

## **CZASOWA I PRZESTRZENNA MAKROSKALA TURBULENCJI STRUMIENIA W DWUDZIELNYM TRAPEZOWYM KORYCIE Z DRZEWAMI NA TERENACH ZALEWOWYCH**

Adam Paweł Kozioł

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono makroskalę czasową i przestrzenną turbulencji strumienia wody obliczone na podstawie chwilowych wartości podłużnej składowej prędkości w pionach dwudzielnego trapezowego przekroju koryta. Chwilowe wartości prędkości mierzono w korycie głównym i na terenie zalewowym dla różnych napełnień. Wyniki obliczeń makroskali turbulencji przedstawiono dla koryta głównego i terenów zalewowych z drzewami i bez. Badania wykazały, że wartości makroskali czasowej zmieniają się w przedziale od 0,1 do 1,2 s. We wszystkich wariantach, niezależnie od głębokości występują jednakowe tendencje wartości względnej długości makrowirów na głębokości. Względne długości makrowirów (0,1–2,5) są większe na terenach zalewowych niż w korycie głównym, gdzie wartości nie przekraczają 1,2 głębokości. Największe długości makrowirów stwierdzono na terenie zalewowym w pobliżu koryta głównego w obrębie interaktywności strug cieczy. Najmniejsze makrowiry występują nad dnem koryta głównego.

**Słowa kluczowe:** koryta otwarte, koryta złożone, turbulencja, wiry, pomiary

### **WSTĘP**

Badania turbulentnej struktury strumienia w korytach rzek, odznaczające się niezwykłą złożonością, traktowane są jako jedne z najważniejszych w hydraulice koryt rzecznych. Stanowią one istotne wyzwanie dla badaczy procesów fizycznych w rzekach. Turbulencja jest zjawiskiem nieliniowym, zmiennym w przestrzeni i w czasie. Turbulentny strumień cieczy w korycie o złożonym przekroju charakteryzuje się chaotycznym i intensywnym mieszaniem mas cieczy, w której prędkości zmieniają swe wartości i kierunki. Te zmiany prędkości w czasie w ustalonym punkcie przestrzeni, zwane pulsacjami prędkości, wywołane są przemieszczającymi się przez ten punkt turbulentnymi strukturami wirowymi, których rozmiary zmieniają się w sposób ciągły. Wiry wielkoskalowe szybko rozpadają

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: dr inż. Adam Paweł Kozioł, Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: adam\_kozioł@sggw.pl.

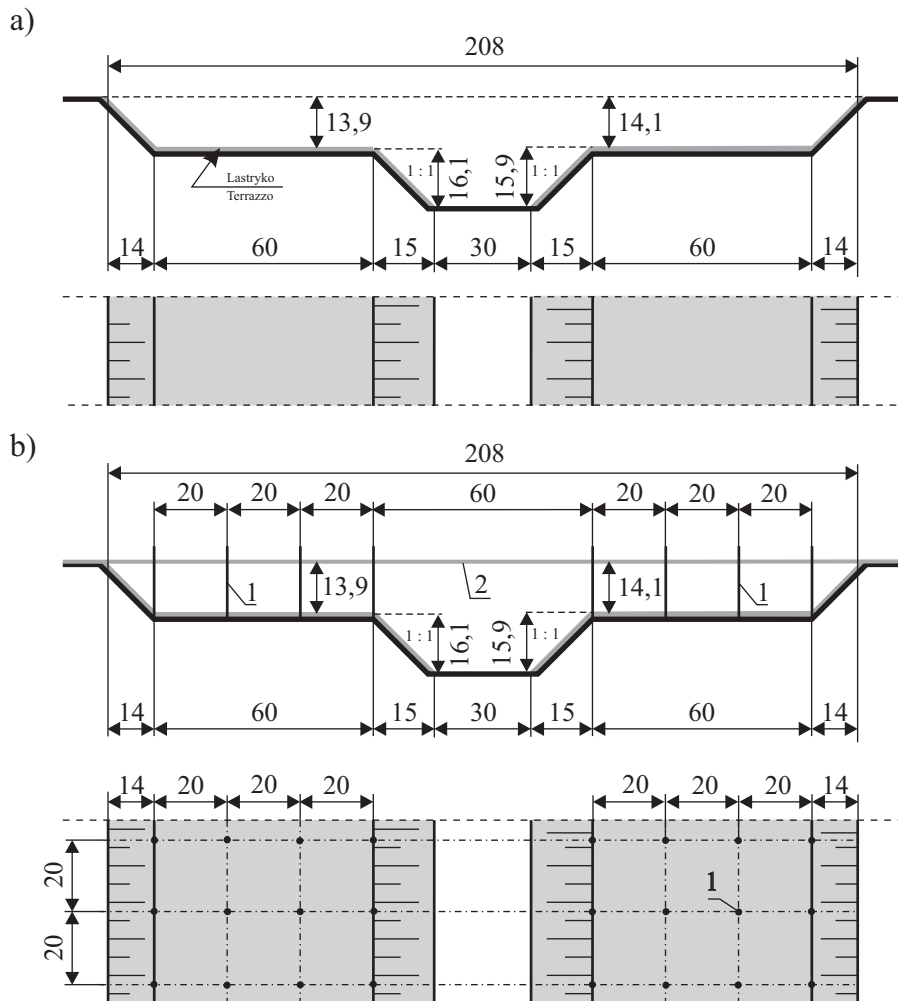
się na mniejsze, a te dalej na jeszcze mniejsze. Końcowym etapem przenoszenia energii kinetycznej wirów jest jej zamiana na energię kinetyczną ruchu molekularnego, czyli ciepło. Im mniejszy rozmiar wiru, tym większy gradient prędkości w wirze, a także naprężenie styczne przeciwdziałające ruchowi wirowemu. Analizę procesu wewnętrznego transportu turbulენტnej energii kinetycznej umożliwiają funkcje autokorelacyjne i spektralne prędkości. Funkcja autokorelacyjna przepływów turbulენტnych dostarcza informacji o skalach czasowych największych wirów. Na ich podstawie obliczono makroskale czasowe, które umożliwia określenie długości makrowirów. Opisane zjawiska nasilają się, gdy w terenie występuje roślinność.

