

Paweł Licznar, Katarzyna Siekanowicz-Grochowina, Michał Oktawiec,
Andrzej Kotowski, Ewa Burszta-Adamiak

Empiryczna weryfikacja formuły Błaszczyka do obliczania wartości natężenia deszczu miarodajnego

Formuły opadowe typu IDF (intensity-duration-frequency), nazywane także modelami natężeń deszczów miarodajnych, są niezbędną podstawą do wymiarowania systemów odwadniania terenów. Ponadto modele te służą do sporządzania tak zwanych opadów modelowych (czyli hietogramów opadów syntetycznych) do modelowania hydrodynamicznego niezawodności działania systemów kanalizacyjnych [1–3]. Chociaż historia modeli opadów atmosferycznych sięga końca XIX wieku, to warsztat ich opracowywania nadal jest przedmiotem ustawicznego doskonalenia, a istniejące już modele dotyczące konkretnych miast są aktualizowane w oparciu o nowe dane pomiarowe [4, 5]. W wielu państwach, względnie w odniesieniu do pewnych obszarów geograficznych, sporządza się zbiorcze opracowania w formie atlasów natężeń deszczów miarodajnych [6, 7], służące jako wiarygodne źródło danych wyjściowych do projektowania systemów odwadniania.

Na tym tle zaskakiwać może powszechne stosowanie w praktyce inżynierskiej w Polsce, opublikowanej jeszcze w latach 50. zeszłego stulecia, formuły opracowanej przez prof. Wacława Błaszczyka [8]. Formuła ta jest nadal stosowana pomimo upływu czasu, znaczącej poprawy warsztatu rejestracji opadów atmosferycznych i przetwarzania jej wyników, publikowania nowszych modeli deszczów czy też świadomości zachodzących zmian klimatycznych i zróżnicowania warunków lokalnych nawet w obrębie pola opadowego Warszawy [3]. Pomimo otwartej krytyki ze strony specjalistów w zakresie modelowania opadów [1, 5, 9], formuła Błaszczyka jest nadal cytowana nie tylko w podręcznikach, ale także podawana w zaleceniach do projektowania systemów odwadniania dróg czy torowisk kolejowych. Można zaryzykować tezę, że większość funkcjonujących w Polsce pozwoleń wodnoprawnych na odprowadzanie wód opadowych do wód powierzchniowych czy podziemnych została ustalona na podstawie natężeń deszczów obliczonych według tej formuły.

Sięgając do korzeni formuły Błaszczyka trzeba się cofnąć do 1926 r., kiedy to prof. Karol Pomianowski rozpoczął realizację projektu rozbudowy i unowocześnienia

sieci kanalizacyjnej w Warszawie (projekt kanalizacji tak zwanej Wielkiej Warszawy). Na potrzeby jego realizacji Pomianowski przeanalizował lokalne zapisy intensywnych deszczów krótkotrwałych. Były to nieciągłe rejestracje z lat 1837–1891 oraz 1914–1925. Na ich podstawie przyjął związek między intensywnością (natężeniem) opadu atmosferycznego i prawdopodobieństwem jego wystąpienia przy różnych czasach trwania deszczu według ogólnej formuły w postaci [10]:

$$J_t = a/p^n \quad (1)$$

w której:

J_t – intensywność deszczu o czasie trwania t , mm/h

a – parametr zależny od czasu trwania deszczu (przy $t=15$ min, $a=220$)

n – wykładnik potęgowy

p – prawdopodobieństwo, %

Na podstawie zbioru obserwacyjnego z Warszawy, wykorzystywanego uprzednio przez Pomianowskiego (79 intensywnych deszczów), opierając się na wynikach badań Rosłońskiego i Lambora, Błaszczyk w 1954 r. zaproponował przyjęcie na terenie całej Polski następującego wzoru na natężenie deszczu miarodajnego [8]:

$$q = 470C^{1/3}/t^{0,667} \quad (2)$$

w którym:

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

C – częstość jednorazowego przekroczenia danego natężenia deszczu, lata

t – czas trwania deszczu, min

Opracowując formułę (2), Błaszczyk nawiązywał do metody zaproponowanej przez Gorbaczewa, który w swych rozważaniach oparł się na założeniu, że z meteorologicznie równoważnościowych chmur, a więc chmur formujących się przy takich samych warunkach meteorologicznych, mogą powstawać deszcze różniące się zarówno czasem trwania, jak i intensywnością/natężeniem, jednakże równoważne względem ich siły. Siłę deszczu (Δ) Gorbaczew określił w postaci zależności [11, 12]:

$$\Delta = (h\cdot i)^{1/2} \quad (3)$$

w której:

h – warstwa (wysokość) deszczu, mm

i – intensywność deszczu, mm/min, definiowana jako:

$$i = h/t \quad (4)$$

Dr hab. inż. P. Licznar, mgr inż. K. Siekanowicz-Grochowina, mgr inż. M. Oktawiec, prof. dr hab. inż. A. Kotowski: Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Wodociągów i Kanalizacji, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
pawel.licznar@pwr.edu.pl

