

BADANIE CZASOWEJ I PRZESTRZENNEJ MAKROSKALI TURBULENCJI W KORYCIE O ZŁOŻONYM PRZEKROJU POPRZECZNYM

Adam P. Kozioł

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. Przedstawiono czasową i przestrzenną makroskalę turbulencji obliczoną na podstawie pomierzonych chwilowych wartości podłużnej składowej prędkości w pionach dwudzielnego trapezowego przekroju koryta. Chwilowe wartości prędkości mierzono w korycie głównym i na terenie zalewowym dla trzech napełnień. Badania wykazały, że czas osiągnięcia wartości zero przez funkcję autokorelacyjną wynosił od 0,78 do 11,98 s, a wartości makroskali czasowej zmieniają się w przedziale od 0,07 do 1,15 s. W trzech 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, na terenie zalewowym największe występują w pobliżu koryta głównego, a najmniejsze nad dnem koryta głównego.

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

WSTĘP

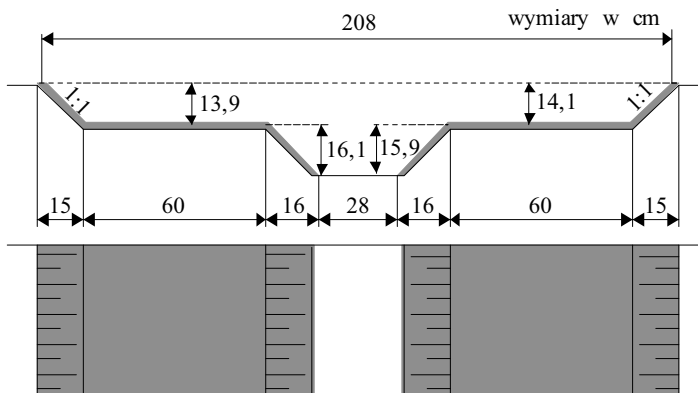
Turbulencja jest zjawiskiem nieliniowym, zmiennym w przestrzeni i w czasie. Turbulentny strumień cieczy charakteryzuje się chaotycznym i intensywnym mieszaniem mas cieczy, w której prędkości zmieniają swe wartości i kierunki w czasie. Poznanie kinematycznej i dynamicznej struktury strumienia wody przepływającego, zwłaszcza w złożonym korycie, stanowi warunek wyjaśnienia wielu procesów zachodzących podczas przepływu. Na szczególną uwagę zasługuje zdolność transportowa strumienia wody, przepustowość koryta oraz wymiana masy i pędu pomiędzy częściami koryta o zróżnicowanej prędkości. Badania turbulentnej struktury strumienia w korytach rzek, pomimo swej niezwyklej złożoności, traktowane są jako jedne z ważniejszych w hydraulice koryt rzecznych i stanowią niewątpliwie jedno z najistotniejszych wyzwań dla badaczy proce-

sów fizycznych w rzekach. O wadze procesów turbulentnych świadczy znacząca liczba publikacji w literaturze fachowej. Na podstawie dostępnych publikacji stwierdzić można, że badania turbulencji prowadzone są w wielu ośrodkach badawczych na całym świecie. Prowadzone są najczęściej na małoskalowych modelach o przekrojach jednodzielnych, znacznie rzadziej wielkoskalowych, a stosunkowo nieliczne w przekrojach wielodzielnych [Nezu i Rodi 1986, Knight i Shiono 1990, Rowiński i in. 2002]. Coraz częściej, choć ciągle nieliczne, badania turbulencji prowadzone są w naturalnych korytach rzek [Nikora i in. 1994, Nikora i Smart 1997, Shteinman i Gutman 1993].

METODYKA I ZAKRES BADAŃ

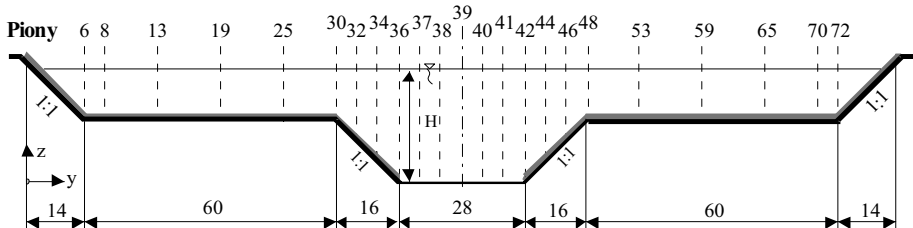
Charakterystyki turbulencji strumienia wody obliczono na podstawie pomierzonych chwilowych wartości podłużnej składowej prędkości w pionach dwudzielnego trapezowego przekroju koryta. Pomiaru chwilowych składowych prędkości w korycie o złożonym trapezowym przekroju poprzecznym prowadzono w latach 1997–2006 w Katedrze Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w prostoliniowym, betonowym modelu koryta długości 16 m i szerokości górną 2,08 m z symetrycznymi terenami zalewowymi. Podłużny spadek dna koryta głównego i terenów zalewowych był stały i równy 0,5‰ [Koziol 1999]. Schemat przekroju poprzecznego badanego modelu przedstawiono na rysunku 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 $k_s = 0,0124$ m dla powierzchni prawego terenu zalewowego.

Do analizy struktury turbulencji wartości prędkości w przekroju koryta rejestrowano sondą ADV w 250 punktach pomiarowych położonych w 23 pionach pomiarowych



Rys. 1. Schemat przekroju poprzecznego badanego modelu
Fig 1. Cross-section of a compound channel

(rys. 2) przy trzech różnych głębokościach w korycie. Chwilowe składowe prędkości przepływu mierzono przy trzech głębokościach przepływu (H) w korycie głównym i natężeniach przepływu zestawionych w tabeli 1 w warunkach ustalonego przepływu w korycie.



Rys. 2. Piony pomiarowe

Fig. 2. Measuring verticals

Tabela 1. Parametry hydrauliczne prowadzonych badań w korycie

Table 1. Hydraulic parameters of investigations in the channel

Parametr Parametr	Wariant Test		
	1	2	3
Przepływ, Q [$l \cdot s^{-1}$] Discharge	95,2	81,1	61,45
Głębokość w korycie głównym, H [cm] Depth in a main channel	28,3	26,4	24,1
Średnia głębokość na terenie zalewowym Depth mean on the flood plains, h_z [cm]	12,3	10,4	8,1

WYNIKI BADAŃ

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 [Czeruszenko i Lebiecki 1989]:

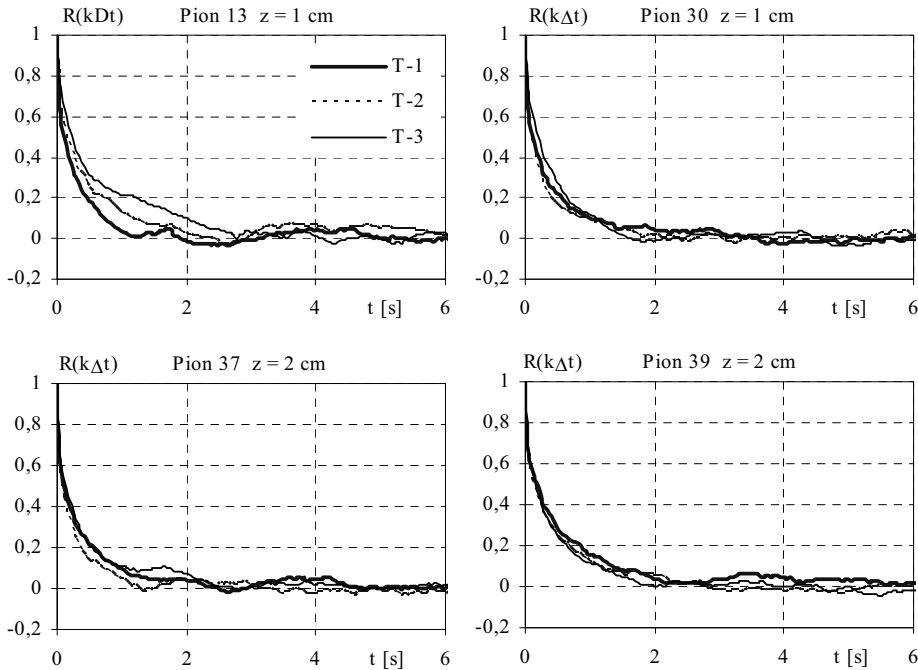
$$R(k\Delta t) = \frac{1}{\overline{u'^2}} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-k} u_i u_{i+k} \quad \text{dla } k = 0, 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

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 (Δt) 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 korelacyjnych szybko maleją z upływem czasu, a następnie nieregularnie oscylują wokół zera. W przeprowadzonych badaniach czas osiągnięcia wartości zero przez funkcję autokorelacyjną zawiera się w przedziale od 0,82 do 11,98 s, a wyniki obliczeń dla poszczególnych obszarów koryta i wariantów badań zamieszczono w tabeli 2.



Rys. 3. Przykładowe czasowe funkcje autokorelacyjne obliczone dla trzech wariantów: z – odległość punktu pomiarowego od dna, $T-1$ – numer wariantu

Fig. 3. Example time autocorrelation functions calculated for three tests: z – distance of measuring point from the bed, $T-1$ – number of test

Na podstawie funkcji autokorelacyjnych obliczono makroskale czasowe Eulera (T_E):

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

Stanowią one 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 0,07 do 1,15 s (tab. 2). Obliczone wartości czasowych makroskali na terenach zalewowych i w korycie głównym dla trzech wariantów zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2. Czas (t) osiągnięcia wartości zero przez funkcję autokorelacyjną i makroskale czasowe dla trzech wariantów

Table 2. The times (t) of achievement of value the zero by autocorrelation function and the macro time-scales (T_E) for three tests

Obszar Area	Wariant 1 Test 1 $H = 0,283$ m		Wariant 2 Test 2 $H = 0,264$ m		Wariant 3 Test 3 $H = 0,241$ m	
	t [s]	T_E [s]	t [s]	T_E [s]	t [s]	T_E [s]
	Lewy teren zalewowy The left flood plains	0,94–6,98	0,14–0,59	0,82–4,82	0,09–0,74	1,1–6,02
Koryto główne The main channel	1,02–11,98	0,15–1,15	0,86–6,14	0,08–0,63	1,02–4,74	0,07–0,64
Prawy teren zalewowy The right flood plains	0,82–5,7	0,13–0,62	0,78–4,9	0,08–0,65	0,98–3,74	0,08–0,58

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 [Elsner 1987], ścisły związek między czasowymi i przestrzennymi eulerowskimi funkcjami autokorelacyjnymi. Hipoteza Taylora o „zamrożonym” charakterze struktur wirowych polega na założeniu, 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) i czasową (T_E) makroskalą turbulencji, wynika zależność na średnią podłużną długość makrowirów (L) występujących w korycie:

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

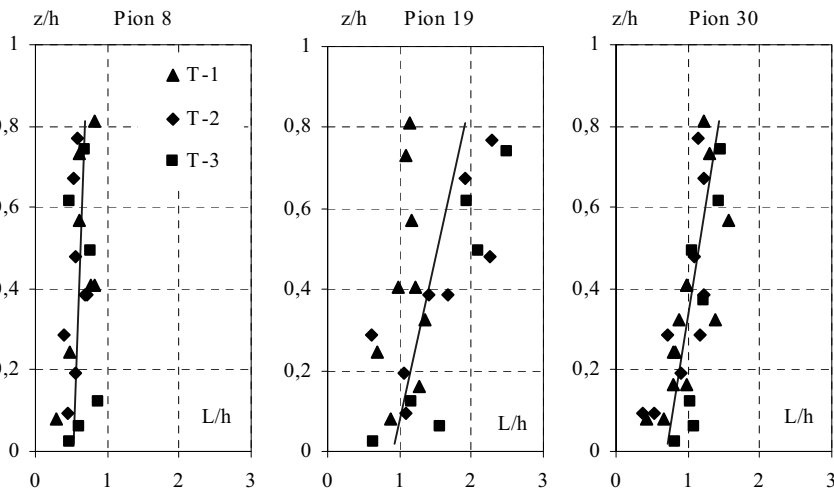
Zmiany względnej długości największych makrowirów na względnej głębokości obliczone w wybranych punktach pionów pomiarowych na terenach zalewowych oraz w korycie głównym na skarpach i na dnie pokazano odpowiednio na rysunkach od 4 do 7. Obliczone średnie podłużne długości makrowirów (L) – makroskala przestrzenna, oraz względne długości makrowirów (L/h , gdzie h – głębokość w analizowanym pionie) dla trzech wariantów zamieszczono w tabeli 3.

Rozkład podłużnych długości makrowirów w pionie nie ujawnia jednakowej stałej tendencji dla całego przekroju poprzecznego koryta. W pionie długości wirów rosną wraz ze zwiększaniem się odległości od dna lub oscylują w pobliżu połowy głębokości strumienia. W trzech wariantach, tzn. niezależnie od głębokości, występują jednakowe tendencje oraz stałe rozproszenie wartości względnej długości makrowirów na głębokości. Na obu terenach zalewowych względne długości makrowirów rosną wraz ze zwiększa-

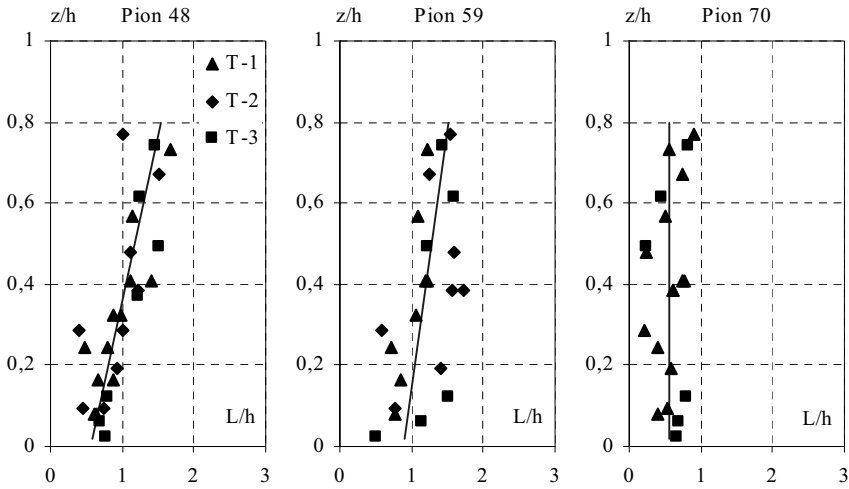
Tabela 3. Obliczone podłużne długości makrowirów L – makroskala przestrzenna
 Table 3. The calculated longitudinal sizes largest eddies L – patial macro-scale

Obszar Area	Wariant 1 Test 1		Wariant 2 Test 2		Wariant 3 Test 3	
	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
Koryto główne The main channel	3–26	0,1–1,2	2–21	0,1–1,2	2–17	0,1–1,0
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

niem się odległości od dna (rys. 4 i 5), gdzie przy skarpach terenu zalewowego wzrost ten jest nieznaczny. Na lewym terenie zalewowym długości makrowirów zmieniają się od 0,2 do 2,5 głębokości strumienia, a na prawym – od 0,1 do 2,3. Na skarpach koryta głównego występuje identyczna tendencja jak na terenach zalewowych (rys. 6), natomiast nad dnem koryta głównego długości makrowirów nie zmieniają się i oscylują w pobliżu połowy głębokości strumienia (rys. 7). Względne długości makrowirów (L/h) są większe na terenach zalewowych niż w korycie głównym, na terenie zalewowym największe 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 z pomiarów prowadzonych w laboratoriach oraz w rzekach [McQuivey i in. 1971, Nikora 1994, Nikora i Smart 1997, Rowiński i in. 1998], gdzie względne długości makrowirów sięgają nawet czterokrotnej głębokości strumienia.

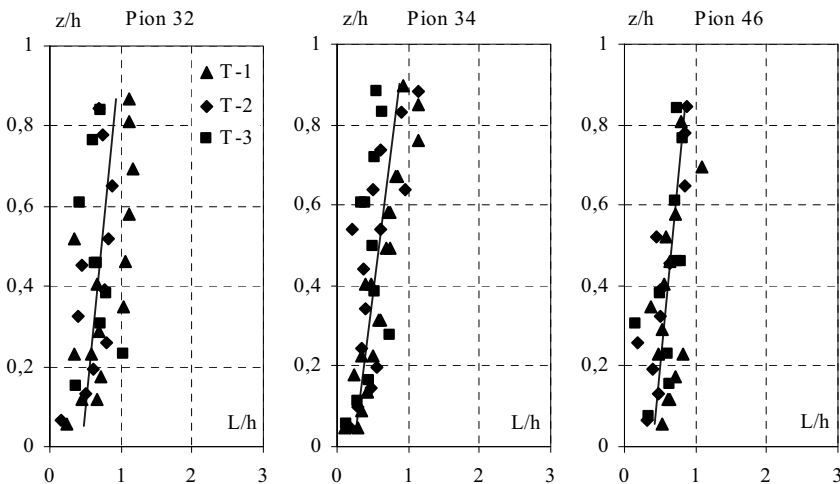


Rys. 4. Przykładowe rozkłady długości podłużnych makrowirów na lewym terenie zalewowym
 Fig. 4. Example distributions of longitudinal sizes of the largest eddies on the left flood plains



Rys. 5. Przykładowe rozkłady długości podłużnych makrowirów na prawym terenie zalewowym

Fig. 5. Example distributions of longitudinal sizes of the largest eddies on the right flood plains

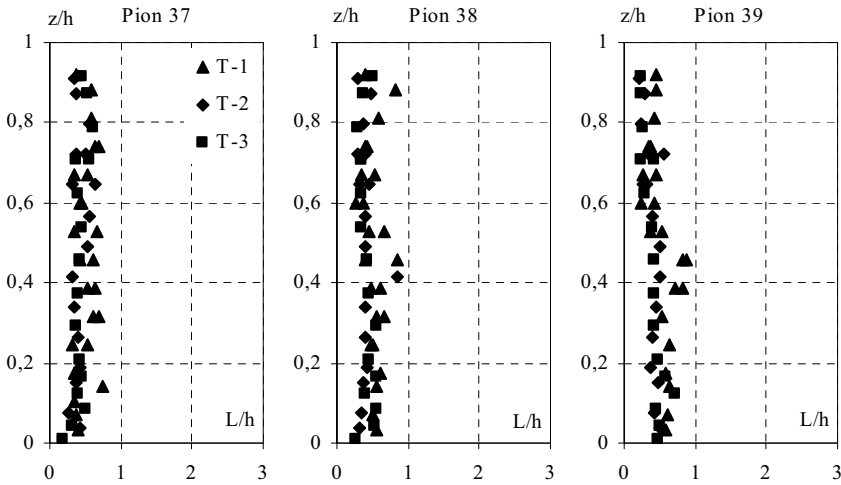


Rys. 6. Przykładowe rozkłady długości podłużnych makrowirów na skarpach koryta głównego

Fig. 6. Example distributions of longitudinal sizes of the largest eddies on the slope of main channel

PODSUMOWANIE

Turbulentne charakterystyki struktury strumienia ustalono na podstawie pomierzonych chwilowych prędkości w korycie o złożonym przekroju poprzecznym. Prędkości mierzono w 250 punktach położonych w 23 pionach pomiarowych dla trzech głębokości przepływów. