

PRACE ORYGINALNE

Kazimierz BANASIK, Mariusz BARSZCZ

Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW
Department of Hydraulic Engineering and Environmental Recultivation WAU

Porównanie ocen opóźnień odpływu wezbraniowego dla wybranych małych zlewni rzecznych **Comparison of lag times of flood runoff of four river catchments**

Słowa kluczowe: małe zlewnie, proces opad-
-odpływ, opóźnienie odpływu wezbraniowego
Key words: small catchments, rainfall-runoff
process, runoff lag time

Wprowadzenie

Opóźnienie odpływu wezbraniowego (ang. lag) definiowane jako odległość mierzona w skali czasu pomiędzy środkiem geometrycznym hietogramu opadu efektywnego i hydrogramu odpływu bezpośredniego jest ważnym elementem w modelowaniu procesu opad-
-odpływ (transport rumowiska), a także w wyznaczaniu przepływów maksymalnych.

W pracy przedstawiono ocenę przydatności istniejących wzorów empirycznych do wyznaczania opóźnienia odpływu, przeprowadzanej na podstawie porównania wartości obliczonych ze wzorów i ustalonych na pomierzone zdarzenia opad-odpływ. W tym celu

wykorzystano dane pomiarowe zarejestrowane w wybranych czterech zlewniach: rzeki Zagożdżonki, rzeki Bauny, rzeki Gzówki, rzeki Skawy.

W artykule zamieszczono wyniki obliczeń opóźnień odpływu określonych według wzorów empirycznych i według pomiarów dla czterech zlewni. Dwie omówione były szczegółowo w pracach Banasika i innych (2001, 2002), natomiast dwie pozostałe (Zagożdżonka i Bauna) omówione są w prezentowanym artykule.

Wzory empiryczne na wyznaczenie opóźnienia odpływu wezbraniowego

Przeprowadzono wiele prób obliczeń mających na celu ustalenie związku pomiędzy opóźnieniem odpływu wezbraniowego i charakterystykami zlewni. Jedną z ostatnich przedstawili Simas i Hawkins (1999). Autorzy ci dysponowali danymi z ponad 56 000

zdarzeń opad-odpływ zarejestrowanych w 168 małych zlewniach USA, o powierzchni od 0,10 ha do 14 km² dla okresów od 3 do 58 lat. Ustalili oni następujące równanie:

$$\text{Lag} = 0,0038B^{0,594} J^{-0,150} S^{0,313} \quad (1)$$

gdzie:

Lag – opóźnienie odpływu wezbraniowego [h],

B – szerokość zlewni [m],

J – spadek głównego cieku [–],

S – parametr retencji zlewni [mm].

Postać wzoru (1) uzyskano na podstawie danych z 78 zlewni, w których stwierdzono stałe (stabilne) wartości opóźnienia odpływu dla dużych zdarzeń.

Do powszechnie znanych zależności empirycznych na opóźnienie odpływu należy formuła opracowana przez byłą Służbę Ochrony Gleb (Soil Conservation Service) Departamentu Rolnictwa USA (USDA – SCS, 1985) o postaci:

$$\text{Lag} = \frac{2,59L^{0,8}(0,039S + 1)^{0,7}}{1900J_z^{0,5}} \quad (2)$$

gdzie:

L – długość głównego cieku [m],

J_z – średni spadek zlewni [%],

Dane wykorzystane do wyprowadzenia zależności (2) pochodziły z wielu zlewni z terenu USA, o powierzchni do 16 km².

Na podstawie danych ze zlewni w stanie Illinois w USA Mitchell (1948) uzależnił opóźnienie odpływu jedynie od powierzchni zlewni:

$$\text{Lag} = 0,593A^{0,60} \quad (3)$$

gdzie A – powierzchnia zlewni [km²].

Mitchell stwierdził także, że właściwość spadku terenu jako kolejnego parametru nie dało znaczącego poprawienia zależności na opóźnienie odpływu w badanych zlewniach.

