

## WYZNACZANIE CZASU OPÓŹNIENIA ODPLYWU WEZBRANIOWEGO W ZLEWNI RZEKI GZÓWKI

Kazimierz Banasik, Mariusz Barszcz, Joanna Pudzianowska,  
Zofia Czempińska-Świtalska

**Streszczenie:** Celem pracy jest przedstawienie wyników pomiarów czasu opóźnienia odpływu z nizinnej zlewni rzeki Gzówki, położonej na Równinie Radomskiej, po profil Jedlnia Letnisko. Czas opóźnienia odpływu obliczono na podstawie 6 największych zdarzeń opad – odpływ zarejestrowanych w latach 1997–2001. Średnia wartość z pomiarów wynosi 13,9 h. Wartość tę porównano z czasem opóźnienia uzyskanym z 10 formuł empirycznych. Wartości najbliższe, uzyskane z pomiarów, otrzymano przy zastosowaniu wzoru Nasha (równanie 6), wzoru według modelu Wackermanna z parametrami Ignara (równanie 12) oraz SCS (równanie 2).

**Słowa kluczowe:** małe zlewnie, proces opad – odpływ, czas opóźnienia odpływu wody

### WSTĘP

Czas, jaki upływa od wystąpienia opadu w zlewni rzecznej do momentu, kiedy odpływ bezpośredni (powierzchniowy i podpowierzchniowy) dotrze do przekroju zamykającego zlewnię jest ważnym elementem w modelowaniu procesu opad – odpływ – transport rumowiska unoszonego, a także w prognozowaniu wezbrań powodziowych. Czas ten nazywany czasem opóźnienia (ang. lag time) definiowany jest jako odległość mierzona w skali czasu między środkiem geometrycznym (ciężkości) hietogramu opadu efektywnego i hydrogramu odpływu bezpośredniego.

Celem pracy jest przedstawienie wstępnych wyników pomiarów czasu opóźnienia odpływu z małej zlewni rolniczej rzeki Gzówki, znajdującej się w dorzeczu Radomki. Wyniki te, uzyskane z analizy największych wezbrań opadowych zarejestrowanych w latach 1997–2001, przedstawione są na tle wartości otrzymanych z formuł empirycznych.

---

## FORMUŁY EMPIRYCZNE NA WYZNACZENIE CZASU OPÓŹNIENIA ODPLYWU

Przeprowadzono wiele prób mających na celu ustalenie związku między czasem opóźnienia a charakterystykami zlewni. Jedną z ostatnich przedstawili Simas i Hawkins [1999]:

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

gdzie:  $Lag$  – czas opóźnienia (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 czasów opóźnień odpływu dla dużych zdarzeń. Współczynnik determinacji zależności (1) wynosił  $R^2 = 0,58$  (przy  $N = 78$ ).

Do powszechnie znanych zależności empirycznych na czas opóźnienia odpływu należy formuła opracowana przez byłą Służbę Ochrony Gleb (Soil Conservation Service) Departamentu Rolnictwa USA [USDA-SCS 1985] o postaci:

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

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  $16 \text{ km}^2$ .

Na podstawie danych ze zlewni w stanie Illinois w USA, Mitchell [1948] uzależnił czas opóźnienia jedynie od powierzchni zlewni:

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

gdzie  $A$  – powierzchnia zlewni ( $\text{km}^2$ ).

Mitchell stwierdził także, że włączenie parametru spadku terenu nie dało znaczącego polepszenia zależności na czas opóźnienia w badanych zlewniach.

Na podstawie danych z równinnych, zalesionych zlewni Florydy, Capece i in. [1988 – za Sheridanem 1994] uzależnili czas opóźnienia od powierzchni zlewni i udziału mokradeł:

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

gdzie  $W$  – udział mokradeł w zlewni (%).

Wykorzystane dane pochodziły ze zlewni o powierzchni od  $0,1$  do  $14,5 \text{ km}^2$ .