Dr hab. inż. E. Burszta-Adamiak: Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, Zakład Infrastruktury i Techniki Sanitarnej, pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław

Z zależności (3) i (4) wynika, że intensywność deszczu może być określana na podstawie jego siły (Δ) oraz czasu trwania (t) ze wzoru:

$$i = \Delta/t^{0,5} \quad (5)$$

Wzór (5) po konwersji jednostek intensywności deszczu w mm/min na natężenie jednostkowe deszczu wyrażone w $\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{ha})$ przyjmuje postać:

$$q = 166,7\Delta/t^{0,5} \quad (6)$$

Niejasne pojęcie siły deszczu Gorbaczew łączył z charakterystyką wywoływanego przez niego spływu powierzchniowego (tab. 1), a ponadto przyjął zależność wiążącą wielkość Δ z czasem (częstością) w latach (C) jej jednorazowego przekroczenia:

$$\Delta = \mu C^{1/3} \quad (7)$$

w której:

μ – stała ujmująca wpływ miejscowych czynników klimatycznych i fizjograficznych

Tabela 1. Empiryczna zależność siły deszczu (wydajności) od przebiegu spływu powierzchniowego [12]

Table 1. Empirical relationship between rain power (efficiency) and surface runoff characteristics [12]

Siła deszczu (Δ)	Charakterystyka spływu powierzchniowego po deszczu ulewnym
1	nie ma spływu powierzchniowego
1–3	woda spływa po powierzchniach utwardzonych
3–5	woda spływa po stokach naturalnych
5–7	tworzą się rwące potoki
7–9	woda zatapia ulice
9–12	wzbierają mniejsze rzeki
12–16	potoki przemieniają się w rzeki

Wielkość μ według Gorbaczewa można obliczać na podstawie znajomości wysokości opadu normalnego (H) (tj. wartości średniej rocznej z wielolecia), zgodnie z równaniem empirycznym [9]:

$$\mu = \alpha H^{2/3} \quad (8)$$

w którym:

α – współczynnik proporcjonalności, który według obliczeń Żaka mieści się w zakresie od 0,0253 do 0,0487, a jego sugerowane wartości wynoszą 0,0315 w rejonach północnych byłego ZSRR, 0,0384 w środkowych i 0,0440 w południowych. Gorbaczew w przypadku całego obszaru byłego ZSRR proponował stosowanie stałej wartości α równej 0,046 [11].

Na podstawie wzorów (6–8) Gorbaczew wyprowadził ogólną formułę na natężenie deszczu miarodajnego w postaci [11, 12]:

$$q = 166,7\alpha(H^2C)^{1/3}/t^{0,5} \quad (9)$$

Formuła (9), po przyjęciu współczynnika $\alpha=0,04$, stała się podstawą wzoru Błaszczyka w postaci [12]:

$$q = 6,67(H^2C)^{1/3}/t^{0,67} \quad (10)$$

w której:

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

H – średnia roczna wysokość deszczu, mm

C – częstość jednorazowego przekroczenia danego natężenia deszczu, lata

t – czas trwania deszczu, min

Wcześniej prezentowany związek między natężeniem, czasem trwania i prawdopodobieństwem w postaci (2) jest szczególnym przypadkiem wzoru (10), po przyjęciu wysokości opadu normalnego (średniej rocznej) $H=600$ mm, uznawanej dotychczas za wartość przeciętną na terenie Polski, natomiast w przypadku Warszawy Błaszczyk [8] zalecał przyjmowanie średniej rocznej wysokości opadu $H=500$ mm. Warto zauważyć, że w stosunku do wzoru (9) w formułach (2) i (10) dokonano zwiększenia wartości wykładnika potęgowego w mianowniku z 0,5 do 0,67. Wartość ta została przyjęta arbitralnie przez Błaszczyka [8] w celu uzyskania możliwie dobrego dopasowania modelu do wyznaczonych empirycznie wartości natężenia deszczu na podstawie zbioru obserwacyjnego z Warszawy.

Od samego początku teoria Gorbaczewa budziła liczne kontrowersje. Szyszkin i współpracownicy [11] podkreślali, że wartości natężenia deszczów wyznaczone na obszarze byłego ZSRR według formuły (9) zawyżały o około 20÷50% wartości rzeczywiste. Mimo to pochodny wzór Błaszczyka (10) został wdrożony do szerokiej praktyki inżynierskiej w Polsce. W „Wytycznych technicznych projektowania miejskich sieci kanalizacyjnych” z 1965 r. została zawarta jego uproszczona wersja w postaci [13]:

$$q = A/t^{0,667} \quad (11)$$

w której A jest współczynnikiem zależnym od prawdopodobieństwa (p) pojawienia się deszczu oraz średniej rocznej wysokości opadu (H) (tab. 2).