Na podstawie danych z równinnych, zalesionych zlewni Florydy, Capece i inni (1988, za Sheridanem 1994) uzależnili opóźnienie odpływu od powierzchni zlewni i udziału mokradeł:

$$\text{Lag} = 3,0 + 0,27A^{0,11}(W + 1)^{0,71} \quad (4)$$

gdzie W – udział mokradeł w zlewni [%].

Wykorzystane dane pochodziły ze zlewni o powierzchni od 0,1 do 14,5 km².

W badaniach hydrogramów jednostkowych dla zlewni w Wielkiej Brytanii Nash (1960) zaproponował alternatywne równania odnoszące się do opóźnienia odpływu o postaci:

$$\text{Lag} = 20,7A^{0,30}(100J_z)^{-0,30} \quad (5)$$

oraz

$$\text{Lag} = 17,3L^{0,30}(100J)^{-0,33} \quad (6)$$

gdzie:

L – długość głównego cieku [km],

J – spadek głównego cieku [%].

Dalszym przykładem zależności empirycznej, wyprowadzonej przez Kennedy`ego i Watta (1967, za Diskinem 1973) dla zlewni położonych w południowej części prowincji Ontario w Kanadzie jest wzór:

$$\text{Lag} = 4,90 L^{0,66} (100 J)^{-0,33} W_J^{0,21} \quad (7)$$

gdzie:

W_J – bezwymiarowy parametr udziału jezior, bagien i stawów w 2/3 górnej

części powierzchni zlewni, określony z zależności:

$$W_J = 1 + 20 A_J/A \quad (8)$$

gdzie A_J – powierzchnia jezior, stawów i bagien.

Innym sposobem wyznaczenia opóźnienia odpływu jest wykorzystanie wzorów na parametry modelu Wackermanna (Banasik i in. 2000). Jeśli opóźnienie odpływu dla chwilowego hydrogramu jednostkowego (IUH) otrzymane z kaskady zbiorników liniowych (modelu Nasha) jest zapisywane zależnością:

$$\text{Lag} = N k \quad (9)$$

gdzie:

N – liczba zbiorników [–],

k – parametr retencji zbiornika [h],

to opóźnienie odpływu dla IUH z modelu Wackermanna (dwie kaskady równoległe, z których każda zawiera dwa zbiorniki) można zapisać wzorem:

$$\text{Lag} = \text{Lag}_1 \beta + \text{Lag}_2 (1 - \beta) \quad (10)$$

gdzie:

Lag_1 – opóźnienie odpływu z pierwszej kaskady [h],

Lag_2 – opóźnienie odpływu z drugiej kaskady [h],

β – parametr (modelu Wackermanna) rozdziału opadu efektywnego na pierwszą i drugą kaskadę [–].

Podstawiając do wzoru (10): $\text{Lag}_i = 2 k_i$ (gdzie 2 – liczba zbiorników w kaskadzie, k_i – parametr retencji odpowiednio pierwszej i drugiej), otrzymamy:

$$\text{Lag} = 2 [k_1 \beta + k_2 (1 - \beta)] \quad (11)$$

Wartości parametrów modelu Wackermanna (k_1 , k_2 , β) można obliczyć z poniższych zależności:

$$k_1 = a_1 (L/J^{0,5})^{b_1} \quad (12)$$

$$k_2 = a_2 (L/J^{0,5})^{b_2} \quad (13)$$

$$\beta = a_3 (L/J^{0,5})^{b_3} \quad (14)$$

gdzie:

L – długość głównego cieku mierzona od rozpatrywanego przekroju do wododziału [km],

J – spadek głównego cieku dla długości cieku jw. [–],

a_i oraz b_i – współczynniki równań (12)–(14), których wartości zostały ustalone przez Thiele'a i Ignara (Ignar 1993).

Dalszymi przykładami zależności empirycznych są wzory wyprowadzone przez Askew (1970):

$$\text{Lag} = 2,12A^{0,57} Q_{sr}^{-0,23} \quad (15)$$

oraz

$$\text{Lag} = 1,60A^{0,54} J_z^{-0,16} Q_{sr}^{-0,23} \quad (16)$$

gdzie:

Q_{sr} – przepływ średni związany z odpływem bezpośrednim [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

J_z – średni spadek zlewni [–],

A – powierzchnia zlewni [km^2].