O wadze procesów turbulენტnych świadczy znacząca liczba publikacji w literaturze fachowej. Badania turbulencji strumienia koryt podejmuje się w wielu ośrodkach na całym świecie. Prowadzone są one najczęściej na małoskalowych modelach o przekrojach jednodzielnych [np. Nepf 1999], znacznie rzadziej na modelach wielkoskalowych, a stosunkowo nieliczne w przekrojach wielodzielnych [Nezu i Rodi 1986, Knight i Shiono 1990, Rowiński i in. 2002]. W latach 1997–2006 w Katedrze Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie w laboratorium hydraulicznym prowadzono badania nad strukturą turbulენტnego przepływu w korycie o złożonym trapezowym przekroju poprzecznym. Badania dotyczyły jedno- i trójwymiarowych pomiarów prędkości, podstawowych parametrów turbulencji oraz struktury turbulencji z roślinnością i bez niej na terenach zalewowych [Kozioł i in. 1998, Rowiński i in. 1998, Kozioł 2002, 2008, Rowiński i in. 2002, Czernuszenko i in. 2007] oraz struktur koherentnych [Czernuszenko i Rowiński 2008].

## METODY I ZAKRES BADAŃ

Charakterystyki turbulencji strumienia wody obliczono na podstawie pomierzonych chwilowych wartości podłużnej składowej prędkości w pionach dwudzielnego trapezowego przekroju koryta. Pomiary chwilowych składowych prędkości w korycie o złożonym trapezowym przekroju poprzecznym wykonano w betonowym korycie o długości 16 m i szerokości górą 2,08 m, z symetrycznymi terenami zalewowymi. Podłużny spadek dna koryta głównego i terenów zalewowych był stały i równy 0,5‰ [Kozioł 1999]. Schemat przekroju poprzecznego badanego koryta przedstawiono na rys. 1. Powierzchnia dna koryta głównego była gładka, natomiast powierzchnia skarp koryta głównego oraz terenów zalewowych została pokryta warstwą lastryko o średnicy ziaren od 0,5 do 1 cm położoną na zaprawie cementowej. Wartości absolutnej chropowatości powierzchni koryta wyznaczono metodą pośrednią ze wzoru Colebrooka-White'a na podstawie średnich prędkości przepływu w tych częściach koryta. Otrzymano wartości absolutnej chropowatości  $k_s = 0,00005$  m dla powierzchni gładkiej oraz  $k_s = 0,0074$  m dla powierzchni szorstkich lewego terenu zalewowego i  $k_s = 0,0124$  dla powierzchni prawego terenu zalewowego.