W badaniach hydrogramów jednostkowych dla zlewni w Wielkiej Brytanii Nash [1960] zaproponował dwa alternatywne równania odnoszące się do czasu opóźnienia o postaci:

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

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

gdzie:  $L$  – długość głównego ciek (km),  
 $J$  – spadek głównego ciek (%)

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:

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

gdzie  $W_J$  – bezwymiarowy parametr udziału jezior, bagien i stawów ( $A_J$ ) w 2/3 górnej części powierzchni zlewni, określony z zależności:

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

gdzie:  $A_J$  – powierzchnia jezior, stawów i bagien,  
 $A$  – powierzchnia zlewni.

Chang-Xing Jin [1993] analizując dane z 6 zlewni, o powierzchni od 64 do 2388 km<sup>2</sup>, z których dwie położone są w Irlandii, a cztery w Chinach, ustalił zależność na podstawie 83 zdarzeń, o postaci:

$$Lag = 4,79 \cdot (L_c/v)^{0,89} \quad (9)$$

gdzie:  $L_c$  – odległość mierzona wzdłuż głównego ciek od rozpatrywanego przekroju do punktu na ciek położonego najbliżej geometrycznego środka ciężkości zlewni (km),  
 $v$  – prędkość średnia w przekroju zamykającym przy przepływie kulminacyjnym (m/s).

Innym sposobem wyznaczenia czasu opóźnienia jest wykorzystanie wzorów na parametry modelu Wackermanna [Banasik i in. 2000]. Jeśli czas opóźnienia odpływu dla chwilowego hydrogramu jednostkowego (IUH) otrzymany z kaskady zbiorników liniowych (modelu Nasha) jest zapisywany zależnością:

$$Lag = N \cdot k \quad (10)$$

gdzie:  $N$  – liczba zbiorników (–),  
 $k$  – parametr retencji zbiornika (h),

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

$$Lag = Lag_1 \cdot \beta + Lag_2 \cdot (1 - \beta) \quad (11)$$



gdzie:  $Lag_1$  – czas opóźnienia odpływu z pierwszej kaskady (h),  
 $Lag_2$  – czas opóźnienia odpływu z drugiej kaskady (h),  
 $\beta$  – parametr (modelu Wackermanna) rozdziału opadu efektywnego na pierwszą i drugą kaskadę (-).

Podstawiając do wzoru (11):  $Lag_i = 2 \cdot k_i$  (2 – liczba zbiorników w kaskadzie,  $k_i$  – parametr retencji odpowiednio pierwszej i drugiej), otrzymuje się:

$$Lag = 2 \cdot [k_1 \cdot \beta + k_2 \cdot (1 - \beta)] \quad (12)$$

Wartości parametrów modelu Wackermanna ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $\beta$ ) można obliczyć z poniższych zależności:

$$k_1 = a_1 \cdot (L/J^{0,5})^{b_1} \quad (13)$$

$$k_2 = a_2 \cdot (L/J^{0,5})^{b_2} \quad (14)$$

$$\beta = a_3 \cdot (L/J^{0,5})^{b_3} \quad (15)$$

gdzie:  $L$  – długość głównego ciekę mierzona od rozpatrywanego przekroju do wododziału (km),  
 $J$  – spadek ciekę głównego dla długości ciekę jw. (-),  
 $a_i$  oraz  $b_i$  – współczynniki równań (13)–(15), których wartości zostały ustalone przez Thiela i Ignara [1993].

Przedstawione równania zastosowano do wyznaczenia czasu opóźnienia odpływu w małej zlewni nizinnej rzeki Gzówki położonej koło Radomia, dla porównania z wartościami pomierzonymi.

## OCENA CZASU OPÓŹNIENIA NA PODSTAWIE POMIARÓW

### Opis obiektu badawczego

Czas opóźnienia odpływu na podstawie pomiarów wezbrań opadowych w zlewni rzeki Gzówki ustalono dla 6 największych zdarzeń opad – odpływ zarejestrowanych w latach 1997–2001. Rzeka Gzówka, położona na Równinie Radomskiej, jest prawobrzeżnym dopływem rzeki Pacynki. Źródła jej znajdują się w okolicy wsi Gózd na wysokości około 175 m n.p.m. Ujście Gzówki do Pacynki znajduje się na wysokości 147 m n.p.m. Powierzchnia całej zlewni wynosi 44 km<sup>2</sup>.