Boyd (1978) uzależnił opóźnienie odpływu od powierzchni zlewni i od przepływu zmiennego dla każdego z analizowanych wezbrań:

$$\text{Lag} = 2,12A^{0,57} Q_{\max}^{-0,23} \quad (17)$$

gdzie Q_{\max} – przepływ maksymalny [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$].

Wielkością zmienną we wzorze Laurensona (1969, za Singh 1988) jest przepływ średni:

$$\text{Lag} = 24,4 Q_{\text{sr}}^{-0,27} \quad (18)$$

Ostatnim wzorem wykorzystanym do analizy jest wzór Meyninka (1978, za Singh 1988), który ma postać:

$$\text{Lag} = 8,38 A^{0,341} Q_p^{-0,362} \quad (19)$$

gdzie Q_p – przepływ maksymalny odniesiony do odpływu całkowitego [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$].

Ocena opóźnienia odpływu wezbraniowego na podstawie pomiarów

Opis obiektów badawczych. Zlewnia rzeki Zagożdżonki położona jest na Równinie Radomskiej w pobliżu miasta Radom, około 100 km na południe od Warszawy. Profil pomiarowy Czarna-Młyn na rzece Zagożdżonce, która jest lewobrzeżnym dopływem Wisły, zamyka zlewnię o powierzchni 23,4 km². Powierzchnia hydrologicznie aktywnej części zlewni wynosi 19,5 km². Przeważają w niej grunty orne (70%), na których zboża zajmują 65%, rośliny okopowe 25% i motylkowate 10%. Lasy stanowią 20% zlewni, użytki zielone 9,4%, a pozostałe 0,6% to tereny zabudowane i utwardzone. Występują tu trzy rodzaje gleb (nazwy według PTG – Polskiego Towarzystwa Gleboznawczego). Piaski gliniaste zajmują 9,8 km², piaski słabo gliniaste 7,8 km², a pozostałe gleby organiczne 1,8 km², co stanowi odpowiednio 50,5%, 40,2% oraz 9,3% hydrologicznie aktywnej powierzchni zlewni.

Zlewnia rzeki Bauny położona jest w Niemczech na obszarze landu Hesja, około 10 km na południowy-wschód od miasta Kassel. Bauna jest rzeką podgóorską uchodzącą do Fuldy, która jest dopływem Wezery. Rzeką Wezera wpływa do Morza Północnego. Całkowita powierzchnia zlewni wynosi 49,1 km². Obecnie 33% jej powierzchni zajmują użytki rolne, 30% lasy, 12% użytki zielone, a 25% to tereny zurbanizowane. Oprócz wysokiego zurbanizowania zlewnia charakteryzuje się dużymi spadkami terenu (średni spadek zlewni 4,22%) i przewagą gleb o małej i bardzo małej przepuszczalności.

Opis metody. Opóźnienie odpływu wezbraniowego zdefiniowane we wprowadzeniu zostało zilustrowane na tle danych pomiarowych opadu i odpływu na rysunku 1. Określa się je z zależności:

$$\text{Lag} = M_{1Q} - M_{1P} \quad (20)$$

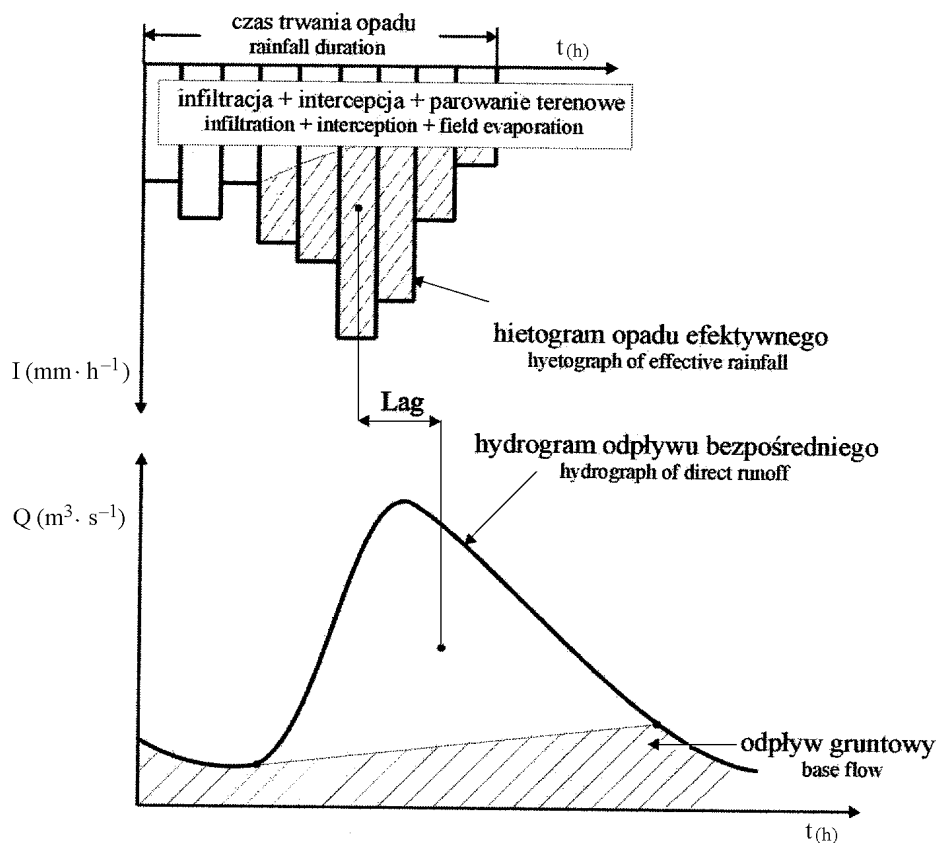
gdzie:

M_{1Q} – pierwszy moment statystyczny odpływu bezpośredniego [h],

M_{1P} – pierwszy moment statystyczny opadu efektywnego [h].

Rozdział opadu całkowitego na opad efektywny i straty przeprowadzono według metody SCS, przyjmując wysokość opadu efektywnego równą wartości odpływu bezpośredniego.

Wyniki pomiarów. Podstawowe charakterystyki pomierzonych zdarzeń opad-odpływ wraz z obliczonymi opóźnieniami odpływu w zlewniach rzeki Zagożdżonki (po profil Czarna Młyn) i rzeki Bauny zestawiono w tabelach 1 i 2.



RYSUNEK 1. Graficzna interpretacja opóźnienia odpływu
 FIGURE 1. Graphical interpretation of lag time

TABELA 1. Charakterystyki pomierzonych zdarzeń opad-odpływ oraz opóźnienia odpływu w zlewni Zagożdżonki
 TABLE 1. Main parameters of the recorded rainfall-runoff events and lag times in Zagożdżonka catchment

Lp. No	Data wystąpienia Date of occurrence	Opad Rainfall P [mm]	Opad efektywny Runoff H [mm]	Przeptywy Peak discharge Q_{\max} [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	Opóźnienia odpływu Runoff lag time Lag [h]
1	19.04.1999	24,6	8,08	3,69	6,77
2	08.03.2000	19,2	2,39	1,52	7,27
3	05.04.2000	15,0	4,44	2,06	7,53
4	22.04.2001	18,9	2,48	1,04	6,55
5	24.04.2001	25,4	5,16	2,08	6,92
Średnia / Mean		20,6	4,50	2,10	7,00
Odch. stand. / Stand. Dev.		4,33	2,33	1,00	0,39

TABELA 2. Charakterystyki pomierzonych zdarzeń opad-odpływ oraz opóźnienia odpływu w zlewni Bauny

TABLE 2. Main parameters of the recorded rainfall-runoff events and lag times in Bauna catchment