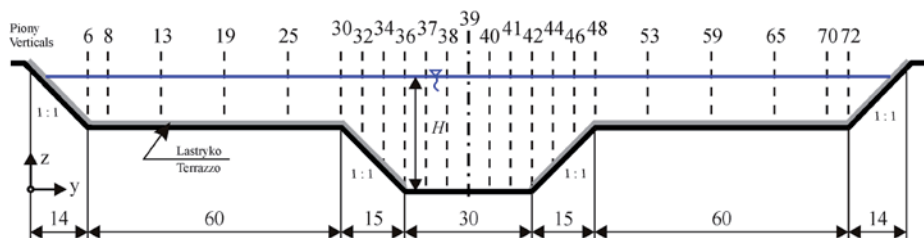
Chwilowe składowe prędkości przepływu w przekroju koryta rejestrowano sondą ADV w 250 punktach pomiarowych położonych w 23 pionach pomiarowych (rys. 2) w warunkach ustalonego przepływu w korycie. Wartości prędkości pomierzono dla pięciu doświadczeń w dwóch analizowanych wariantach badań (tab. 1). W wariancie 1, 1.1 i 1.2 pomiary wykonywano bez drzew na terenach zalewowych, a w wariancie 2 i 2.1 na tere-



Rys. 1. Schemat przekroju poprzecznego badanego koryta: a – warianty 1, 1.1 i 1.2, b – wariant 2 i 2.1 z elementami modelującymi drzewa; 1 – pręty, 2 – listwy utrzymujące pręty (wymiar w cm)

Fig. 1. Cross-section of a compound channel: a – tests 1, 1.1 and 1.2, b – tests 2 and 2.1 with elements modelling trees; 1 – round rod, 2 – slats holding rods (dimensions in cm)

nach zalewowych rozmieszczono elementy modelujące drzewa (rys. 1) – były to sztywne aluminiowe rurki o średnicy 8,0 mm, mocowane z wykorzystaniem drewnianych belek umieszczonych nad korytem prostopadle do jego osi. Rozmieszczenie drzew na terenach zalewowych było regularne, tzn. w oczkach siatki 0,20 × 0,20 m. W przekrojach poprzecznych koryta znajdowało się po 8 drzew, a na całym modelu w 81 przekrojach było ich 648.



Rys. 2. Piony pomiarowe (wymiary w cm)

Fig. 2. Measuring verticals (dimensions in cm)

Tabela 1. Charakterystyka hydraulicznych doświadczeń prowadzonych w korycie

Table 1. Hydraulic parameters of investigations in the channel

Parametr Parameter	Wariant Test				
	1	1.1	1.2	2	2.1
Przepływ $Q$ , $l \cdot s^{-1}$ Discharge $Q$ , $l \cdot s^{-1}$	95,2	81,1	61,45	65,7	58,9
Głębokość w korycie głównym $H$ , cm Depth in main channel $H$ , cm	28,3	26,4	24,1	28,0	26,3
Średnia głębokość na terenie zalewowym, cm Mean depth on flood plain, cm	12,3	10,4	8,1	12,0	10,3

## WYNIKI

### Czasowa makroskala Eulera

Do określenia czasowej makroskali turbulencji Eulera  $T_E$  konieczne jest obliczenie funkcji autokorelacyjnej  $R$ . Czasowa funkcja autokorelacyjna  $R(k\Delta t)$  charakteryzuje stopień zależności między pulsacjami prędkości pomierzonymi w wybranym punkcie przepływu w różnych chwilach czasowych. Jej wartości estymowano zależnością [Czernuszenko i Lebiecki 1989]:

$$R(k\Delta t) = \frac{1}{u'^2} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-k} u_i \quad k = 0, 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

gdzie:

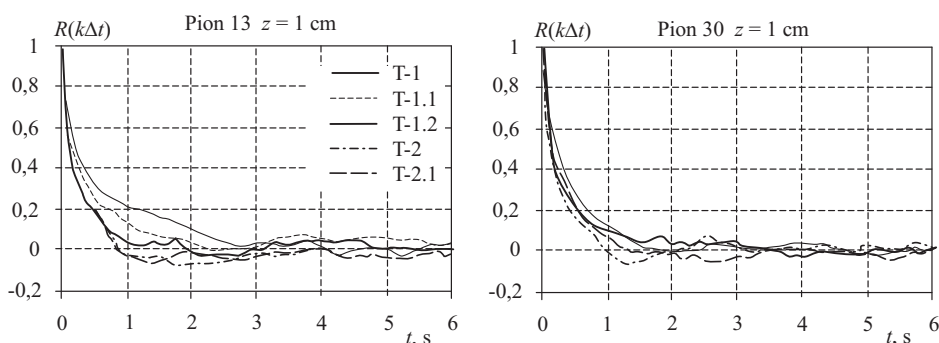
$M$  – punkt obcięcia funkcji autokorelacyjnej,

$$\overline{u'^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - U)^2$$

$u_i$  – chwilowa wartość prędkości,

$U$  – uśredniona wartość prędkości.