Tabela 2. Wartości współczynnika A do formuły (11) na natężenie deszczu miarodajnego [13]

Table 2. Values of coefficient A in the formula (11) for the design rainfall intensity [13]

p , %	Współczynnik A			
	$H \leq 800$ mm	$H \leq 1000$ mm	$H \leq 1200$ mm	$H \leq 1500$ mm
5	1276	1290	1300	1378
10	1013	1083	1134	1202
20	804	920	980	1025
50	592	720	750	796
100	470	572	593	627

Uproszczona formuła (11) została wprost przeniesiona do polskiej normy PN-S-02204 (Drogi samochodowe – Odwodnienie dróg) [14] i do dziś funkcjonuje w wytycznych w zakresie projektowania systemów odwadniania dróg kołowych i torowisk kolejowych. Dzieje się tak pomimo krytycznych komunikatów naukowych, kwestionujących samą metodę statystycznego opracowania formuły Błaszczyka [9] oraz wskazujących na znaczne zaniżenie estymowanych przez nią wartości natężenia deszczu miarodajnego w stosunku do wartości rzeczywistych zmierzonych z użyciem pojedynczych deszczomierzy [1, 5].

W tym stanie rzeczy konieczne jest przeprowadzenie pełnej – najlepiej ogólnopolskiej – weryfikacji wartości natężenia deszczu miarodajnego obliczanych według formuły Błaszczyka przez ich odniesienie do realnie zarejestrowanych (empirycznych) wartości natężenia deszczów o standardowych w projektowaniu częstościach (prawdopodobieństwach) występowania na sieci stacji pomiarowych w całej Polsce. Zasadne jest także znalezienie odpowiedzi na pytanie, jak duże są różnice tych wartości i czy potencjalnie różnice te mają istotny wpływ na bezpieczeństwo wymiarowania systemów odwadniania terenów zurbanizowanych w Polsce.

Cel i zakres badań

Głównym celem pracy była weryfikacja poprawności formuły Błaszczyka na podstawie pomiarów w sieci deszczomierzy na terenie całej Polski. Weryfikacja miała charakter kompleksowy i empiryczny, gdyż została przeprowadzona na przykładzie 100 stacji opadowych, na podstawie wyznaczonych rzeczywistych (obecnych) wartości natężenia deszczów przy zadanych wartościach prawdopodobieństwa przewyższenia (częstości występowania). Celem podejmowanych badań było przy tym oszacowanie rozbieżności między rzeczywistymi lokalnymi wartościami natężenia deszczów miarodajnych a ich estymatami według formuły Błaszczyka, w celu określenia ich potencjalnego wpływu na bezpieczeństwo projektowania systemów kanalizacyjnych w Polsce.

Zakres pracy obejmował porównanie estymat wartości natężenia deszczów miarodajnych obliczonych według formuły Błaszczyka z rzeczywistymi (empirycznymi) wartościami natężenia opadów atmosferycznych wyznaczonymi z obecnych zapisów ze zbioru 100 deszczomierzy, przy standardowo stosowanych w projektowaniu systemów kanalizacyjnych 4 wartościach prawdopodobieństwa występowania (PN-EN 752:2017) i czasów trwania istotnych w hydrologii miejskiej, to jest w zakresie od 5 min do 3 h.

Materiały i metody

Podstawowym materiałem badawczym użytym w pracy były zapisy maksymalnych wartości fazowych natężenia opadów atmosferycznych przy czasach ich trwania równych odpowiednio 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 45 min, 60 min, 90 min, 120 min i 180 min. Wartości te wyznaczono w ramach realizacji II etapu projektu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (POIR.01.01.01-00-1428/15) zatytułowanego „Opracowanie i wdrożenie Polskiego Atlasu Natężenia Deszczów (PANDa)”, który jest wzorowany na idei funkcjonującego już od 30 lat w Niemczech atlasu opadowego KOSTRA (Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs Auswertungen). PANDa ma zawierać modele opadowe w postaci zależności typu IDF (intensity-duration-frequency) oraz DDF (depth-duration-frequency) na obszarze całej Polski. Analogicznie jak w przypadku KOSTRA, modele opadowe w PANDa mają być w przyszłości cyklicznie aktualizowane. Dzięki temu platforma ta ma stanowić źródło aktualnej i niepodważalnej informacji o wartościach natężenia deszczów miarodajnych do projektowania oraz modelowania systemów odprowadzania i retencjonowania wód opadowych w całej Polsce.