Lp.	Data wystąpienia Date of occurrence	Opad Rainfall P [mm]	Opad efektywny Runoff H [mm]	Przepływy Peak discharge Q_{\max} [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	Opóźnienia odpływu Runoff lag time Lag [h]
1	29.06.97	36,8	5,71	21,2	1,25
2	28.10.98	14,7	8,55	21,1	1,37
3	31.10.98	22,6	14,7	16,8	2,95
4	25.02.00	16,6	11,5	20,4	2,88
5	19.08.00	24,8	3,72	18,5	1,69
Średnia / Mean		23,1	8,84	19,6	2,03
Odch. stand. / Stand. Dev.		8,71	4,40	1,90	0,83

Pomierzone zdarzenia charakteryzują się opadem wysokości od 15,0 do 25,4 mm przy wartości średniej 20,6 mm oraz warstwą odpływu bezpośredniego (opadu efektywnego) wysokości od 2,39 do 8,08 mm przy wartości średniej 4,50 mm. Przepływy maksymalne zarejestrowanych zdarzeń wynoszą od 1,04 do 3,69 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a ich wartość średnia dla pięciu wezbrań 2,10 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Wyznaczone opóźnienia odpływu zmieniały się od 6,55 do 7,53 h przy wartości średniej wynoszącej 7,00 h.

Zdarzenia pomierzone w zlewni Bauny charakteryzują się opadem wysokości od 14,7 do 36,8 mm przy wartości średniej 23,1 mm oraz warstwą opadu efektywnego wysokości od 3,72 do 14,7 mm przy wartości średniej 8,84 mm. Przepływy maksymalne zarejestrowanych zdarzeń wynoszą od 16,8 do 21,2 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a ich wartość średnia 19,6 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Wyznaczone opóźnienia odpływu zawierają się w granicach od 1,25 h do 2,95 h przy wartości średniej wynoszącej 2,03 h.

Porównanie wyników ze wzorów empirycznych i z pomiarów

W tabeli 3 zestawiono wyniki obliczeń opóźnień odpływu ze wzorów empirycznych na tle wartości średnich opóźnień odpływu uzyskanych z pomiarów w zlewniach rzeki Zagożdżonki i Bauny.

Wyniki obliczeń wskazują na duże zróżnicowanie opóźnień odpływu w zależności od zastosowanej formuły. W zlewni Zagożdżonki zmieniały się one od 3,52 do 31,7 h (wartość maksymalna), gdzie wartość średnia uzyskana z pomiarów wynosi 7,00 h, a w zlewni Bauny od 2,26 do 18,5 h, gdzie wartość średnia z pomiarów wynosi 2,03 h. Wzorami, z których uzyskano wartości najbliższe opóźnieniu odpływu wyznaczonemu z pomiarów w zlewni Zagożdżonki, jest wzór SCS (5,54 h) oraz wzór Kennedy'ego i Watta (5,23 h), natomiast w zlewni Bauny jest to wzór Simasa i Hawkinsa (2,26 h), wzór SCS (2,55 h) oraz wzór Capece i innych (3,45 h).

TABELA 3. Opóźnienia odpływu rzeki Zagożdżonki i Bauny ustalone z pomiarów i formuł empirycznych

TABLE 3. Lag times for Zagożdżonka and Bauna catchment estimated on measurement and on empirical formule

Sposób wyznaczenia Estimated on	Zlewnia Zagożdżonki Zagożdżonka catchment Lag [h]	Zlewnia Bauny Bauna catchment Lag [h]
Z pomiarów / on measurement	7,00	2,03
Według wzoru Simasa i Hawkinsa (1)	3,83	2,26
Według wzoru SCS (2)	5,54	2,55
Według wzoru Mitchella (3)	3,52	6,09
Według wzoru Capece i in. (4)	4,04	3,45
Według wzoru Nasha		
• (5)	14,6	10,6
• (6)	9,22	7,13
Według wzoru Kennedy'ego i Watta (7)	5,23	5,47
Według modelu Wackermanna (11):		
• Thiele	13,2	7,7
• Ignar	9,78	5,8
Według wzoru Askew 1 (15)	13,0* (11,0–14,4)**	14,4* (13,4–15,3)**
Według wzoru Askew 2 (16)	20,3* (17,1–22,5)**	16,0* (14,9–17,1)**
Według wzoru Boyd (17)	10,3* (8,98–11,7)**	9,81* (9,60–10,2)**
Według wzoru Laurensa (18)	27,9* (23,0–31,7)**	17,2* (15,9–18,5)**
Według wzoru Meyninka (19)	18,5* (14,4–22,8)**	10,8* (10,4–11,3)**

*Średnica arytmetyczna. / Average.