W przeprowadzonych pomiarach składowych prędkości czas próbkowania  $\Delta t$  sondą ADV wynosił 0,04 s. Przykładowe obliczone czasowe funkcje autokorelacyjne przedstawiono na rysunku 3. Mają one podobną zmienność niezależnie od położenia punktu pomiarowego. Wartości funkcji autokorelacyjnych szybko maleją z upływem czasu, a następnie nieregularnie oscylują wokół zera. W przeprowadzonych badaniach czasu osiągnięcia wartości zero przez funkcję autokorelacyjną zawierają się w przedziale od 0,8 do 12 sekund w korycie bez drzew, a na terenach zalewowych z drzewami od 0,3 do 3,1 s. Wyniki obliczeń dla poszczególnych obszarów koryta i wariantów badań zamieszczono w tabeli 2.



Rys. 3. Przykładowe czasowe funkcje autokorelacyjne obliczone dla pięciu wariantów badań:  $z$  – odległość punktu pomiarowego od dna, od T-1 do T-2.1 – numery wariantów  
 Fig. 3. Example time autocorrelation functions calculated for five tests:  $z$  – distance of the measuring point from the bed, T-1 to T-2.1 – test numbers

Tabela 2. Czasy  $t$  osiągnięcia wartości zero przez funkcję autokorelacyjną i makroskale czasowe  $T_E$  w doświadczeniach z pięciu wariantów badań  
 Table 2. Times  $t$  of achieving the zero value by the autocorrelation function and the time macroscales  $T_E$  for five tests

Obszar Area	Wariant 1 Test 1 $H = 0,283$ m		Wariant 1.1 Test 1.1 $H = 0,264$ m		Wariant 1.2 Test 1.2 $H = 0,241$ m		Wariant 2 Test 2 $H = 0,28$ m		Wariant 2.1 Test 2.1 $H = 0,263$ m	
	$t, s$	$T_E, s$	$t, s$	$T_E, s$	$t, s$	$T_E, s$	$t, s$	$T_E, s$	$t, s$	$T_E, s$
	Lewy teren zalewowy Left flood plain	0,9–7,0	0,1–0,6	0,8–4,8	0,1–0,7	1,1–6,0	0,1–0,7	0,6–3,1	0,1–0,5	0,5–2,4
Koryto główne Main channel	1,0–12,0	0,1–1,2	0,9–6,1	0,1–0,6	1,0–4,7	0,1–0,6	0,3–2,3	0,1–0,5	0,9–2,4	0,1–0,5
Prawy teren zalewowy Right flood plain	0,8–5,7	0,1–0,6	0,8–4,9	0,1–0,7	1,0–3,7	0,1–0,6	0,7–2,5	0,1–0,4	0,7–1,8	0,2–0,4

Na podstawie funkcji autokorelacyjnych obliczono makroskale czasowe Eulera  $T_E$ :

$$T_E = \int_0^{\infty} R(k\Delta t) \quad (2)$$

stanowiące w przepływie turbulentnym miarę najwolniejszych zmian, za które odpowiedzialne są wiry o największej skali. W przeprowadzonych obliczeniach wartości makroskali czasowej Eulera zmieniają się w przedziale od 0,1 do 1,2 s w korycie bez drzew i od 0,1 do 0,5 s tam, gdzie na terenach zalewowych znajdują się drzewa (tab. 2). Obliczone wartości makroskali czasowej na terenach zalewowych i w korycie głównym dla pięciu wariantów zamieszczono w tabeli 2.