Fazowe maksymalne natężenia deszczów wyznaczono z wykorzystaniem metody przewyższeń POT (peak-over-threshold), zalecanej obecnie w przypadku opracowywania modeli opadowych na potrzeby hydrologii miejskiej [5, 15]. Podstawą wyszukiwania największych maksymalnych natężeń opadów atmosferycznych była cyfrowa baza projektu PANDa, opracowana we współpracy z IMGW-PIB. Baza ta składa się z 30-letnich szeregów opadowych (obejmujących lata 1986–2015) z sieci 100 deszczomierzy na terenie całego kraju. Wyznaczone w wyniku analizy szeregów czasowych opadów wartości maksymalnego fazowego natężenia deszczów były weryfikowane przez konfrontację terminów ich wystąpienia z adekwatnymi zapisami synoptycznymi, charakteryzującymi chwilowe warunki do wystąpienia tych opadów. W ten sposób zagwarantowano usunięcie ze zbioru niewielkiego odsetka błędnych

rejestracji deszczomierzy, które sugerowały wystąpienie intensywnych opadów w terminach pogody bezdeszczowej według zapisów synoptycznych. Wartości maksymalnego fazowego natężenia opadów, po tym procesie kontroli (zapewnienia) jakości QA (quality assurance), były porządkowane nierosnąco w szeregi rozdzielcze. Poszczególnym elementom tego szeregu zostały przyporządkowane wartości prawdopodobieństwa przewyższenia (p , %) obliczone z zależności w postaci [5]:

$$p(m, N) = m/(N+1) \quad (12)$$

w której:

m – miejsce danego wyrazu w ciągu rozdzielczym opadów
 N – liczebność ciągu, odpowiadająca liczbie analizowanych lat ($N=30$)

W badaniach skoncentrowano uwagę na deszczach występujących ze standardowo stosowanymi w projektowaniu systemów odwadniania wartościami prawdopodobieństwa (p) równymi 10%, 20%, 50% i 100%, czyli odpowiednio częstościami ich występowania (C) wynoszącymi 10 lat, 5 lat, 2 lata i 1 rok. Analizy ograniczono do charakterystycznych czasów trwania deszczów, mieszczących się w przedziale od 5 min do 180 min. Nie analizowano czasów trwania dłuższych od 180 min, gdyż zakres czasowy formuł (2), (10) i (11) został określony przez Błaszczyka [8] jako nieprzekraczający 3 h, który dowodził przy tym, że nawet w przypadku rozbudowanych sieci kanalizacyjnych w Polsce, czas trwania deszczów miarodajnych nie przekracza zwykle 60 min. W kontraście do tego w praktyce spotyka się stosowanie formuł (2), (10) i (11) przy znacznie dłuższych czasach trwania, sięgających nawet 24 h.

Wartości empiryczne fazowego natężenia deszczów były porównywane z ich estymatami według formuły (10). W tym celu, w odniesieniu do poszczególnych stacji pomiarowych, konieczne było obliczenie wysokości opadów normalnych (H), których wartości obliczono jako średnioroczne sumy wysokości opadów zarejestrowanych przez deszczomierze Hellmanna w 30-leciu 1986–2015. Zgodność empirycznie wyznaczonych wartości jednostkowego natężenia deszczu (q_p) i ich oszacowań (q_m) według modelu Błaszczyka (10) analizowano wykorzystując współczynnik korelacji (R) oraz względny błąd resztowy (WBR) w następującej postaci:

$$WBR = \frac{\sqrt{n \left(\sum_{i=1}^n (q_{p,i} - q_{m,i})^2 \right)}}{\sum_{i=1}^n q_{p,i}} \quad (13)$$

Za miary rozbieżności pomiędzy wyznaczonymi wartościami lokalnego natężenia deszczu miarodajnego oraz ich estymatami obliczonymi według formuły Błaszczyka, przyjęto wartości pierwiastka błędu średniokwadratowego (RMSE) oraz błędu względnego (Δq):

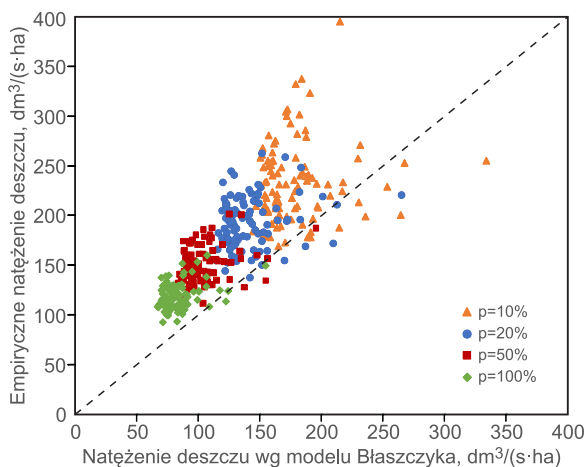
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n (q_{p,i} - q_{m,i})^2 \right)} \quad (14)$$

$$\Delta q = \frac{q_{p,i} - q_{m,i}}{q_{m,i}} 100 \quad (15)$$

We wzorach (13) i (14) n oznacza liczbę danych (porównywanych wzajemnie par wartości), zaś q_p oraz q_m oznaczają odpowiednio wartości pomierzone oraz estymaty obliczone z formuły (10).