**Wartości ekstremalne. /Extreme value.

Wartości uzyskane ze wzorów (15)–(19), gdzie wartość opóźnienia odpływu zależała także od parametrów poszczególnych wezbrań, daleko odbiegały od wartości średniej ustalonej z pomiarów.

Dla całościowej oceny przydatności istniejących wzorów do wyznaczania opóźnień odpływu wezbraniowego wykorzystano wyniki analiz ze zlewni Zagożdżonki i Bauny (opisane w tej pracy) oraz Gzówki (po profil Jedlnia Letnisko) i Skawy (po profil Jordanów). Wyniki obliczeń z dwóch ostatnich wymienionych zlewni zostały opublikowane w poprzednich pracach autorów (Banasiak i in. 2001, 2002). W tabeli 4 zamieszczono wartości średnie opóźnień odpływu uzyskane z pomiarów w czterech badanych zlewniach oraz wzory

wraz z obliczonymi wartościami opóźnienia odpływu, z których uzyskano wartości najbliższe z pomiarów.

Jak wynika z tabeli 4, w zlewni Zagożdżonki wartości obliczone ze wzorów empirycznych najbliższe dla wartości ustalonej z pomiarów uzyskano ze wzorów SCS i Kennedy'ego i Watta. Natomiast dla sąsiadującej z nią zlewni Gzówki były to wzory Nasha, Wackermanna z parametrami Ignara oraz SCS. W podgórskiej zlewni Bauny najlepsze pod tym względem okazały się wzory Simasa i Hawkinsa, SCS oraz Capece i innych, a w górskiej zlewni Skawy wzory Nasha, Kennedy'ego i Watta, Wackermanna z parametrami Thiele'a oraz wzór Mitschella.

TABELA 4. Wyniki oceny opóźnień odpływu wezbraniowego w czterech zlewniach rzecznych
TABLE 4. Lag times of four river catchments

Nazwa zlewni Catchment	Charakter zlewni Character of catchment	Opóźnienie odpływu z pomiarów [h] Empirical lag time	Opóźnienie odpływu ze wzorów [h] Lag time acc. to equations
Zagożdżonka	nizinna	7,00	SCS – 5,54 Kennedy i Watt – 5,23
Gzówka	nizinna	13,9	Nash, wzór (6) – 14,0 Wackermann (parametry Ignara) – 14,3 SCS – 12,9
Bauna	podgórska	2,03	Simas i Hawkins – 2,26 SCS – 2,55 Capece i in. – 3,45
Skawa	górska	10,6	Nash, wzór (6) – 10,7 Kennedy i Watt – 10,2 Wackermann (parametry Thiele'a) – 10,1 Mitchell – 9,2

Podsumowanie

Przedstawiono szczegółowe wyniki obliczeń opóźnień odpływu wezbraniowego ze wzorów empirycznych i z pomiarów dla zlewni Zagożdżonki i zlewni Bauny oraz wyniki ze zlewni Gzówki i Skawy, które posłużyły dla całościowej oceny przydatności wzorów empirycznych do wyznaczania opóźnienia odpływu w zlewniach charakteryzujących się odmiennymi właściwościami odpływotwórczymi. Przeprowadzone pomiary i analizy wskazują, że:

- wartość średnia opóźnienia odpływu wezbraniowego uzyskana z pomiarów w zlewni Zagożdżonki wynosi 7,00 h, a w zlewni Bauny 2,03 h,
- wartości najbliższe uzyskanym z pomiarów w zlewni Zagożdżonki otrzymano z zastosowania wzorów SCS oraz Kennedy`ego i Watta, a w zlewni Bauny ze wzorów Simasa i Hawkinsa, wzoru SCS oraz Capece i innych,

- wzorami, które można stosować do wyznaczania opóźnienia odpływu w zlewniach nieobserwowanych o różnych właściwościach odpływotwórczych, są wzory SCS, Nasha oraz Kennedy`ego i Watta.

Literatura

- ASKEW A.J. 1970: Variation in lag time for natural catchments. *Journal of the Hydraulics Division* 96(HY2): 317–330.
- BANASIK K., GÓRSKI D., IGNAR S. 2000: Modelowanie wezbrań opadowych i jakość odpływu z małych nieobserwowanych zlewni rolniczych. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- BANASIK K., BARSZCZ M., OSTROWSKI J. 2001: Czas opóźnienia odpływu wezbraniowego ze zlewni górskiej. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej im. H. Kołłątaja w Krakowie* nr 382, *Inżynieria Środowiska* 21: 279–288.
- BANASIK K., BARSZCZ M., PUDZIANOWSKA J., CZEMPIŃSKA-ŚWITALSKA Z. 2002: Wyznaczanie czasu opóźnienia odpływu wezbraniowego w zlewni rzeki

- Gzówki. *Acta Scientiarum Polonorum – Architectura* 1–2: 53–62.
- BOYD M.J. 1978: Regional flood frequency data for New South Wales Streams. Wollongong, NSW. University of Wollongong.
- CAPECE J.C., CAMPBELL K.L., BALDWIN L.B. 1988: Estimating runoff peak rates from flat, high-water-table watersheds. *Transactions of the ASAE* 31(1): 74–81.
- DISKIN M.H. 1973: The role of lag in a quasi-linear analysis of the surface runoff system. Politechnika w Hajfie. Maszynopis.
- IGNAR S. 1993: Metodyka obliczania przepływów wezbraniowych w zlewniach nieobserwowanych. Rozprawy Naukowe i Monografie. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- KENNEDY R.J., WATT W.E. 1967: The relationship between lag time and the physical characteristics of drainage basins in Southern Ontario. *IASH Publication* 85: 866–874.
- LAURENSEN E.M. 1969: Data error effects in unit hydrograph derivation. *Journal of the Hydraulics Division* 95(HY6): 1899–1917.
- MEYNINK W.J.C. 1978: Catchment time response. Project 44/1977. Darling Downs Institute of Advanced Education, Australia.
- MITCHELL W.D. 1948: Unit Hydrographs in Illinois. Springfield, Ill. Illinois State Div. Waterways.
- NASH J.E. 1960: A unit hydrograph study with particular reference to British catchments. *Proceedings Institution of Civil Engineers* 17: 249–282.
- SHERIDAN J.M. 1994: Hydrograph time parameters for flatland watersheds. *Transactions of the ASAE* 37(1): 103–113.
- SIMAS M.J., HAWKINS R.H. 1999: Lag time characteristics for small watersheds in the U.S. NRCS-USDA (Służba Ochrony Zasobów Naturalnych Departamentu Rolnictwa USA). Maszynopis.
- SINGH V.P. 1988: Hydrologic Systems. Rainfall-Runoff Modeling. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- USDA – Soil Conservation Service, 1985. National Engineering Handbook. Sec. 4, Hydrology. Waszyngton, D.C.

Summary

Catchment lag time, defined as the elapsed time between the occurrence of the centroids of the effective rainfall and the direct runoff hydrograph, has been estimated taking into account the recorded rainfall-runoff events and the empirical formulas for four catchments: Zagożdżonka, Gzówka and Skawa catchment (located in Poland), Bauna catchment (located in Germany). On the basis of analysis for every four catchments result, that to calculate lag time in ungauged catchments we can apply SCS equation, Nash equation and Kennedy and Watt equation.

Authors' address:

Kazimierz Banasik, Mariusz Barszcz
 Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
 Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska
 02-776 Warszawa, ul. Nowoursynowska 159
 Poland