### Przestrzenna makroskala turbulencji (długość makrowirów w strumieniu)

Dla stacjonarnego i jednorodnego przepływu turbulentnego o prędkości średniej w punkcie przewyższającej znacznie pulsacje prędkości istnieje, zgodnie z hipotezą Taylora, ścisły związek między czasowymi a przestrzennymi eulerowskimi funkcjami autokorelacyjnymi [Elsner 1987]. Hipoteza Taylora o „zamrożonym” charakterze struktur wirowych zakłada, że w przepływie homogenicznym o niskim poziomie intensywności turbulencji ( $v'/\bar{v} \ll 1$ ) prędkość unoszenia wirów o różnych długościach jest identyczna i równa prędkości przepływu średniego, w związku z czym kształt struktur wirowych przenoszonych w ruchu średnim może być traktowany jako „zamrożony” w okresie  $t$ , jeżeli tylko wartość  $t$  nie jest zbyt duża. Ze związku Taylora między przestrzenną  $L$  a czasową  $T_E$  makroskalą turbulencji wynika zależność, z której oblicza się średnią podłużną długość makrowirów  $L$  występujących w korycie:

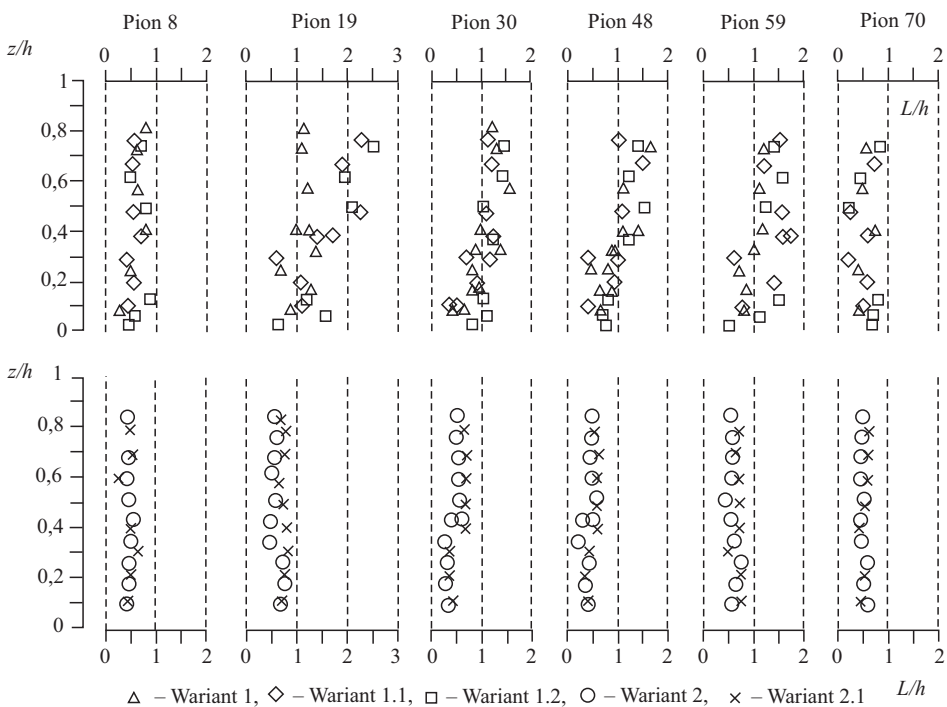
$$L = \bar{v}T_E \quad (3)$$

Zmiany względnej długości największych makrowirów na względnej głębokości obliczone w wybranych punktach pionów pomiarowych na terenach zalewowych oraz w korycie głównym na skarpace i na dnie pokazano odpowiednio na rysunkach 4–6. Obliczone średnie podłużne długości makrowirów  $L$  (makroskala przestrzenna) oraz względne długości makrowirów  $L/h$  ( $h$  – głębokość w analizowanym pionie) dla analizowanych wariantów zamieszczono w tabeli 3.

Rozkład podłużnych długości makrowirów w pionie nie ujawnia jednakowej stałej tendencji zmian dla całego przekroju poprzecznego koryta. W pionie długości wirów albo rosną ze wzrostem odległości od dna albo oscylują wokół stałej wartości. W wariantach bez drzew oraz z drzewami, niezależnie od głębokości  $H$ , występują jednakowe tendencje względnej długości makrowirów na głębokości. Na obu terenach zalewowych bez drzew (wariant 1–1.2) względne długości makrowirów rosną ze wzrostem odległości od dna (rys. 4). Przy skarpace terenu zalewowego wzrost ten jest nieznaczny, a wartości względnej długości makrowirów zmieniają się od 0,1 do 2,5 głębokości strumienia. Występowanie drzew na terenach zalewowych spowodowało, że względne długości makrowirów nie zmieniają się w pionie na głębokości, a wartości w przekroju zawierają się w przedziale od 0,1 do 0,8 głębokości strumienia.