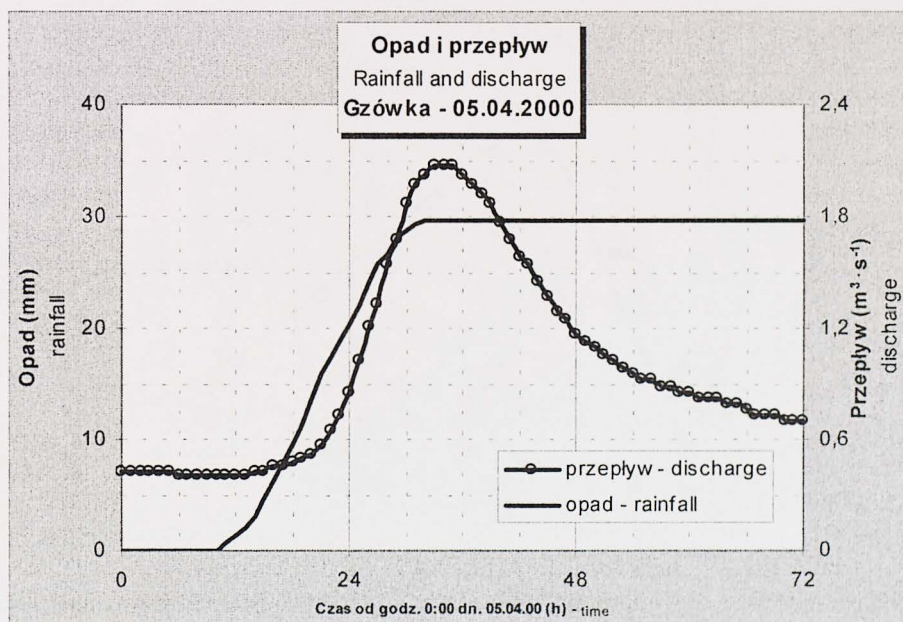
Przekrój wodowskazowy, w którym prowadzone są pomiary stanów i przepływów, znajduje się w miejscowości Jedlnia Letnisko (ok. 16 km na wschód od Radomia), tuż powyżej ujścia Gzówki do zbiornika Siczki, i zamyka zlewnię o powierzchni 39,3 km<sup>2</sup>. Znajdujący się tu wodowskaz został założony w 1963 roku przez Katedrę Budownictwa

Wodnego SGGW, która prowadziła badania w tym profilu do 1974 roku, a także przez pewien okres na początku lat 80. [Królikowski i in. 1985]. Obecnie rejestracja danych i pomiary prowadzone są przez Prywatną Wyższą Szkołę Ochrony Środowiska w Radomiu.

Użytkowanie zlewni zdominowane jest przez grunty orne, które zajmują około 51% powierzchni zlewni. Użytki zielone zajmują około 22%, a lasy około 27% powierzchni zlewni. Głównym typem gleb w zlewni rzeki Gzówki, powyżej zbiornika Siczki, są bielice, które obejmują około 91,6% powierzchni (w tym piaski gliniaste ok. 45,5%, piaski słabo gliniaste około 41,4% i piaski luźne około 4,7%). Na pozostałej powierzchni występują gleby bagienne i czarne ziemie.

## Opis metody

Do wyznaczenia przepływów wykorzystano wyniki pomiarów stanów wody i krzywą natężenia przepływu. Stany wody rejestrowane były w sposób ciągły za pomocą urządzenia samopiszącego, tj. limnigrafu, oraz dla kontroli wykonywany był codziennie pomiar terminowy przez obserwatora, tzn. odczyt z łaty wodowskazowej, o określonej godzinie. Dane wykorzystane do analizy czasu opóźnienia odpływu rejestrowane były za pomocą elektronicznego systemu zbierania danych z częstotliwością zapisu opadu i stanu wody co 10 minut. Przykładowe zdarzenie zostało pokazane na rysunku 1.



Rys. 1 Przykładowe zdarzenie opad – odpływ rozpoczynające się 5.04.2000 r. w Jedlni na rzece Gzówce

Fig. 1. Rainfall-runoff events in Gzówka catchment on April 5, 2000

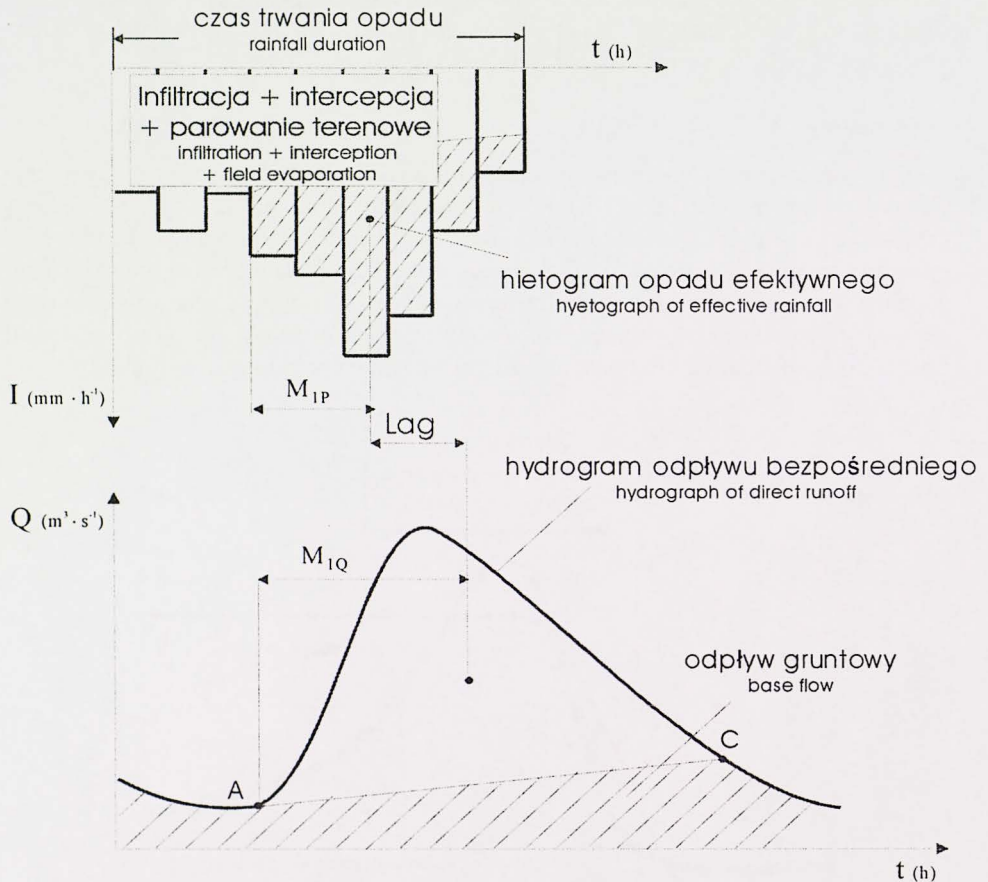
Zdefiniowany na wstępie czas opóźnienia odpływu, zilustrowany na tle danych pomiarowych opadu i odpływu na rysunku 2, określono z zależności:

$$Lag = M_{1Q} - M_{1P} \quad (16)$$

gdzie:  $Lag$  – czas opóźnienia odpływu (h),

$M_{1Q}$  – pierwszy moment statystyczny odpływu bezpośredniego (h),

$M_{1P}$  – pierwszy moment statystyczny opadu efektywnego (h).



Rys. 2. Graficzna interpretacja czasu opóźnienia odpływu  
Fig. 2. Graphical interpretation of lag time

Rozdział opadu całkowitego na opad efektywny i straty przeprowadzono według metody SCS, przyjmując wysokość opadu efektywnego równą wartości odpływu bezpośredniego. Po wyznaczeniu rzędnych odpływu bezpośredniego i opadu efektywnego wzór (16) można zapisać za pomocą równania:



$$Lag = \frac{\int_0^{T_Q} t \cdot Q_P(t) dt}{\int_0^{T_Q} Q_P(t) dt} - \frac{\int_0^{T_P} t \cdot H(t) dt}{\int_0^{T_P} H(t) dt} \quad (17)$$

gdzie:  $Q_P(t)$  – odpływ bezpośredni o czasie  $t$  ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ),  
 $H(t)$  – opad efektywny o czasie  $t$  ( $mm \cdot h^{-1}$ ),  
 $T_Q$  – czas trwania odpływu bezpośredniego (h),  
 $T_P$  – czas trwania opadu efektywnego (h),  
 $t$  – czas (h).

## WYNIKI POMIARÓW

Podstawowe charakterystyki pomierzonych zdarzeń opad – odpływ wraz z obliczonym czasem opóźnień odpływu zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyki pomierzonych zdarzeń opad – odpływ oraz czas opóźnienia  
 Table 1. Main parameters of the recorded rainfall-runoff events and lag times

Lp. No	Data wystąpienia Date of occurrence	Opad Rainfall $P$ mm	Opad efektywny Runoff $H$ mm)	Przeptywy Peak Discharge $Q$ $m^3 \cdot s^{-1}$	Czas opóźnienia Runoff Lag Time $Lag$ h
1	07.07.1997	52,0	3,85	2,13	12,2
2	19.04.1999	64,5	6,53	3,79	16,1
3	07.03.2000	21,3	1,46	1,25	15,6
4	05.04.2000	29,6	2,41	2,08	9,31
5	22.04.2001	21,2	3,84	2,23	15,0
6	24.04.2001	27,0	8,92	4,23	15,0
Średnia – Mean		35,9	4,50	2,62	13,9

Pomierzone zdarzenia charakteryzowały się opadem o wysokości od 21,2 do 64,5 mm oraz warstwą odpływu bezpośredniego (opad efektywny) od 1,46 do 8,92 mm. Przeptywy maksymalne zarejestrowanych zdarzeń wynoszą od 1,25 do 4,23  $m^3 \cdot s^{-1}$ . Wyznaczony czas opóźnienia odpływu ze zlewni rzeki Gzówki wynosi od 9,31 do 16,1 h, przy wartości średniej 13,9 h.

## PORÓWNANIE WYNIKÓW Z FORMUŁ EMPIRYCZNYCH I Z POMIARÓW

W tabeli 2 zestawiono wyniki obliczeń czasu opóźnienia odpływu, obliczone ze wzorów empirycznych, oraz podano wartość uzyskaną z pomiarów.

Tabela 2. Czas opóźnienia rzeki Gzówki ustalony z pomiarów i formuł empirycznych  
 Table 2. Lag times for Gzówka catchment estimated on measurement and on empirical formule

Sposób wyznaczenia	Czas opóźnienia <i>Lag</i> (h)
Z pomiarów	13,9
Według wzoru Simasa i Hawkinsa (1)	4,80
Według wzoru SCS (2)	12,9
Według wzoru Mitchella (3)	5,40
Według wzoru Capece (4)	3,90
Według wzoru Nasha (5)	20,6
(6)	14,0
Według wzoru Kennedy i Watt (7)	10,1
Według wzoru Chang-Xing Jin (9)	29.0 (21.8 – 37.2)
Według modelu Wackermanna (12)	
– według Thiela	18.2
– według Ignara	14.3

Wyniki obliczeń wskazują na duże zróżnicowanie czasu opóźnienia odpływu wynoszącego od 3,9 do 29,0 h, w zależności od zastosowanej formuły. Czas opóźnienia wynoszący 29,0 h, uzyskany ze wzoru (9), jest wartością średnią dla 6 analizowanych zdarzeń (wartość prędkości  $v$  przy przepływie kulminacyjnym przyjmowano różną dla każdego zdarzenia). Wzorami, z których uzyskano wartości najbliższe czasowi opóźnienia wyznaczonemu z pomiarów (13,9 h), są wzór Nasha (6), przy którego zastosowaniu uzyskano  $Lag = 14,0$  h, i wzór według modelu Wackermanna (z parametrami według Ignara), przy którego zastosowaniu uzyskano  $Lag = 14,3$  h. Czyli w pierwszym przypadku wartość oszacowana ze wzoru była o 0,72%, a w drugim o 2,88% większa od wartości uzyskanej z pomiarów.

Do formuł, przy których zastosowaniu w rozpatrywanej analizie uzyskano wynik różniący się mniej niż o 10% od wartości uzyskanej z pomiarów, należy także wzór SCS uzależniający  $Lag$  od długości cieków głównego, spadku zlewni i parametru retencji zlewni.

## PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki oceny czasu opóźnienia odpływu bezpośredniego z małej zlewni rolniczej rzeki Gzówki, położonej na Równinie Radomskiej. Ocena przeprowadzona na podstawie zdarzeń opad – odpływ i porównano z wartościami uzyskanymi z 10 formuł empirycznych. Przeprowadzone pomiary i analizy wskazują że:

- czas opóźnienia odpływu sześciu analizowanych zdarzeń zawierał się w granicach od 9,31 do 16,1 h, z wartością średnią wynoszącą 13,9 h,
- wartości czasu opóźnienia odpływu uzyskiwane z formuł empirycznych znacznie różnią się między sobą,



- wartości najbliższe uzyskane z pomiarów otrzymano z zastosowania wzoru Nasha (6) oraz z wzoru według modelu Wackermanna z parametrami według Ignara (12); parametrami występującymi w tych formułach są długość głównego cieku i jego spadek,
- parametrami najczęściej występującymi w formułach empirycznych są długość cieku głównego lub powierzchnia zlewni oraz spadek zlewni lub spadek cieku głównego.

## PIŚMIENNICTWO

- Banasik K., Górski D., Ignar S., 2000. Modelowanie wezbrań opadowych i jakość odpływu z małych nieobserwowanych zlewni rolniczych. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- 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.
- Chang-Xing Jin, 1993. Determination of basin lag time in rainfall-runoff investigations. Hydrological Processes, 7, 449–457.
- Diskin M.H., 1973. The role of lag in a quasi-linear analysis of the surface runoff system. Maszynopis. Politechnika w Hajfie.
- Ignar S., 1993. Metodyka obliczania przepływów wezbraniowych w zlewniach nieobserwowanych. Rozprawy Naukowe i Monografie, 35.
- 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.
- Królikowski J., Byczkowski A., Mordziński S., Banasik K., 1985. Ekspertyza możliwości wykonania stawów kolmatacyjnych w ośrodku wypoczynku świątecznego w Siczkach. Maszynopis. Katedra Budownictwa Wodnego SGGW, Warszawa.
- 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.
- USDA-Soil Conservation Service, 1985. National Engineering Handbook, Sec. 4, Hydrology. Waszyngton, D.C.

## ESTIMATION OF LAG TIME OF RUNOFF FOR A SMALL AGRICULTURAL CATCHMENT

**Abstract:** Catchment lag time, defined as the elapsed time between the occurrence of the centroids of effective rainfall and the direct runoff hydrograph, has been estimated for a small, lowland agricultural watershed of Gzówka river. The investigated watershed, with area of 39.3 km<sup>2</sup>, is located near town Radom in the Centre of Poland. Mean value of lag time estimated from rainfall-runoff events was 13.9 h. Taking into account 10 empirical formulas for estimating the watershed lag time, the best results has obtained from Nash equation (6) and Wackermann equation (12).

**Key words:** small catchments, rainfall-runoff process, runoff lag time

*K. Banasik, M. Barszcz, Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa  
e-mail: Banasik@alpha.sggw.waw.pl*

*J. Pudzianowska, Z. Czempińska-Świtalska, Wydział Ochrony Środowiska, Prywatna Wyższa Szkoła Ochrony Środowiska w Radomiu, ul. Zubrzyckiego 6, 26-600 Radom*