

**Jarosław BODULSKI**

Katedra Inżynierii Wodnej Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach  
Department of Hydraulic Engineering University of Technology in Kielce

## **Porównanie trendów zmian elementów fal wezbraniowych zlewni użytkowanej rolniczo i leśnej**

### **The comparison trends of changes hydrogram's elements drainage areas used agriculturally and forest**

**Słowa kluczowe:** zlewnia leśna, zlewnia rolnicza, fala wezbrania

**Key words:** forest drainage area, agricultural drainage area, hydrograms

#### **Wprowadzenie**

Przedstawiony w pracy problem zmian elementów fal wezbraniowych, a w tym przepływów maksymalnych zlewni leśnej i zlewni użytkowanej rolniczo, jest kontynuacją tematyki zapoczątkowanej w artykule Bodulskiego i innych (2005). Porównano charakterystyki fal wezbraniowych dwóch zlewni: Branwi, po profil Flisy, użytkowanej rolniczo (62,4% stanowią grunty orne) oraz Czartusowej, po profil Szklarnia, typowo leśnej (98,6% lasu). Zlewnie według podziału na regiony przyrodniczo-leśne Trampler (1990) leżą w dorzeczu rzeki Bukowej w Krajinie Małopolskiej oraz na północnym Podkarpaciu według regionów fizycznogeograficznych Kondrackiego (2000).

Powierzchnia leśna niemal w całości znajduje się na terenie Parku Krajobrazowego Lasów Janowskich. Las wywiera duży wpływ na kształtowanie się wezbrań ze względu na swoje duże zdolności retencyjne. Wielkość odpływu z terenów leśnych jest zróżnicowana i zależy od wielu czynników, jak: typ siedlisk, wiek lasu, gatunki drzew, pora roku.

Na obszarach użytkowanych rolniczo również występują zróżnicowane warunki odpływu. W szczególności zależą one od rodzaju i sposobu uprawy, pory roku, fazy rozwoju roślin itp. Na kształtowanie odpływu w niedużych zlewniach, oprócz pokrycia terenu, mają też wpływ: wielkość i kształt zlewni, ukształtowanie terenu, przepuszczalność podłoża (Byczkowski 1999).

#### **Metodyka badań**

Do oceny trendów zmian przepływów maksymalnych wód powierzchniowych i innych elementów fal wezbraniowych wykorzystano hydrogramy

roczne z okresu 1984–2000. Za falę wezbraniową uznano hydrogram powyżej przepływu średniego z tego okresu (SSQ). Podstawę fali stanowiła prosta łącząca dwa punkty. Pierwszy, stanowiący początek wezbrania, był najniższym punktem poprzedzającym kulminację. Wyjątek stanowiły tu przypadki, w których przepływ utrzymywał się przez dłuższy okres na tym samym poziomie, niższym od SSQ. Wtedy początek fali stanowiła ostatnia wartość przepływu z tego okresu. Drugi punkt podstawy fali to punkt na krzywej opadania odpowiadający przejściu odpływu powierzchniowego w podziemny. Metoda znalezienia tego punktu, opisana przez Rémenierasa (1997), polega na przedstawieniu krzywej opadania w układzie współrzędnych  $(Q, t)$  z osią rzędnych  $(Q)$  w podziałce logarytmicznej. Widać na niej wyraźnie załamania krzywej, których przyczynę upatruje się w sposobie zasilania rzeki. Umożliwia to określenie punktu przejścia zasilania powierzchniowego w podziemny. W przypadkach, w których trudno było określić ten punkt przejścia, analizowano kształt krzywej opadania. Jeżeli i w tym przypadku odnalezienie punktu przejścia było niemożliwe, to za drugi

punkt podstawy fali przyjmowano przepływ o tej samej wartości, co przepływ początkowy. Dla wezbrań złożonych za krzywą opadania przyjęto odcinek od ostatniej wartości maksymalnej przepływu do ostatniego punktu tworzącego falę.