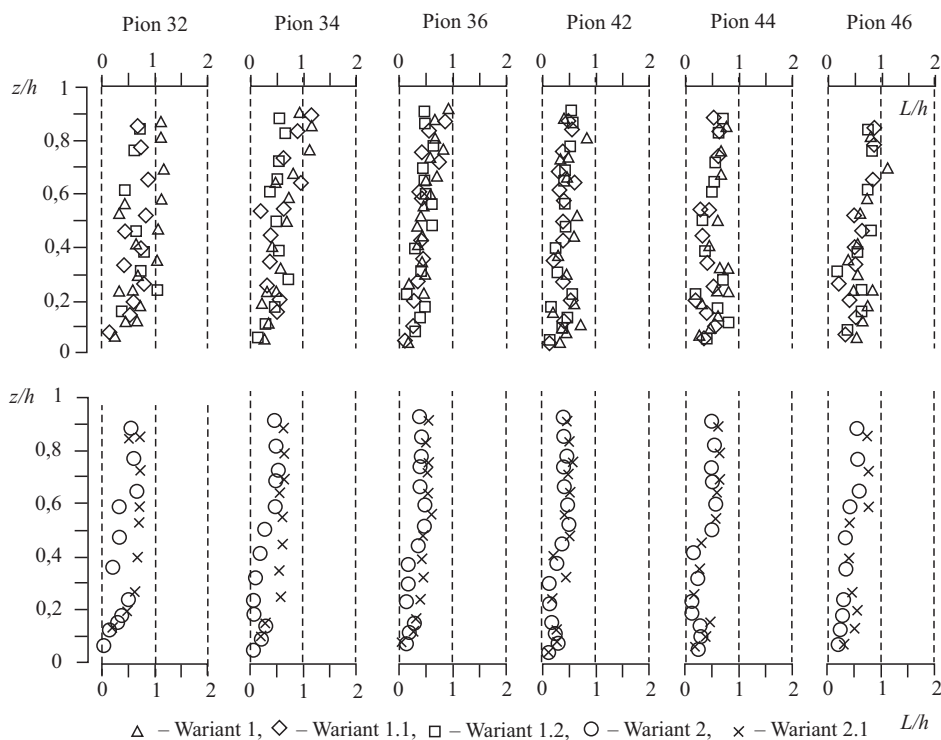
Tabela 3. Obliczone podłużne długości makrowirów  $L$  (makroskala przestrzenna)  
 Table 3. Calculated longitudinal sizes of largest eddies  $L$  (spatial macroscale)

Obszar Area	Wariant 1 Test 1		Wariant 1.1 Test 1.1		Wariant 1.2 Test 1.2		Wariant 2 Test 2		Wariant 2.1 Test 2.1	
	$L$ , cm	$L/h$	$L$ , cm	$L/h$	$L$ , cm	$L/h$	$L$ , cm	$L/h$	$L$ , cm	$L/h$
Lewy teren zalewowy The left flood plains	4–19	0,3–1,6	2–24	0,2–2,3	4–20	0,5–2,5	2–9	0,2–0,8	1–8	0,1–0,8
Koryto główne The main channel	3–26	0,1–1,2	2–21	0,1–1,2	2–17	0,1–1,0	1–13	0,2–0,7	1–15	0,1–0,8
Prawy teren zalewowy The right flood plains	1–23	0,1–1,2	2–24	0,1–2,3	2–13	0,2–1,6	2–9	0,2–0,8	1–8	0,1–0,7



Rys. 4. Przykładowe rozkłady długości podłużnych makrowirów na terenach zalewowych  
 Fig. 4. Example distributions of the longitudinal sizes of largest eddies on flood plains

Na skarpach koryta głównego we wszystkich wariantach występuje identyczna tendencja zmian (rys. 5), względne długości makrowirów rosną ze wzrostem odległości od dna, a wartości zmieniają się od 0,1 do 1,2 głębokości strumienia. Nad dnem koryta głównego w wariantach 1–1.2 względne długości makrowirów nie zmieniają się i oscylują w pobliżu 0,5 głębokości strumienia (rys. 6). W wariantach 2 i 2.1 względne długości makrowirów blisko skarp rosną ze wzrostem odległości od dna, natomiast w centralnej



Rys. 5. Przykładowe rozkłady długości podłużnych makrowirów na skarpach koryta głównego  
 Fig. 5. Example distributions of the longitudinal sizes of largest eddies on slopes of the main channel

części koryta głównego do 0,2  $z/h$  rosną do około 0,28  $L/h$ , a powyżej się nie zmieniają. Względne długości makrowirów są większe na terenach zalewowych niż w korycie głównym, największe na terenie zalewowym występują w pobliżu koryta głównego, a najmniejsze nad dnem koryta głównego.