Dyskusja wyników

Przed obliczeniem wartości natężenia deszczów według formuły Błaszczyka, ustalono wartości opadów normalnych (H), które w wieloletniu 1986–2015 wahały się w szerokim zakresie – od 484,0 mm (w Kaliszu) do 1705,5 mm (na Hali Gąsienicowej – najwyższej położony deszczomierz w zbiorze 100 analizowanych stacji – 1500 m n.p.m.). Średnia (roczna) wartość opadu normalnego w całym analizowanym zbiorze wynosiła 674,3 mm. Warto zauważyć, że była to wartość o ponad 12% większa od średniego opadu normalnego w Polsce (600 mm), przyjętego przez Błaszczyka przy wyprowadzaniu wzoru (2). Na rysunku 1 przedstawiono porównanie empirycznie wyznaczonych wartości natężenia opadów atmosferycznych i ich oszacowań według formuły Błaszczyka (10). Wykres dotyczy natężeń deszczów miarodajnych o czasie trwania 15 min i prawdopodobieństwie występowania 10%, 20%, 50% i 100%. W zbiorze 400 punktów na tym wykresie tylko kilka punktów leżało na linii o nachyleniu 1:1, natomiast zdecydowana większość punktów była ułożona powyżej, gdyż wartości empirycznych natężeń deszczów były wyraźnie większe od estymat otrzymanych z formuły Błaszczyka. Jednocześnie wraz ze zmniejszaniem wartości prawdopodobieństwa wzrastał rozrzut lokalizacji punktów. W przypadku wartości prawdopodobieństwa wynoszących 20% czy 10% – istotnych przy projektowaniu kanalizacji deszczowych między innymi w centrach miast – rozrzut ten okazał się bardzo duży, a odległości od linii o nachyleniu 1:1 skrajnie duże.



Rys. 1. Porównanie empirycznie wyznaczonych wartości natężenia deszczu i oszacowanych modelem Błaszczyka (dane ze 100 deszczomierzy, czas trwania deszczu – 15 min, prawdopodobieństwo wystąpienia – 10%, 20%, 50% i 100%)

Fig. 1. Comparison between empirical precipitation intensities and their estimates derived from Blaszczyk's model (data from 100 rain-gauges, rain duration: 15 minutes, probability of occurrence: 10, 20, 50 and 100%)

Obserwacje dotyczące wartości miarodajnego natężenia deszczów o czasie trwania 15 min były prawdziwe także przy innych czasach ich trwania, czego dowiodły statystyki zestawione w tabelach 3–6. Największa wartość współczynnika korelacji $R=0,66$, dotycząca empirycznie wyznaczonych wartości natężenia opadów i ich oszacowań z użyciem modelu Błaszczyka, obliczona w obrębie zbioru 100 deszczomierzy, dotyczyła prawdopodobieństwa 100% i czasu trwania 180 min (tab. 3). Była to bardzo mała wartość, gdyż współczynnik korelacji mniejszy od 0,85 wskazuje na niezadowalającą jakość modelu. Ponadto wartości

współczynnika korelacji malały systematycznie wraz ze zmniejszaniem się wartości prawdopodobieństwa występowania opadów i skracaniem czasu ich trwania. W przypadku istotnych w zagadnieniach hydrologii miejskiej najmniejszych wartości prawdopodobieństwa i krótkich czasów trwania opadów do 15 min, wartości współczynnika korelacji nie przekraczały 0,20. Tak niewielkie, a nawet skrajnie małe, wartości współczynnika korelacji dowiodły, że przyjęte przez Błaszczyka założenie występowania ścisłej relacji między (rocznymi) opadami normalnymi a natężeniem deszczu miarodajnego było błędne.

Tabela 3. Wartości współczynnika korelacji (R) wyznaczonych natężeń deszczów i oszacowanych modelem Błaszczyka (dane ze 100 deszczomierzy)

Table 3. Correlation coefficient (R) values for empirical rainfall intensities and their estimates calculated from Blaszczyk's model (data from 100 rain-gauges)

Czas (t), min	Współczynnik korelacji (R)			
	p=10%	p=20%	p=50%	p=100%
5	0,13	0,07	0,10	0,18
10	0,18	0,17	0,23	0,28
15	0,12	0,20	0,24	0,35
30	0,19	0,23	0,41	0,47
45	0,18	0,28	0,42	0,53
60	0,20	0,33	0,48	0,53
90	0,35	0,35	0,49	0,59
120	0,33	0,40	0,48	0,62
180	0,37	0,42	0,55	0,66

Wyniki zamieszczone w tabeli 4 potwierdzają negatywną ocenę jakości modelu Błaszczyka wynikającą z analizy wartości współczynnika korelacji. Wartości względnego średniokwadratowego błęd resztowego (WBR) empirycznie wyznaczonych wartości natężenia deszczów i ich oszacowań z użyciem wzoru (10) były większe od 25% w przypadku zdecydowanej większości kombinacji wartości prawdopodobieństwa i czasów trwania opadów. Wartości WBR większe od 25% wykazały wysoce niezadowalającą jakość tego modelu. Nieco tylko niższe wartości WBR, sugerujące przeciętną ocenę modelu, obserwowano jedynie przy najdłuższych czasach trwania – 180 min i 120 min.

Tabela 4. Wartości względnego błęd resztowego (WBR) wyznaczonych natężeń deszczów i oszacowanych modelem Błaszczyka (dane ze 100 deszczomierzy)

Table 4. Relative residual error (WBR) values for empirical rainfall intensities and their estimates calculated from Blaszczyk's model (data from 100 rain-gauges)

Czas (t), min	Względny błąd resztowy (WBR), %			
	p=10%	p=20%	p=50%	p=100%
5	27,4	26,1	25,3	24,6
10	28,6	29,2	31,5	31,2
15	30,7	31,0	33,6	32,7
30	32,2	33,1	33,9	33,0
45	31,3	31,7	32,7	31,0
60	29,3	29,9	30,6	29,5
90	26,0	27,6	27,9	26,8
120	23,4	24,5	26,1	25,2
180	20,6	21,2	23,0	23,4

Rozbieżności między empirycznie wyznaczonymi wartościami natężenia opadów i ich oszacowaniami na podstawie wzoru Błaszczyka były bardzo duże w analizowanym zbiorze 100 deszczomierzy, czego dowodzą także wartości pierwiastka błędu średniokwadratowego (RMSE) zestawione w tabeli 5. Wartości te sięgały nawet $110,6 \text{ dm}^3/(\text{s}\cdot\text{ha})$ przy czasie 5 min i prawdopodobieństwie równym 10%. W sposób naturalny wartości RMSE malały, podobnie jak same wartości natężenia opadów miarodajnych, wraz z wydłużaniem się czasu ich trwania oraz zwiększaniem się prawdopodobieństwa ich wystąpienia.

Tabela 5. Wartości pierwiastka błędu średniokwadratowego (RMSE) wyznaczonych natężeń deszczów i oszacowanych modelem Błaszczyka (dane ze 100 deszczomierzy)

Table 5. Root-mean-square error (RMSE) values for empirical rainfall intensities and their estimates calculated from Błaszczyk's model for 100 rain-gauges

Czas (t), min	Pierwiastek błędu średniokwadratowego (RMSE), $\text{dm}^3/(\text{s}\cdot\text{ha})$			
	p=10%	p=20%	p=50%	p=100%
5	110,6	88,0	67,0	52,7
10	83,0	71,0	59,8	47,4
15	71,4	59,8	50,6	38,9
30	49,3	41,6	32,4	24,8
45	35,8	29,7	23,3	17,3
60	26,8	22,6	17,5	13,3
90	17,4	15,2	11,7	8,9
120	12,4	10,7	8,8	6,7
180	7,9	6,7	5,7	4,6

Przeprowadzona analiza błędu względnego (Δq), dotycząca empirycznie wyznaczonych wartości natężenia opadów atmosferycznych oraz ich oszacowań z użyciem modelu Błaszczyka wykazała, że wartości rzeczywiste były na ogół bardzo wyraźnie zaniżane poprzez formułę (10). W tabeli 6 wartości średnie błędu względnego były zawsze dodatnie, a w grupie 100 analizowanych deszczomierzy, przy wszystkich kombinacjach czasów trwania i prawdopodobieństw wystąpienia opadów, obliczony całkowity średni błąd Δq wynosił 33,0%. Tak duży błąd wykroczył wyraźnie poza wartości akceptowalne z punktu widzenia dokładności rejestracji opadów i opracowywanych współcześnie modeli opadowych. W skrajnym przypadku, to jest w przypadku deszczomierza w Legnicy, przy czasie trwania 45 min i prawdopodobieństwie 20% zanotowano błąd Δq wynoszący aż 116,6%. Na drugim końcu skali znajdował się deszczomierz na Hali Gąsienicowej, w przypadku którego, przy czasie trwania 5 min i prawdopodobieństwie 10%, obserwowano najmniejszy błąd $\Delta q = -49,9\%$. Ta obserwacja, uzyskana z deszczomierza o skrajnie wysokich opadach średniorocznych ($H = 1705,5 \text{ mm}$), była najlepszym przykładem potwierdzającym fakt, że przyjęta przez Błaszczyka prosta idea połączenia związkiem funkcyjnym (10) natężenia deszczu miarodajnego z opadami normalnymi była błędna.

Mając na uwadze genezę badań Błaszczyka postanowiono jeszcze bardziej szczegółowo przeanalizować rozbieżności występujące w wartościach natężenia deszczu miarodajnego wyznaczonych empirycznie i oszacowanych z formuły (10) w odniesieniu do Warszawy. W przypadku tego miasta, we wszystkich kombinacjach wartości czasu trwania i prawdopodobieństwa wystąpienia opadów

Tabela 6. Wartości błędu względnego (Δq) wyznaczonych natężeń deszczów i oszacowanych modelem Błaszczyka (dane ze 100 deszczomierzy)

Table 6. Relative error (Δq) values for empirical rainfall intensities and their estimates calculated from Błaszczyk's model (data from 100 rain-gauges)

Czas (t), min	Błąd względny (Δq)*, %			
	p=10%	p=20%	p=50%	p=100%
5	10,0 -49,9÷77,4	16,0 -40,3÷90,6	23,4 -30,2÷92,2	25,9 -21,8÷68,2
10	25,8 -27,3÷101,6	33,0 -18,9÷85,0	40,8 -13,7÷84,3	41,7 -13,5÷85,6
15	32,4 -24,4÷85,3	38,3 -18,3÷93,7	46,3 -12,9÷96,6	45,4 -7,7÷95,6
30	38,5 -31,9÷98,9	43,2 -21,2÷97,4	47,8 -7,5÷92,2	46,4 -0,8÷98,3
45	36,0 -33,2÷96,0	39,8 -24,2÷116,6	44,3 -8,3÷100,4	42,5 -2,1÷89,9
60	32,0 -31,4÷87,9	36,6 -20,5÷102,0	40,5 -6,9÷97,5	38,9 1,6÷92,2
90	26,4 -30,8÷80,4	30,9 -15,2÷98,0	35,2 -6,3÷83,0	33,9 -3,3÷79,9
120	21,1 -23,5÷78,4	26,3 -10,3÷81,0	31,2 -7,8÷76,8	31,2 -5,9÷70,1
180	14,8 -22,6÷94,8	19,6 -14,8÷76,3	25,9 -9,9÷65,3	27,8 -7,1÷64,6

*wartość średnia/min.÷maks.

atmosferycznych, formuła Błaszczyka zaniżała rzeczywiste wartości natężenia jednostkowego deszczów. Obliczony błąd Δq mieścił się w zakresie od 1,8% do 56,3%, a jego średnia wartość wynosiła 36,1%. Można zatem stwierdzić, że współcześnie formuła Błaszczyka nie odzwierciedla rzeczywistych wartości natężenia deszczu miarodajnego także w przypadku Warszawy i prowadzi do niebezpiecznego zaniżania wyników obliczeń.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania empiryczne, oparte na wyznaczonych i zweryfikowanych (we współpracy z IMGW-PIB w ramach projektu PANDa) średniorocznych sumach opadów atmosferycznych oraz rzeczywistych wartościach natężenia deszczu miarodajnego określonych na podstawie rejestracji opadowych z sieci 100 deszczomierzy w Polsce, skłaniają do następujących wniosków:

- ♦ wartości natężenia deszczu miarodajnego nie wykazały silnego skorelowania z średniorocznymi sumami opadów, zatem sama struktura formuły Błaszczyka (10) jest nieprawidłowa,

- ♦ stosowanie formuły Błaszczyka prowadzi, w zdecydowanej większości przypadków, do niebezpiecznego zaniżania estymowanych wartości natężenia deszczu miarodajnego – obliczony całkowity średni błąd względny, w całym zbiorze porównywanych par rzeczywistych i estymowanych wartości natężenia deszczu, wynosił 33,0%,

- ♦ stwierdzone duże zróżnicowanie obliczonych wartości błędu względnego w zbiorze 100 analizowanych stacji deszczomierzy wraz z bardzo małymi wartościami współczynnika korelacji, w przypadku empirycznie wyznaczonych wartości natężenia opadów i ich oszacowań z użyciem modelu Błaszczyka (10), wskazuje na brak możliwości wprowadzenia systematycznej poprawki do tego modelu,

♦ stosowanie formuły Błaszczyka, nawet w warunkach warszawskich, prowadzi jednocześnie do wyraźnego zaniżenia estymowanych wartości natężenia deszczu miarodajnego względem rzeczywistych wartości opadów atmosferycznych.

Podsumowując wyniki przeprowadzonej analizy należy stwierdzić, że formuła Błaszczyka powinna być wycofana z praktyki inżynierskiej – wymiarowania czy modelowania działania systemów odwadniania terenów w całej Polsce. Powinna być ona zastąpiona przez lokalne modele opadów nowej generacji – z tworzonego polskiego atlasu natężeń deszczów miarodajnych.

Pracę zrealizowano w ramach projektu „Opracowanie i wdrożenie Polskiego Atlasu Natężeń Deszczów (PANDa)” – POIR.01.01.01-00-1428/15, sfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, a także w ramach działalności statutowej Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej, sfinansowanej ze środków MNiSW.

LITERATURA

1. A. KOTOWSKI: Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów. Sieci kanalizacyjne. Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2015.
2. P. LICZNAR, E. BURSZTA-ADAMIAK, J. ŁOMOTOWSKI, J. STANCZYK: Modern proposal of methodology for retrieval of characteristic synthetic rainfall hyetographs. E3S Web of Conferences, Vol. 22, 00104, 2017.
3. P. LICZNAR, C. de MICHAELE, W. ADAMOWSKI: Precipitation variability within an urban monitoring network via microcanonical cascade generators. *Hydrology and Earth System Sciences* 2015, Vol. 19, No. 1, pp. 485–506.
4. B. KAŻMIERCZAK, A. KOTOWSKI: The suitability assessment of a generalized exponential distribution for the description of maximum precipitation amounts. *Journal of Hydrology* 2015, Vol. 525, pp. 345–351.
5. A. KOTOWSKI, B. KAŻMIERCZAK, A. DANCEWICZ: Modelowanie opadów do wymiarowania kanalizacji. *Studia z Zakresu Inżynierii* nr 68, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 2010.
6. V. BASUMATARY, B. SUNDAR SIL: Generation of rainfall intensity-duration-frequency curves for the Barak River Basin. *Meteorology Hydrology and Water Management. Research and Operational Applications* 2018, Vol. 6, No. 1, pp. 47–57.
7. H.A. EWEA, A. M. ELFEKI, N. S. AL-AMRI: Development of intensity-duration-frequency curves for the Kingdom of Saudi Arabia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 2017, Vol. 8, No. 2, pp. 570–584.
8. W. BŁASZCZYK: Spływy deszczowe w sieci kanalizacyjnej (wytyczne do normatywu). *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 1954, nr 9, ss. 262–271.
9. S. WĘGLARCZYK: O poprawności wzorów Błaszczyka na obliczanie opadów miarodajnych. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 2013, nr 3/IV, ss. 63–76.
10. M. RYBCZYŃSKI, K. POMIANOWSKI, K. WÓYCICKI: HYDROLOGJA. Część I. Opad-odpływ. Komisja Wydawnicza Towarzystwa Bratniej Pomocy Studentów Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1933.
11. Z.N. SZYSZKIN, A. KARIELIN, S.K. KOŁOBANOW, S.W. JAKOWLEW: Kanalizacja. Gosudarstwennoje Izdatielstwo Literatury po Stroitelstwu, Architekturnie i Stroitelnyim Materialam, Moskwa 1960.
12. K. DĘBSKI: Hydrologia kontynentalna. Część II. Fizyka wody, opady atmosferyczne i parowanie. Wydawnictwa Komunikacyjne, Warszawa 1959.
13. Wytyczne techniczne projektowania miejskich sieci kanalizacyjnych. *Dziennik Budownictwa* 1965, nr 15.
14. PN-S-02204:1997: Drogi samochodowe – Odwodnienie dróg.
15. E. BURSZTA-ADAMIAK, P. LICZNAR, J. ZALESKI: Criteria for identifying maximum rainfalls determined by the peaks-over-threshold (POT) method under the Polish Atlas of Rainfalls Intensities (PANDa) project. *Meteorology Hydrology and Water Management. Research and Operational Applications* 2018 (in press).

Licznar, P., Siekanowicz-Grochowina, K., Oktawiec, M., Kotowski, A., Burszta-Adamiak, E. Empirical Verification of Blaszczyk's Formula for Design Rainfall Intensity Calculations. *Ochrona Srodowiska* 2018, Vol. 40, No. 2, pp. 17–22.

Abstract: Despite serious questions to the theoretical fundamentals as well as the limited and outdated precipitation data, the Blaszczyk's formula for the design rainfall intensity is still in use for sizing drainage systems in Poland. The assumption of close functional dependence between the average annual precipitation depth and maximum rainfall intensities is the basis for the formula (IDF-type, i.e. intensity-duration-frequency). The assumption was verified against the actual values of maximum rainfall intensity, derived for the purpose of development and implementation of the Polish Atlas of Rainfall Intensity (PANDa rainfall model). The actual maximum rainfall intensities for different duration periods were retrieved from the precipitation records obtained from the nation-wide network of 100 rain gauges of the

Polish Institute of Meteorology and Water Management (IMGW-PIB) for the period of 1986–2015. These values were compared to the corresponding Blaszczyk formula's estimates. Based on the results, the basic assumption of the formula was questioned, namely that the maximum rainfall intensity values are not correlated with the normal annual precipitation depth. A clear tendency for the rainfall intensity values to be underestimated by the Blaszczyk's formula was observed. It was demonstrated that the mean relative error between the actual and estimated rainfall intensities was 33%. Even for the original hydrological Warsaw conditions, the Blaszczyk formula proved unacceptable due to significant underestimation of current rainfall intensities. In view of the findings, a complete elimination of the formula from drainage system engineering in Poland is recommended.

Keywords: Meteorological data, precipitation model, Blaszczyk's model, rainfall intensity, IDF and DDF curves, drainage systems.