Czas przyboru ( $t_s$ ) liczony był od początku fali do wystąpienia maksymalnego przepływu, a czas opadania ( $t_{op}$ ) od chwili wystąpienia maksymalnego przepływu do punktu  $Q_A$ . Czas trwania fali ( $t_c$ ) to suma czasów przyboru i opadania. Objętość wezbrań obliczono wzorem (1), a następnie zmniejszono ją o objętość trójkąta, który powstał przy odcięciu fali przez połączenie dwóch punktów o różnych wartościach przepływu, co zostało przedstawione na rysunku 1:

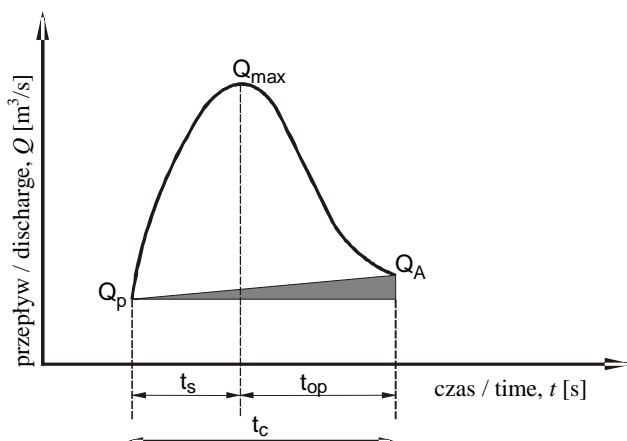
$$V = \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \cdot \Delta t \quad [\text{m}^3] \quad (1)$$

gdzie:

$Q_i, Q_{i+1}$  – przepływy w czasie wezbrania  $[\text{m}^3/\text{s}]$ ,

$i$  – numer pomiaru,

$\Delta t$  – czas trwania między przepływami  $[\text{s}]$ .



RYSUNEK 1. Schemat hydrogramu wezbrania:  $Q_A$  – przepływ w punkcie odcięcia,  $Q_p$  – przepływ początkowy,  $Q_{\max}$  – przepływ maksymalny,  $t_c$  – czas trwania wezbrania,  $t_s$  – czas wznoszenia fali,  $t_{op}$  – czas opadania fali  
 FIGURE 1. Scheme of flood hydrograph:  $Q_A$  – discharge in truncation point,  $Q_p$  – initial discharge,  $Q_{\max}$  – peak discharge,  $t_c$  – duration of rising flood,  $t_{op}$  – duration of depleting flood

## Wyniki

Po przeanalizowaniu wszystkich hydrogramów wezbrań w badanym okresie 1984–2000, ze względu na przyjęte kryterium odcięcia, wybrano 141 wezbrań dla rzeki Branew w profilu Flisy, i 125 wezbrań dla rzeki Czartusowa, w profilu Szklarnia. W pierwszej fazie podzielono je ze względu na okres występowania, zakładając, że są to fale zimowe (roztopowe) i letnie (deszczowe). W przypadku fal zimowych nie wyróżniono roztopowo-opadowych. Następnie dokonano podziału fal ze względu na kształt według Ciepielowskiego (1987) na fale pojedyncze i złożone (tab. 1). W obu rozpatrywanych zlewniach dominowały wezbrania typu roztopowego. W zlewni użytkowanej rolniczo (rzeka Branew) najdłuższe wezbranie wystąpiło w styczniu 1995 roku i trwało 53 dni, ale największa objętość (2820 tys. m<sup>3</sup>) wystąpiła w marcu 1985 roku. Najdłuższe wezbranie w zlewni leśnej (rzeka Czartusowa) trwało 51 dni, miało największą objętość 729 tys. m<sup>3</sup> ze wszystkich badanych fal i również wystąpiło w styczniu 1995 roku.

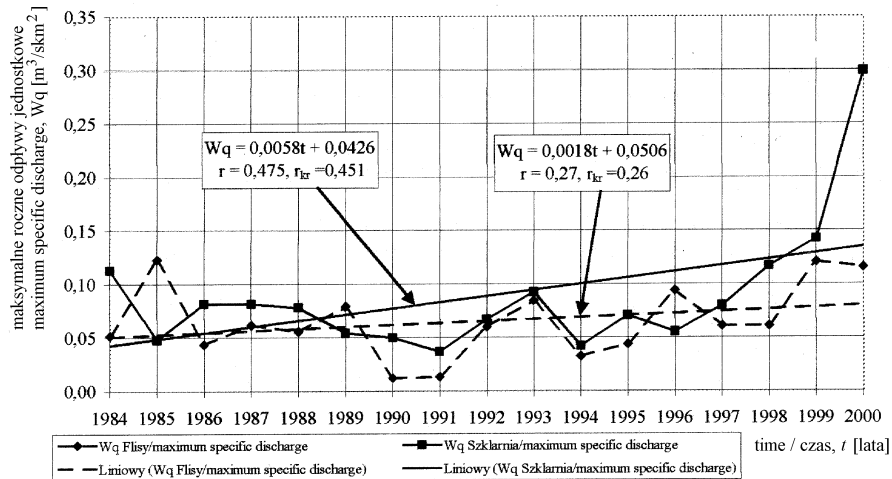
W drugiej fazie przeanalizowano przepływy charakterystyczne pierwszego rzędu, takie jak WQ (przepływ maksymalny roczny), SQ (przepływ średni

roczny), oraz obliczono przepływy drugiego rzędu WWQ (przepływ maksymalny z wielolecia), SWQ (przepływ średni z maksymalnych z wielolecia), SSQ (przepływ średni ze średnich rocznych z wielolecia) NWQ (przepływ minimalny z maksymalnych z wielolecia). Zmiany przepływów maksymalnych charakterystycznych pierwszego rzędu (WQ) wraz z linią trendu opisaną funkcją liniową dla obydwu zlewni zostały przedstawione w artykule Boudulskiego i innych (2005). Zostały również obliczone odpływy jednostkowe  $Wq$  i  $Sq$ . Zmiany maksymalnych odpływów jednostkowych  $Wq$  w okresie 1984–2000 zostały przedstawione na rysunku 2. Zarówno dla zlewni leśnej, jak i rolniczej przepływ maksymalny roczny, jak i odpływ jednostkowy roczny w badanym okresie miał tendencję wzrostową, na co wskazuje dodatnia wartość współczynnika kierunkowego funkcji liniowej linii trendu.

Zostały również przeanalizowane przepływy początkowe ( $Q_p$ ), maksymalne ( $Q_{max}$ ) i w punkcie odcięcia wszystkich fal w określonych strefach przepływów: niskich, średnich i wysokich. Granice stref przepływów wyznaczono metodą analityczną Niesułowskiego, wykorzystując codzienne przepływy z okresu 1984–2000. Następnie sprawdzono, jak będą się kształtować

TABELA 1. Liczebność wezbrań w latach 1984–2000  
TABLE 1. Number of hydrogram in the period 1984–2000

Rodzaj fali Kind of hydrogram	Branew			Czartusowa		
	Okres występowania / Occurrence in period					
	zima winter	lato summer	rok year	zima winter	lato summer	rok year
Pojedyncza / Simple	35	37	72	27	25	52
Złożona / Multiple	59	10	69	55	18	73
Wszystkie / All	94	47	141	82	43	125



RYSUNEK 2. Zmiany maksymalnych rocznych odpływów jednostkowych ( $W_q$ ) w okresie 1984–2000  
 FIGURE 2. Maximum specific discharges ( $W_q$ ) changes in the period 1984–2000

przepływy początkowe ( $Q_p$ ) fal wezbrań w zależności od przepływów w punkcie odcięcia ( $Q_A$ ) i maksymalnych ( $Q_{max}$ ) w odpowiednich strefach przepływów oraz ich kombinacje. Wyniki obliczeń przeprowadzonych dla wszystkich stref przepływów przedstawiono w tabeli 2.

Przepływy początkowe ( $Q_p$ ) w obydwu zlewniach wystąpiły w strefie niskiej i średniej. W strefie średniej zlewni rolniczej było ich dwa razy więcej niż w niskiej, w leśnej zaś stosunek ten wyniósł 1,31. W strefie wysokiej znalazły się wszystkie przepływy maksymalne ( $Q_{max}$ ) zlewni leśnej i połowa przepływów maksymalnych zlewni rolniczej. Druga połowa wystąpiła w strefie średniej, co może być spowodowane mniejszą retencją w zlewni rolniczej i krótszym czasem odpływu. Zarówno dla zlewni rolniczej, jak i leśnej naj-

wieksza ilość przepływów w punkcie odcięcia ( $Q_A$ ) wystąpiła w strefie średniej. Jako jedyne z analizowanych wystąpiły we wszystkich strefach przepływów.

Porównano również liczebność wezbrań, czas trwania wezbrań i objętość wezbrań dla obydwu zlewni. Ze względu na średnią liczbę fal w roku w zlewni rolniczej rzeki Branwi po profil Flisy, występuje średnio o jedną falę więcej niż w zlewni leśnej rzeki Czartusowej, po profil Szklarnię. Może być to spowodowane większą retencją zlewni leśnej. Czas trwania wezbrań w roku zarówno średni jak i maksymalny jest większy w zlewni leśnej niż w rolniczej. Przyczyny można upatrywać w stosunku liczby fal złożonych do pojedynczych, który dla zlewni rolniczej wynosi 0,96, a dla leśnej 1,41.

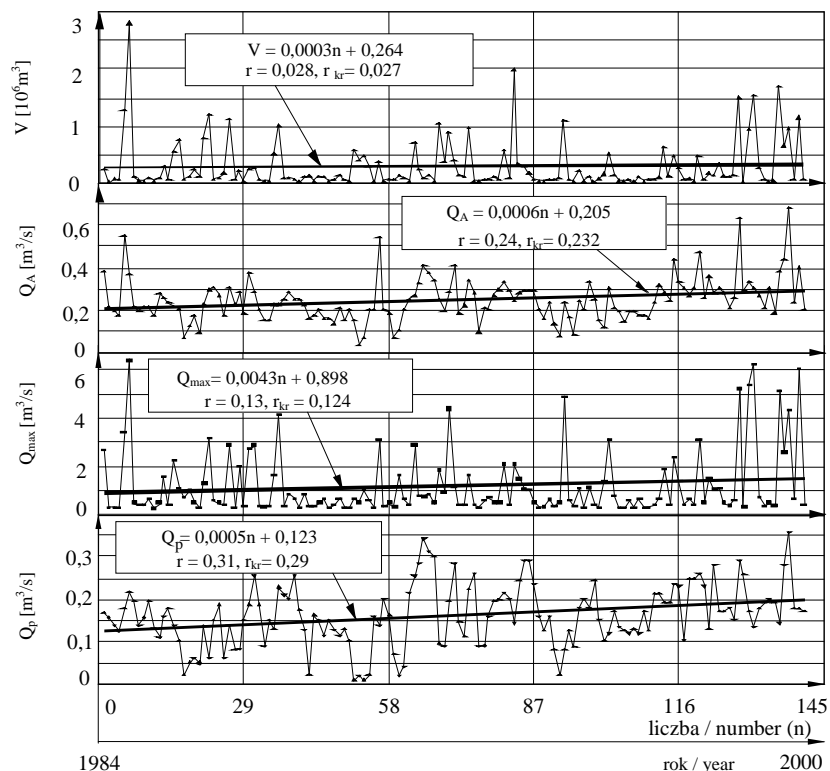
TABELA 2. Liczba wystąpień charakterystycznych przepływów fal wezbraniowych w odpowiednich strefach przepływów  
 TABLE 2. The number occurrence of characteristic hydrograms discharge in suitable discharge zone

Strefy przepływów Zones of discharges	Rzeka Branew w przekroju Flisy Branew River in the Flisy station											Rzeka Czartusowa w przekroju Szklarnia Czartusowa River in the Szklarnia station												
	$Q_p$				$Q_{max}$				$Q_A$			$Q_p$				$Q_{max}$				$Q_A$				
	$Q_p$	strefa	$Q_{max}$	$Q_A$	$Q_{max}$	strefa	$Q_p$	$Q_A$	$Q_A$	strefa	$Q_p$	$Q_{max}$	$Q_p$	strefa	$Q_{max}$	$Q_A$	$Q_{max}$	strefa	$Q_p$	$Q_A$	$Q_A$	strefa	$Q_p$	$Q_{max}$
Wysokich High	0	wysoka	-	-	74	wysoka	-	3	3	wysoka	-	3	0	wysoka	-	-	125	wysoka	-	30	30	wysoka	-	30
		średnia	-	-		średnia	52	66		średnia	3	-		średnia	-	-	średnia	71	83	średnia	15	-		
		niska	-	-		niska	22	5		niska	-	-		niska	-	-	niska	54	12	niska	15	-		
Średnich Average	98	wysoka	52	3	67	wysoka	-	-	127	wysoka	-	66	71	wysoka	71	15	0	wysoka	-	-	83	wysoka	-	83
		średnia	46	95		średnia	46	61		średnia	95	61		średnia	-	46	średnia	-	-	średnia	46	-		
		niska	-	-		niska	21	6		niska	32	-		niska	-	10	niska	-	-	niska	37	-		
Niskich Low	43	wysoka	22	-	0	wysoka	-	-	11	wysoka	-	5	54	wysoka	54	15	0	wysoka	-	-	12	wysoka	-	12
		średnia	21	32		średnia	-	-		średnia	-	6		średnia	-	37	średnia	-	-	średnia	10	-		
		niska	-	11		niska	-	-		niska	11	-		niska	-	2	niska	-	-	niska	2	-		

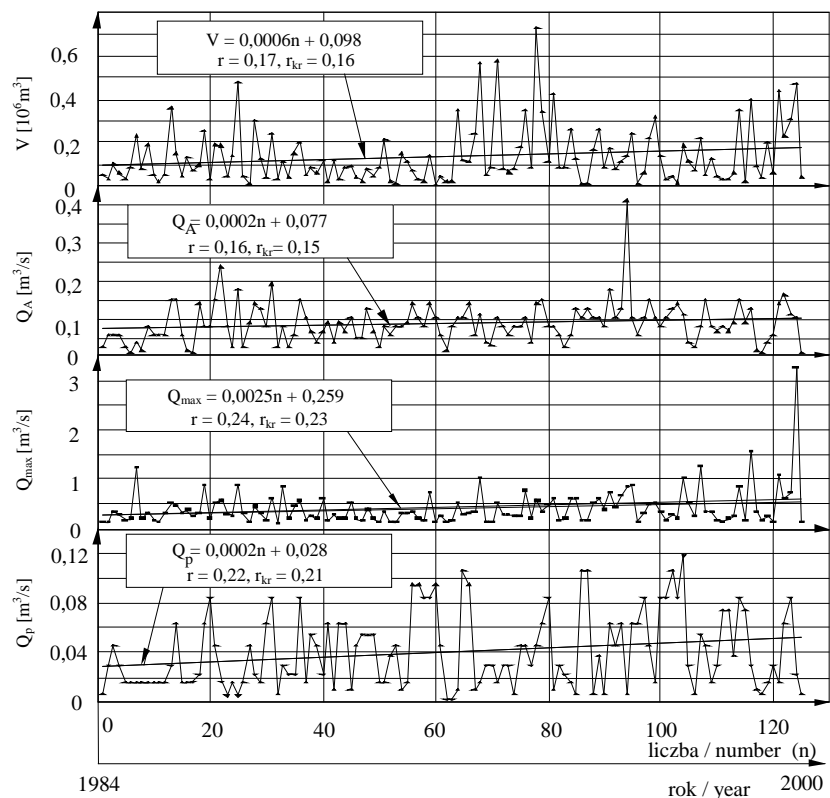
Policzono i porównano średni stosunek całkowitego czasu trwania ( $t_c$ ) do czasu wznoszenia ( $t_s$ ) i tak dla zlewni Flisy stosunek ten wyniósł 2,70, a dla zlewni Szklarnia 2,66. Brak różnic między zlewnią leśną a rolniczą w tym przypadku można wyjaśnić istnieniem rowów melioracyjnych w zlewni leśnej (Ciepielowski i in. 2000). Policzono również średni stosunek przepływów maksymalnych ( $Q_{max}$ ) do przepływów początkowych ( $Q_p$ ). W zlewni rolniczej stosunek ten wyniósł 10,28, a w leśnej 22,16. Różnice te można wyjaśnić sposobem zasilania zlewni. Przepływy rzeki Branwi zasilane są ze źródeł położonych w górze zlewni. Rzeka Czartusowa nie posiada wydajnych źródeł i w okresie

suszy przepływy zasilane są z szybko wyczerpujących się płytkich zasobów wód gruntowych, położonych na warstwie nieprzepuszczalnej. Również może to być spowodowane dwa razy większą średnią liczbą niżówek w roku w zlewni leśnej (Bodulski i in. 2005).

Oprócz analizy zmian rocznych przepływów maksymalnych ( $WQ$ ) i rocznych odpływów jednostkowych ( $Wq$ ), przeanalizowano również dla wszystkich fal wezbraniowych zmiany przepływów maksymalnych ( $Q_{max}$ ), początkowych ( $Q_p$ ) i w punkcie odcięcia ( $Q_A$ ) wraz z objętościami. Linie trendu tych wielkości opisane funkcją liniową dla obydwu zlewni przedstawiono na rysunkach 3 i 4. W każdym z tych



RYSunEK 3. Zmiany przepływów  $Q_p$ ,  $Q_{max}$ ,  $Q_A$  fal wezbraniowych w okresie 1984–2000 w profilu Flisy  
 FIGURE 3. Change discharge  $Q_p$ ,  $Q_{max}$ ,  $Q_A$  in the period 1984–2000 station Flisy



RYSUNEK 4. Zmiany przepływów  $Q_p$ ,  $Q_{max}$ ,  $Q_A$  fal wezbraniowych w okresie 1984–2000 w profilu Szklarnia  
 FIGURE 4. Change discharge  $Q_p$ ,  $Q_{max}$ ,  $Q_A$  in the period 1984–2000 station Szklarnia

przypadków wystąpiła dodatnia wartość współczynnika kierunkowego funkcji liniowej, co wskazuje na wzrost przepływu i objętości w okresie 1984–2000 zarówno dla zlewni rolniczej, jak i leśnej. W obydwu zlewniach największą wartość współczynnika kierunkowego osiągnął dla przepływu maksymalnego ( $Q_{max}$ ), co wskazuje na największy wzrost tego parametru w badanym okresie w stosunku do pozostałych. Nieznacznie większe wartości współczynnika kierunkowego mają równania liniowe, opisujące linię trendu w zlewni Branew użytkowanej rolniczo. Sugeruje

to większy wzrost przepływów charakterystycznych w ciągu badanego okresu.

Zbadano również stopień zależności między głównymi parametrami fal wezbraniowych, jak: przepływ maksymalny ( $Q_{max}$ ), czas trwania ( $t_c$ ) oraz objętość ( $V$ ). Badano związki w następujących parach:  $Q_{max} - t_c$ ,  $Q_{max} - V$ ,  $t_c - V$ , dla których przeanalizowano przebieg linii trendu funkcji liniowej, logarytmicznej, wykładniczej, wielomianowej i potęgowej wraz ze współczynnikiem determinacji (tab. 3).

TABELA 3. Współczynnik determinacji dla związków par parametrów fal wezbraniowych  
TABLE 3. Correlation determination for connection of parameters flood waves

Funkcja Function	Rzeka Branew w przekroju Flisy						Rzeka Czartusowa w przekroju Szklarnia					
	$Q_{\max} - t_c$ [%]	$Q_{\max} - V$ [%]	$t_c - V$ [%]	$t_c - Q_{\max}$ [%]	$V - Q_{\max}$ [%]	$V - t_c$ [%]	$Q_{\max} - t_c$ [%]	$Q_{\max} - V$ [%]	$t_c - V$ [%]	$t_c - Q_{\max}$ [%]	$V - Q_{\max}$ [%]	$V - t_c$ [%]
Liniowa / linear $y = ax + b$	13	72	48	13	72	48	4	40	67	4	40	67
Logarytmiczna / logarithmic $y = a \ln x + b$	15	62	40	19	60	52	12	53	56	6	38	54
Wielomianowa drugiego stopnia / polynomial $y = ax^2 + bx + c$	16	72	48	17	75	52	11	51	67	6	45	67
Potęgową / exponentiating $y = ax^b$	19	76	59	19	76	59	13	65	62	13	65	62
Wykładnicza / exponential $y = ae^{bx}$	19	60	52	15	62	39	6	38	54	12	53	56

Wartość współczynnika determinacji wskazuje, w jakim procencie zmieniana objaśniana zależy od zmiennej objaśniającej. Główne parametry fal wezbraniowych przyporządkowano raz zmiennej objaśnianej ( $y$ ), a drugi raz zmiennej objaśniającej ( $x$ ) (tab. 3). Siła związków wahała się od wartości współczynnika determinacji równej 4% (związek praktycznie nie uwzględnia się) do wartości 76% (związek mocny). Pary  $Q_{\max} - t_c$ ,  $t_c - Q_{\max}$  mieszczą się w granicach od 4 do 19% wartości współczynnika determinacji,  $Q_{\max} - V$ ,  $V - Q_{\max}$  od 40 do 76% i  $t_c - V$ ,  $V - t_c$  od 39 do 67%. W dziesięciu przypadkach na dwanaście największą wartość współczynnika determinacji uzyskano w przypadku funkcji potęgowej.

## Wnioski

1. W zlewni rolniczej wystąpiło więcej wezbrań, niezależnie od rodzaju, niż w zlewni leśnej. Natomiast wezbrań złożonych było więcej w zlewni leśnej.
2. Współczynnik kierunkowy funkcji liniowej, którą była opisana linia trendu dla jednostkowych odpływów maksymalnych ( $Wq$ ), posiada wartość dodatnią, co wskazuje na wzrost przepływów w badanym okresie (rys. 2).
3. Wszystkie przepływy maksymalne analizowanych fal wezbraniowych w zlewni leśnej znajdowały się w strefie przepływów wysokich. W zlewni rolniczej przepływy maksymalne znajdowały się w strefie przepływów wysokich i średnich.



4. W obu rozpatrywanych zlewniach przepływy maksymalne ( $Q_{\max}$ ), początkowe ( $Q_p$ ) i w punkcie odcięcia ( $Q_A$ ) oraz objętości fal wezbraniowych ( $V$ ) dla wszystkich rozpatrywanych fal mają tendencje wzrostową.
5. Najsilniejszy związek głównych parametrów fal wezbraniowych we wszystkich rozpatrywanych funkcjach wykazują  $Q_{\max} - V$ , a najsilniejsze zależności współczynnik determinacji wykazuje w funkcji potęgowej.
6. Średni stosunek przepływu maksymalnego ( $Q_{\max}$ ) do przepływu początkowego ( $Q_p$ ) w badanych falach wezbraniowych jest dwa razy większy w zlewni leśnej niż w rolniczej.
7. Z przeprowadzonych analiz wynika tendencja wzrostu przepływów maksymalnych rocznych (WQ) oraz przepływów kulminacyjnych ( $Q_{\max}$ ), początkowych ( $Q_p$ ) i w punkcie odcięcia ( $Q_A$ ) dla wszystkich fal wezbraniowych niezależnie od charakteru zlewni.

wości zwiększenia retencji wodnej na obszarach leśnych Obrędu Władysławów w Lasach Janowskich. Przegląd Naukowy WIKŚ. Wydaw. SGGW, Warszawa.

- KACZMAREK Z. 1970: Metody statystyczne w hydrologii i meteorologii. WKiŁ, Warszawa.
- KONDRACKI J. 2000: Geografia regionalna Polski. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- LAMBOR J. 1965: Podstawy i zasady gospodarki wodnej. PIHM. WKiŁ, Warszawa.
- LASKOWSKI R. 1998: Charakterystyka fizyczno-geograficzna dorzecza rzeki Bukowej. Mapa, ArcView.
- RÉMENIERAS G. 1977: Hydrologie de l'Ingénieurs (nouveau tirage).
- SOBCZYK M. 2004: Statystyka. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- TRAMPLER T. 1990: Regionalizacja przyrodniczo-leśna na podstawach ekologiczno-fizjograficznych. PWRiL, Warszawa.

## Podziękowania

Serdecznie dziękuję Zakładowi Siedliskoznawstwa IBL za udostępnienie danych hydrologicznych oraz mgr. inż. Robertowi Laskowskiemu za udostępnienie charakterystyk fizyczno-geograficznych badanych zlewni.

## Literatura

- BODULSKI J., CIEPIEŁOWSKI A., DĄBKOWSKI S.L., GŁOGOWSKA E. 2005: Badania dynamiki zmian natężenia przepływu wód powierzchniowych w zlewni użytkowanej rolniczo i leśnie. *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumietus* (w druku).
- BYCZKOWSKI A. 1999: Hydrologia. Tom II. Wydaw. SGGW, Warszawa.
- CIEPIEŁOWSKI A. 1987: Badania związków pomiędzy podstawowymi parametrami fal wezbraniowych w wybranych profilach rzek. Wydawnictwo SGGW-AR, Warszawa.
- CIEPIEŁOWSKI A., DĄBKOWSKI Sz.L., LASKOWSKI R., POPEK Z. 2000: Możli-

## Summary

**The comparison trends of changes hydrogram's elements drainage areas used agriculturally and forest.** At work was analysed impact different use on out-flow drainage area. The investigations were guided in two drainage areas of the river Bukowa: Branew to profile Flisy used agriculturally and Czartusowa to Szklarnia typically forest. On the ground it the maximum discharges in period 1984–2000. From analyses is resulting the tendency of the increase in maximum annual discharges of WQ and maximum  $Q_{\max}$  discharges for all

hydrograms in irrespective of the character of the drainage area.

Hydrograms were more often they showing up in the agricultural drainage area and like in the forest drainage area is two times more in the winter half of the year than in summer. Ratio of the number of hydrogram multiple to single is bigger than

in the forest drainage area than in the agricultural drainage area.

**Author's address:**

Jarosław Bodulski  
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach  
Katedra Inżynierii Wodnej  
25-314 Kielce, al. 1000-lecia Państwa Polskiego 7  
Poland