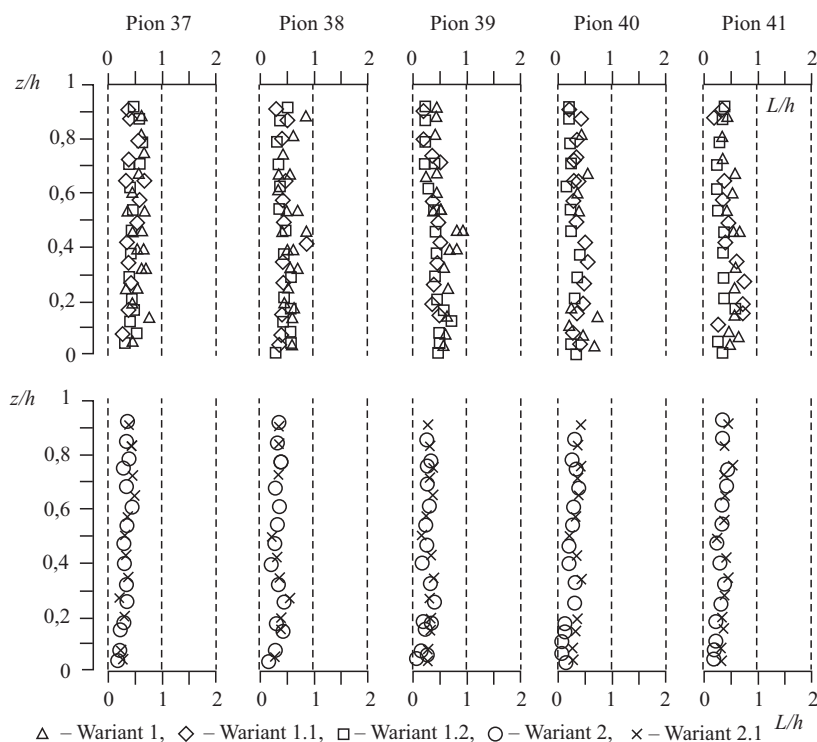
Wyznaczone w laboratoryjnych badaniach wartości względne długości makrowirów są zgodne z wartościami podanymi w literaturze, uzyskanymi przez innych badaczy w wyniku pomiarów prowadzonych w laboratoriach oraz w rzekach [np. Nikora i in. 1994, Nikora i Smart, 1997, Rowiński i in. 1998], gdzie względne długości makrowirów sięgają nawet czterokrotnej głębokości strumienia.

## PODSUMOWANIE

Analiza pomierzonych chwilowych prędkości w korycie o złożonym przekroju poprzecznym wykazała, że:

- czasy osiągnięcia wartości zero przez funkcję autokorelacyjną zawierają się w przedziale od 0,8 do 12 s w korycie bez drzew oraz od 0,3 do 3,1 s z drzewami na terenach zalewowych,





Rys. 6. Rozkłady długości podłużnych makrowirów w korycie głównym

Fig. 6. Distributions of the longitudinal sizes of largest eddies in the main channel

- obliczone wartości makroskali czasowej Eulera zmieniają się w przedziale od 0,1 do 1,2 s, w korycie bez drzew oraz od 0,1 do 0,5 s, a z drzewami na terenach zalewowych,
- we wszystkich wariantach badań, niezależnie od głębokości, występują jednakowe tendencje zmian długości makrowirów,
- na terenach zalewowych bez drzew wartości względne długości makrowirów rosną ze wzrostem odległości od dna i zmieniają się od 0,1 do 2,5 głębokości strumienia, a pojawienie się drzew na terenach zalewowych powoduje, że długości nie zmieniają się na głębokości i zawierają się w przedziale od 0,1 do 0,8 głębokości strumienia,
- na skarpach koryta głównego we wszystkich wariantach badań wartości makrowirów rosną ze wzrostem odległości od powierzchni skarpy, a względne długości zmieniają się od 0,1 do 1,2 głębokości strumienia,
- nad dnem koryta głównego wartości makrowirów nie zmieniają się w wariantach bez drzew i oscylują wokół 0,5 głębokości strumienia, a w wariantach z drzewami blisko skarp rosną ze wzrostem odległości od dna, natomiast w centralnej części koryta głównego do 0,2  $z/h$  rosną do około 0,28  $L/h$ , a powyżej się nie zmieniają,
- względne długości makrowirów są większe na terenach zalewowych niż w korycie głównym – największe na terenie zalewowym występują w pobliżu koryta głównego, a najmniejsze nad dnem koryta głównego.

## PIŚMIENNICTWO

- Czernuszenko W., Kozioł A., Rowiński P. M., 2007. Measurements of 3D turbulence structure in a compound channel. *Arch. Hydro-Eng. Environ. Mech.* 54(1), 55–73.
- Czernuszenko W., Lebiecki P., 1989. Turbulencja w przepływach rzecznych. *Arch. Hydrotech.* 36(1–2), 17–34.
- Czernuszenko W., Rowiński P. M., 2008. Shear stress statistics in a compound channel flow. *Arch. Hydro-Eng. Environ. Mech.* 55(1–2), 3–27.
- Elsner J.W., 1987. *Turbulencja przepływów*. PWN Warszawa.
- Knight D.W., Shiono K., 1990. Turbulence measurements in a shear layer region of a compound channel. *J. Hydraul. Res.* 28(2), 175–196.
- Kozioł A., 1999. Badania laboratoryjne warunków przepływu w korytach o złożonych przekrojach poprzecznych porośniętych roślinnością wysoką. Rozprawa doktorska. SGGW Warszawa.
- Kozioł A., 2002. Mikrowiry Kołmogorowa w korycie o złożonym przekroju poprzecznym. *Wiad. IMiGW* 25(46), 1, 37–42.
- Kozioł A., 2008. Badanie czasowej i przestrzennej makroskali turbulencji w korycie o złożonym przekroju poprzecznym. *Acta Sci. Pol., Architectura* 7(4), 15–23.
- Kozioł A., Kubrak J., Kuśmierczuk K., 1998. Charakterystyki turbulencji strumienia w korycie o złożonym przekroju poprzecznym. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 458, 75–87.
- Nepf H.M., 1999. Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation. *Water Resour. Res.* 35(2), 479–489.
- Nezu I., Rodi W., 1986. Open-channel flow measurements with a Laser Doppler Anemometer. *J. Hydraul. Eng.* 112(5), 335–355.
- Nikora V.I., Rowiński P., Suchodolov A., Krasuski D., 1994. Structure of river turbulence behind warm-water discharge. *J. Hydraul. Eng.* 120(2), 191–208.
- Nikora V.I., Smart G.M., 1997. Turbulence characteristics of New Zealand gravel-bed rivers. *J. Hydraul. Eng.* 123(1), 764–773.
- Rowiński P., Czernuszenko W., Kozioł A., Kuśmierczuk K., Kubrak J., 1998. Longitudinal turbulence characteristics in a compound channel under various roughness conditions. *Proc. 3rd Int. Conf. on Hydro-Science and -Engineering*, Cottbus/Berlin, Germany.
- Rowiński P., Czernuszenko W., Kozioł A., Kubrak J., 2002. Properties of a streamwise turbulent flow field in an open two-stage channel. *Arch. Hydro-Eng. Environ. Mech.* 49, 2, 37–57.

## TEMPORAL AND SPATIAL MACROSCALE OF TURBULENCE IN A COMPOUND CHANNEL WITH TREES ON FLOOD PLAINS

**Abstract.** Investigations of the time and spatial macro-scale of the present paper are based on the measurements of instantaneous velocities in a two-stage trapezoidal channel under five various tests in the channel. The results of calculations of macro-scale of turbulence were showed for the main channel and floodplains with trees and without. These investigations have shown the following: the values of time macro-scale have changed in range since 0.1 to 1.2 s; in all five tests the distributions of the sizes of the eddies reveal stable regularity; the relative length of eddies are bigger on the floodplains and achieve value of 0.1 to 2.5 of the flow depths on the flood plains, whereas in the main channel the sizes of largest eddies do not exceed the value of 1.2 of the total water depth. The largest lengths of eddies were affirmed on the floodplains in vicinity of the main channel in zone of interaction. The smallest eddies are over the bottom of the main channel.

**Key words:** open channel, compound channel, turbulence, eddy, measurements

*Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 8.04.2010*