholda w 1940 r. [7], w których podano wartości natężenia opadów przekraczanych raz w roku dla deszczu 15-minutowego (q_{15}) dla całych Niemiec oraz dla okupowanej Warszawy ($q_{15}=84 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$). Po wojnie natężenia te były stosowane do projektowania kanalizacji dla miast polskich (Wrocław, Opole, Elbląg, Gdańsk, Szczecin), które po zmianie granic znalazły się w obrębie Polski. Natężenia opadów przekraczanych raz w roku dla

deszczu 15-minutowego dla tych miast wynosiły odpowiednio $112 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$, $117 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$, $112 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$, $93 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$ i $87 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$. W wytycznych Reinholda została podana formuła wiążąca q_{15} z natężeniami innych deszczów miarodajnych o odmiennych czasach trwania i prawdopodobieństwach przekroczenia [7]:

$$q = q_{15} \frac{38}{t+9} \left(\frac{1}{\sqrt[n]{n}} - 0,369 \right) \quad (1)$$

w której:

q – natężenie deszczu miarodajnego o prawdopodobieństwie n i czasie trwania t , $\text{dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$

q_{15} – natężenie deszczu 15-minutowego o prawdopodobieństwie 100% ($c=1$ rok), $\text{dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$

t – czas trwania deszczu, min

$n=1/c$ – prawdopodobieństwo pojawiania się deszczu wyrażone liczbą dziesiętną (dla $p=20\%$ $n=1/5=0,2$),–

Bardziej szczegółowe opracowania o charakterze lokalnym zostały przeprowadzone przez prof. Wacława Błaszczyka dla Warszawy i prof. Juliana Wołoszyna dla Wrocławia. W swoich badaniach Błaszczyk bazował na 67-letnim zbiorze obserwacji deszczów w Warszawie z lat 1837–1959. Błaszczyk do opisu natężenia deszczów miarodajnych adaptował wzór rosyjskiego hydrologa Gorbaczewa i ustalił – stosowany powszechnie w Polsce – związek pomiędzy natężeniem deszczu, prawdopodobieństwem jego pojawiania się i czasem trwania [2,3,8] (wzoru tego nie należy stosować dla miejscowości podgórskich i górskich):

$$q + \frac{470\sqrt[3]{c}}{t^{0,67}} \quad (2)$$

Badania przeprowadzone w latach 60. ubiegłego wieku przez Wołoszyna zaowocowały opracowaniem wzoru na obliczanie natężeń deszczu miarodajnego dla Wrocławia oraz metody ich transformacji dla innych obszarów Dolnego Śląska. Na podstawie analizy bogatego materiału z obserwacji pluwiograficznych we Wrocławiu z 42 lat (1898–1960) Wołoszyn ustalił, że natężenie deszczu (J_p , mm/min) w funkcji czasu jego trwania (t , min) i prawdopodobieństwa pojawiania się (p , %) przedstawia jednorodny wzór w postaci [9,10]:

$$J_p = \frac{4,326(5-p)}{p^{0,6051}} + 28,056}{t+4} + (0,0427 - 0,00025p) \quad (3)$$

Wzór ten Wołoszyn zalecał dla krótkotrwałych deszczów burzowych, których czas trwania nie był dłuższy od:

$$t_p = 187,063\sqrt[3]{a_p} - 4 \quad (4)$$

Przy dłuższych czasach trwania deszczów, zwanych deszczami przewlekłymi, ich natężenie opisał wzorem:

$$J_p = 0,0107\sqrt{a_p} + c_p - 0,0000286t \quad (5)$$

Najwyższa suma opadu ciągłego wypada dla deszczów o czasie trwania:

$$t_{\text{maks}} = \frac{0,0107\sqrt{a_p} + c_p}{0,0000572} \quad (6)$$

Współczynniki a_p i c_p we wzorach (4), (5) i (6) są funkcjami prawdopodobieństwa (p , %) w postaci:

$$a_p = \frac{4,326(5 - p)}{p^{0,6051}} + 28,056 \quad (7)$$

$$c_p = 0,0427 - 0,00025p \quad (8)$$

W Polsce brakuje pozycji o randze dorównującej szczegółowością, a zarazem możliwością szerokiego praktycznego stosowania, opracowanemu w Niemczech atlasowi danych o opadach KOSTRA [11]. Należy przy tym zgodzić się z opinią Bogdanowicz i Stachy'ego, iż wynika to z faktu, że dla wielu badaczy problem ten był mało atrakcyjny, gdyż nie wynikał z programów międzynarodowych, a ponadto osiągnięcie sukcesu było uwarunkowane zgromadzeniem obszernego materiału wyjściowego drogą żmudnego przetwarzania danych pluwiograficznych [5]. Zaległości te próbowano częściowo nadrobić przy opracowywaniu „Atlasu hydrologicznego Polski”, który zawiera 12 map izohiet maksymalnych opadów, wykreślonych dla czasów trwania 15 min, 30 min, 60 min i 120 min oraz dla prawdopodobieństw 1%, 10% i 50% [12]. W opracowaniu tym – co warto podkreślić – nie oparto się na analizie natężeń średnich opadów, ale z pluwiogramów pochodzących ze 121 punktów w Polsce odczytano wydajności maksymalne dla czasów 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 60 min i 120 min. Wydajności te, zestawione w ciągu malejącej, pozwoliły na ustalenie zależności między wydajnością opadu (P_{maks}), czasem jego trwania (t) i prawdopodobieństwem przewyższenia (p), o przyjętej ogólnej postaci [5]:

$$P_{\text{maks}}(t,p) = \frac{A - Byp}{t^n} \quad (9)$$

w której:

A , B , n – współczynniki wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów, –
oraz:

$$y_p = -\ln[-\ln(1 - p)] \quad (10)$$

Słabą stroną tego opracowania jest krótki czas obserwacji wykorzystanych do obliczeń (dane z lat 1966–1975) i ograniczenie się do deszczów trwających nie dłużej niż 2 godz. Wątpliwości może także budzić sposób prezentacji największych opadów za pomocą izohiet.

Użyteczna dla praktyki inżynierskiej jest monografia Bogdanowicz i Stachy'ego, dotycząca maksymalnych wydajności opadów [5]. Po przeanalizowaniu danych pluwiograficznych z lat 1960–1990 z 20 stacji meteorologicznych w kraju, badacze ci zaproponowali nowy system obliczania maksymalnych opadów prawdopodobnych według zależności [5]:

$$P_{\text{maks}} = 1,42t_d^{0,33} + \alpha(-\ln p)^{0,548} \quad (11)$$

w której:

t_d – czas trwania deszczu, min

α – parametr położenia i skali, mm

Dla obszaru regionu północno-zachodniego (ograniczonego w przybliżeniu linią Zielona Góra–Poznań–Olsztyn) parametr $\alpha = 3,92\ln(t_d+1) - 1,662$ dla deszczów o $t_d = 5 \div 30$ min, $\alpha = 8,944\ln(t_d) - 18,6$ dla deszczów o $t_d = 30 \div 60$ min, natomiast dla reszty obszaru kraju (z wyjątkiem Sudetów i Karpat) $\alpha = 4,693\ln(t_d+1) - 1,249$ dla deszczów o $t_d = 5 \div 120$ min. Dla deszczów o czasie trwania 2 godz. $< t_d < 12$ godz. w całej Polsce, z wyjątkiem Sudetów i Karpat, $\alpha = 2,223\ln(t_d+1) + 10,639$ [5]. Opracowanie to, pomimo dużej wartości użytkowej oraz metodycznej i poznawczej, nie jest jednak pełne i końcowe. Jak przyznają sami autorzy, duża pracochłonność przygotowania danych zmusiła ich do zawężenia analizy do 20 stacji i całkowitego pominięcia obszarów górskich [5].

Zakreślony stan badań nad metodami określania deszczów miarodajnych dla potrzeb projektowania systemów odwodnienia skłania do podjęcia badań nawet o charakterze lokalnym, opartych na nowszym materiale obserwacyjnym, których wyniki mogłyby z jednej strony być bezpośrednio stosowane w praktyce inżynierskiej, a zarazem dałyby przesłanki do poprawy metodyki analizy zagadnienia. Badania takie są istotne zwłaszcza w obliczu zmian klimatycznych, wywołanych przez zjawisko globalnego ocieplenia oraz lokalnych zmian wywołanych zaburzeniem termiki i składu powietrza na obszarach zurbanizowanych. Mając to na uwadze podjęto badania, których celem była identyfikacja deszczów miarodajnych i określenie ich parametrów na podstawie obecnych zapisów pluwiograficznych z obszaru Wrocławia, na drodze klasycznej analizy średnich natężeń opadów.

Materiał i metody

Materiałem badawczym użytym w pracy były zapisy pluwiograficzne z Obserwatorium Agro- i Hydrometeorologii Akademii Rolniczej we Wrocławiu (Swojec) z wielolecia 1975–2002. Stacja ta mieści się obecnie w granicach Wrocławia, na jego północno-wschodnim skraju, na wysokości 122,88 m n.p.m. (dł. geogr. 17°07' E, szer. geogr. 51°07' N). Należy podkreślić, że stacja ta kontynuuje badania Katedry Meteorologii Wyższej Szkoły Rolniczej we Wrocławiu, z której wcześniejszych opracowań korzystał Wołoszyn [9,10], a pomimo stałej rozbudowy miasta jej otoczenie pozostaje niezmiennione. Są to pola uprawne oraz niska zabudowa należąca do Zakładu Doświadczalnego Akademii Rolniczej we Wrocławiu, co pozwala na traktowanie analizowanego materiału badawczego za jednorodny i niezakłócony przez czynniki zewnętrzne.

Ciągłe pomiary ombrometryczne były w analizowanym okresie prowadzone przy wykorzystaniu klasycznego pluwiografu pływakowego. Obecnie stacja ta po modernizacji pracuje jako stacja w pełni automatyczna i jest wyposażona w nowoczesny deszczomierz Young 52202 oraz deszczomierz Hellmana, za pomocą którego mierzone są dobowe sumy opadów. Niestety dla analizowanego wielolecia nie dysponowano zapisami pluwiograficznymi z 1976 r., 1983 r., 1985 r., 1988 r. i 1993 r.

W pracy zastosowano klasyczną metodę statystyczną, opartą na analizie średnich wartości natężeń deszczów, którą stosował Błaszczyk [2,3,8], przy czym powstaje tu problem kryterium deszczu, który należy poddać analizie. W wielu wcześniejszych pracach ich autorzy nie mieli z tym zagadnieniem problemu, gdyż dysponowali wynikami z deszczomierzy Hellmana z zanotowanymi czasami początku i końca opadu. Niestety w literaturze krajowej nie ma ścisłych wskazówek dotyczących identyfikacji poszczególnych deszczów z ciągłych rejestracji opadów na paskach z pluwiografu. Na przykład Wołoszyn w swojej analizie wyróżniał deszcze elementarne „podług wyraźnych załomów na wykresach pluwiogramów” [9].

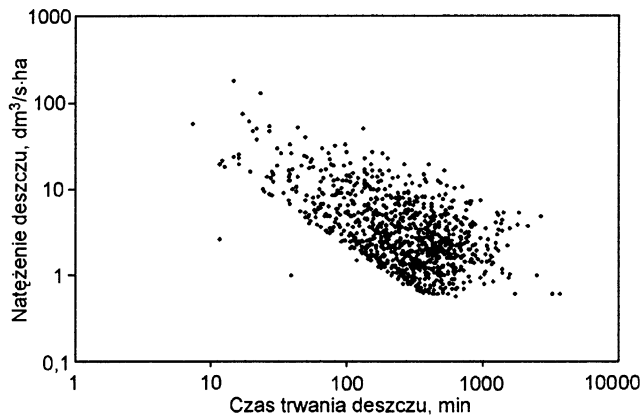
Postanowiono zatem zaproponować własne kryterium do identyfikacji poszczególnych opadów, które oparto na wcześniejszych doświadczeniach zdobytych przez Wischmeiera i Smitha [13], którzy w skali poletek doświadczalnych w trakcie opadu deszczu prowadzili prace nad zjawiskiem formowania się powierzchniowego spływu deszczowego i erozji gleby. Przyjęto, że jako deszcz traktowany będzie opad, którego warstwa osiąga co najmniej 1,3 mm w czasie 6 godz. W wypadku gdy podczas deszczu nastąpiła przerwa dłuższa niż 6 godz. lub w tym czasie wysokość opadu była mniejsza niż 1,3 mm, takie opady rozdzielono i traktowano jako dwa osobne. W tabeli 1 podano liczbę deszczów zidentyfikowanych w oparciu o to kryterium w poszczególnych latach. W wieloleciu 1975–2002 wyodrębniono łącznie 959 opadów.

Tabela 1. Liczba zidentyfikowanych deszczów w poszczególnych latach

Rok	Liczba deszczów	Rok	Liczba deszczów
1975	49	1991	42
1977	53	1992	21
1978	51	1994	41
1979	40	1995	41
1980	46	1996	46
1981	46	1997	31
1982	24	1998	37
1984	42	1999	38
1986	54	2000	34
1987	44	2001	57
1989	39	2002	43
1990	39	-	-

W następnym etapie prac wykonano zbiorcze zestawienie deszczów z wielolecia 1975–2002 według malejących natężeń. W zestawieniu tym określono także kolejność deszczów o czasach trwania 5 min, 10 min, 15 min, 20 min, 30 min, 45 min, 60 min, 90 min, 120 min i 180 min. Sporządzono wykres zależności średnich natężeń deszczów w funkcji czasów ich trwania w skali logarytmicznej (rys. 1).

Na wykresie tym dokonano identyfikacji miarodajnych natężeń deszczów dla poszczególnych częstości ich występowania i różnych czasów trwania. W celu przyjęcia miarodajnych natężeń deszczów dla poszczególnych częstości w każdym pionie czasu w zakresie od 5 min do 180 min wyeliminowano odpowiednią liczbę natężeń wyższych. Dla prawdopodobieństwa $p=5\%$ ($c=20$ lat), przy cyklu obserwacji z 23 lat, wartości natężenia miarodajnego przyjęto na poziomie $(5/100:23 \approx 1)$ pierwszego punktu, licząc od góry w poszczególnych pionach czasu. Dla prawdopodobieństwa 10%



Rys. 1. Średnie natężenia deszczów w zależności od czasu ich trwania, zanotowane na stacji Wrocław–Swojec w wieloleciu 1975–2002

wartości natężenia deszczu miarodajnego przyjęto na poziomie 2 punktu, licząc od góry w poszczególnych pionach czasu $(10/100:23 \approx 2)$. Analogicznie dla prawdopodobieństw 20%, 50% i 100% przyjęto wartości natężeń deszczów miarodajnych w poszczególnych pionach czasu na poziomie odpowiednio 5., 12. i 23. punktu, licząc od góry.

Tak zidentyfikowane wartości natężeń deszczów dla poszczególnych wartości prawdopodobieństw posłużyły do opracowania związków funkcyjnych $q=f(t)$. Związki te opracowano dla przyjętych pięciu wzorów:

$$q = \frac{a}{(t+b)^n} + c \quad (12)$$

$$q = \frac{a}{t^n} + c \quad (13)$$

$$q = \frac{a}{t+b} + c \quad (14)$$

$$q = \frac{a}{t^n} \quad (15)$$

$$q = \frac{a}{t^{0,667}} \quad (16)$$

Wzory (12) i (13) we wcześniejszych opracowaniach nie były stosowane, z uwagi na problem wyznaczenia wartości współczynników empirycznych. Model (14) Wołoszyn uznał za najodpowiedniejszy dla warunków wrocławskich. Wzór (15), nazywany także modelem Lindley'a, był – z uwagi na swoją prostotę – stosowany przez wielu autorów [8]. Jego uproszczona forma (16), o ustalonej wartości parametru $n=0,667$, była stosowana we wzorze Błaszczyka. Wartości parametrów dla wszystkich modeli zostały wyestymowane przy wykorzystaniu programu Mathcad (wersja 11), a jako miarę ich dopasowania przyjęto obliczone wartości współczynnika korelacji.

Dyskusja wyników

Przeprowadzona analiza wykazała, że czas większości zanotowanych deszczów był dłuższy od 100 min, a ich średnie natężenie było przeważnie niższe od $10 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$ (rys. 1). Deszcze te nie miały praktycznego znaczenia dla dalszej analizy deszczu maksymalnych. W obrębie deszczów o dużych natężeniach, które stanowiły materiał do dalszych analiz, stwierdzono jedynie dwa opady o natężeniu przekraczającym $100 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$. Były to opady z 8 czerwca 1978 r. o natężeniu

średnim 178,2 dm³/s-ha (1,069 mm/min) oraz z 30 lipca 1996 r. o natężeniu średnim 127,1 dm³/s-ha (0,762 mm/min). W obydwu wypadkach były to krótkotrwałe opady burzowe o czasie trwania w zakresie 15÷24 min i znacznej wysokości (16÷18 mm).

Wyniki prac na tym etapie należy uznać za zbliżone do uzyskanych przez innych autorów, jednak otrzymane wartości były niższe od podawanych przez tych autorów. Wołoszyn badając opady z wielolecia 1898–1960 stwierdził, że najwyższe średnie natężenie deszczu o czasie trwania w przedziale 0÷5 min wynosiło 3,620 mm/min (stacja WSR we Wrocławiu, 1955 r.). Do wartości tej należy jednak podchodzić z rezerwą, gdyż rzeczywisty odczyt z pluwiografu z rozdzielczością 5 min jest bardzo trudny. W myśl sformułowania Wołoszyna [9], że deszcze elementarne wyróżniał on „podług wyraźnych załomów na wykresach pluwiogramów”, wartość 3,620 mm/min należy raczej kojarzyć z maksymalnym natężeniem chwilowym, a nie jego całościowym natężeniem średnim. W obrębie obecnie analizowanych danych, według przyjętego kryterium deszczu, najkrótszy wyodrębniony deszcz trwał niewiele ponad 7 min. Dla deszczów o dłuższych czasach trwania Wołoszyn notował już znacznie niższe wartości natężeń. Dla przedziału czasu trwania deszczu od 10 min do 20 min obliczył on najwyższe natężenie deszczu dla danych ze stacji WSR w 1955 r., tj. 1,900 mm/min. Jednakże zaprezentowane przez Wołoszyna [9] maksymalne natężenia deszczów w tym zakresie czasów trwania dla całego analizowanego wielolecia zwykle nie przekraczały lub oscylowały wokół wartości 1 mm/min.

Błaszczyk [3] odnotował na poziomie 12. deszczu w swoim zestawieniu natężenie 178,2 dm³/s-ha, przy czym maksymalne natężenie wynosiło aż 438,8 dm³/s-ha. Błaszczyk prowadził swoje badania na 67-letnim ciągu pomiarowym (lata 1837–1959), dla którego nie ma danych o urządzeniach i sposobie prowadzenia obserwacji. Maksymalne średnie natężenie deszczu zaobserwowano 17 sierpnia 1916 r. i zapewne nie było ono zmierzone przy pomocy pluwiografu pływakowego, ale znacznie prostszego deszczomierza Hellmana.

Wyznaczone parametry dla poszczególnych modeli opisanych równaniami od (12) do (16) zestawiono w tabeli 2.

Natężenia deszczu obliczone ze wzoru (12), po uwzględnieniu współczynników empirycznych, najlepiej korelowały z danymi pomiarowymi. Wartości współczynników korelacji (R) dla modelu (12) mieściły się w zakresie od 0,933 dla deszczów o prawdopodobieństwie 10% do 0,994 dla prawdopodobieństwa 50%. Podobnie wysokie wartości współczynników korelacji zanotowano dla modeli opisanych wzorami (13) i (14), zaś znacznie niższe dla prostszych modeli (15) i (16). Najniższe współczynniki korelacji uzyskano dla formuły zbliżonej do wzoru Błaszczyka (2), gdy z góry ustalono wykładnik potęgowy $n=0,667$.

Zastosowanie prostych modeli było uzasadnione w początkowym okresie badania natężeń deszczów. Dokonana analiza wykazała, że uproszczenie modelu zmniejsza jego wartość prognostyczną. Prostota związków funkcyjnych ustalonych 40 lat temu była uzasadniona, gdyż w tamtym czasie nie było technik komputerowych, pozwalających ustalić parametry empiryczne złożonych zależności funkcyjnych. Obecnie bariera ta nie istnieje, gdyż dostęp do elektronicznych technik obliczeniowych jest powszechny.

Wartości natężeń deszczów miarodajnych dla różnych czasów trwania i prawdopodobieństw przewyższenia, obliczone według opracowanych własnych formuł oraz wzorów Wołoszyna (3), (7) i (8) i Błaszczyka (2) przedstawiono w tabeli 3. Z danych tych wynika, że wartości natężeń deszczów miarodajnych, wyznaczone z opracowanych własnych związków, są znacznie mniejsze od wyliczonych ze wzorów Wołoszyna i Błaszczyka. Wyjątkiem są jedynie natężenia opadów dla $p=100\%$ i czasów dłuższych od 20 min, w wypadku których opracowana formuła daje wyniki równe lub większe od wynikających ze wzorów Wołoszyna, ale nadal niższe od sugerowanych wg wzoru Błaszczyka. Szczególnie duże rozbieżności natężeń deszczów zanotowano dla krótkich czasów ich trwania.

Przykładowo, dla prawdopodobieństwa 100% i czasu trwania opadu 5 min jego natężenie wyznaczone z opracowanej zależności dla stacji Wrocław–Swojec wynosiło 26 dm³/s-ha i było ponad 6-krotnie mniejsze od wartości wg wzoru Błaszczyka (160 dm³/s-ha) oraz 2-krotnie niższe od wartości wg wzoru Wołoszyna (53 dm³/s-ha). Rozbieżności dla mniejszych

Tabela 2. Wartości parametrów modeli oraz współczynników korelacji

Model	Prawdopodobieństwo, %				
	5	10	20	50	100
$q = \frac{a}{(t+b)^n} + c$	a = 1,553·10 ³⁴ b = 276,814 c = 32,779 n = 13,047 R = 0,942	a = 1,053·10 ³⁰ b = 231,372 c = 24,102 n = 11,779 R = 0,933	a = 3,982·10 ¹² b = 166,057 c = 16,908 n = 4,92 R = 0,971	a = 89,109 b = -1,28 c = -21,319 n = 0,185 R = 0,994	a = 466,128 b = 57,947 c = -1,371 n = 0,683 R = 0,987
$q = \frac{a}{t+b} + c$	a = 4359 b = 16,884 c = 0,173 R = 0,927	a = 2612 b = 14,183 c = 3,695 R = 0,923	a = 1847 b = 31,912 c = 8,084 R = 0,970	a = 661,152 b = 12,882 c = 10,677 R = 0,991	a = 1997 b = 78,006 c = 2,02 R = 0,987
$q = \frac{a}{t^n} + c$	a = 505,913 c = -171,05 n = 0,189 R = 0,909	a = 481,491 c = -73,27 n = 0,251 R = 0,909	a = 2,224·10 ⁶ c = -2,224·10 ⁶ n = 5,487·10 ⁻⁶ R = 0,960	a = 88,035 c = -8,504 n = 0,271 R = 0,994	a = 3,162·10 ⁶ c = -3,162·10 ⁶ n = 1,509·10 ⁻⁶ R = 0,966
$q = \frac{a}{t^n}$	a = 563,8 n = 0,5718 R = 0,885	a = 371,22 n = 0,5538 R = 0,895	a = 118,22 n = 0,3584 R = 0,934	a = 89,94 n = 0,3653 R = 0,992	a = 47,492 n = 0,2755 R = 0,927
$q = \frac{a}{t^{0,667}}$	a = 695,137 R = 0,872	a = 481,491 R = 0,882	a = 253,773 R = 0,883	a = 180,279 R = 0,974	a = 115,67 R = 0,839

Tabela 3. Natężenia deszczów według własnych formuł oraz wzorów Wołoszyna [9,10] i Błaszczyka [2,3,8]

Czas trwania deszczu min	Natężenie deszczu, $\text{dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$														
	wg autorów					wg Wołoszyna					wg Błaszczyka				
	prawdopodobieństwo, %														
	5	10	20	50	100	5	10	20	50	100	5	10	20	50	100
5	201	140	58	49	26	527	427	330	187	53	434	345	273	201	160
10	167	115	53	38	25	341	277	214	122	35	273	217	172	127	100
15	140	95	48	34	24	253	206	159	91	27	208	165	131	96	77
20	118	80	44	31	22	202	164	128	73	22	171	136	108	80	63
30	88	60	38	27	21	144	118	92	53	16	131	104	82	61	48
45	63	42	31	23	18	102	84	66	38	12	100	79	63	46	37
60	49	34	27	21	17	80	66	52	31	10	82	65	52	38	30
90	38	27	23	18	14	57	47	37	22	8	63	50	39	29	23
120	35	25	20	16	12	45	37	30	18	7	52	41	33	24	19
180	33	24	18	13	10	32	27	22	14	5	39	31	25	18	14

prawdopodobieństw przewyższenia opadów i dłuższych czasów były już mniejsze, na przykład dla deszczu o czasie trwania 10 min i prawdopodobieństwie 10% natężenie opadu wg formuły Błaszczyka wyniosło $217 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$ i było prawie 2-krotnie większe od obliczonego wg własnego wzoru ($115 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{ha}$).

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza natężeń deszczów z wielolecia 1975–2002 we Wrocławiu, przy wykorzystaniu metody natężeń średnich, pozwoliła ustalić związki funkcyjne pomiędzy natężeniem deszczów miarodajnych a czasem ich trwania dla wartości prawdopodobieństw przewyższenia 10%, 20%, 50% i 100%, przy czym najlepiej związek ten opisywało ogólne równanie hiperboli.

Uzyskano dużą rozbieżność pomiędzy wartościami natężeń deszczów miarodajnych, wyznaczonych z opracowanych własnych związków, a wartościami wyliczonymi z formuł podanych przez Wołoszyna [9,10] i Błaszczyka [2,3,8]. Przyczyn tego można upatrywać w niejednorodności metod ustalania średnich wartości natężeń deszczów poddawanych analizie. Jest bardzo prawdopodobne, że Wołoszyn i Błaszczyk ustalili swoje wzory analizując zbiór natężeń deszczów, w którym znalazły się zarówno maksymalne chwilowe natężenia, jak i wartości średnie. Wynika to z faktu, że przy opracowaniu materiału badawczego nie przyjęto kryterium deszczu, na podstawie którego porządkowano materiał badawczy.

Praca została wykonana w ramach projektu badawczego KBN nr 5P06302324 „Nowe sposoby pomiaru i rejestracji opadów atmosferycznych oraz przetwarzania uzyskanych danych”.

Autorzy dziękują Obserwatorium Agro- i Hydrometeorologii Akademii Rolniczej we Wrocławiu za udostępnienie materiałów z obserwacji pluwiograficznych na potrzeby niniejszej pracy. Dr inż. Paweł Licznar dziękuje ponadto Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej za wsparcie badań w ramach stypendium krajowego dla młodych naukowców.

LITERATURA

1. J. ŁOMOTOWSKI, E. BURSZA-ADAMIAK, E. KOZŁOWSKA, P. LICZNAK: Wybrane zagadnienia projektowania kanalizacji deszczowej. Mat. konf. V Zjazd Kanalizatorów Polskich – POLKAN'03, PZITS, Łódź 2003, ss. 39–54.
2. W. BŁASZCZYK, M. ROMAN, H. STAMATELLO: Kanalizacja. Tom I. Arkady, Warszawa 1974.
3. W. BŁASZCZYK, H. STAMATELLO, P. BŁASZCZYK: Kanalizacja. Tom I. Sieci i pompownie. Arkady, Warszawa 1983.
4. R. EDEL: Odwodnienie dróg. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2002.
5. E. BOGDANOWICZ, J. STACHÝ: Maksymalne opady deszczu w Polsce. Charakterystyki projektowe. Materiały Badawcze, Seria: Hydrologia i Oceanologia, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa 1998.
6. K. DĘBSKI: Hydrologia kontynentalna. Część II. Wydawnictwa Komunikacyjne, Warszawa 1959.
7. F. REINHOLD: Regenspenden in Deutschland. Archiv. für Wasserwirtschaft, 1940, 56.
8. W. BŁASZCZYK: Projektowanie sieci kanalizacyjnych. Arkady, Warszawa 1965.
9. J. WOŁOSZYN: Probabilistyczna metoda obliczania natężenia deszczów na przykładzie Wrocławia. Wiad. Śl. Hydrol., 1964, z. 58.
10. J. WOŁOSZYN: Transponowanie natężenia i czasu trwania deszczu ze stacji centralnej do rejonów nie zbadanych na Dolnym Śląsku. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 1966, nr 7, ss. 23–30.
11. H. BARTELS, G. MALITZ, S. ASMUS, F. M. ALBRECHT, B. DIETZER, T. GÜNTHER, H. ERTEL: Starkniederschlagshöhen für Deutschland. KOSTRA. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes. Offenbach am Main 1997.
12. Atlas hydrologiczny Polski. Praca zbiorowa [Red. J. STACHÝ]. Wyd. Geol., Warszawa 1986 i 1987.
13. W. H. WISCHMEIER, D. D. SMITH: Predicting Rainfall-Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning. Agricultural Handbook No. 537, ARS, Washington 1978.

Licznar, P., Łomotowski, J. Analysis of Average Design Storm Intensity for the City of Wrocław. *Ochrona Środowiska* 2005, Vol. 27, No. 1, pp. 29–34.

Abstract: The analysis covered rainfall intensities recorded at the Agro- and Hydrometeorological Station, Wrocław University of Agriculture, Wrocław–Swojec in the time span of 1975 to 2002. On the basis of the adopted criteria, rain events were selected and the functional relations between average

rainfall intensity, duration and exceeding probability were established. The results were compared with those obtained with the Wołoszyn model and Błaszczyk equation. It was demonstrated that the formulas derived by Wołoszyn and Błaszczyk were not based on the analysis of average rainfall intensities; they involved analyses of both maximal temporary and maximal average rainfall intensities.

Keywords: Design storm, average rainfall intensity.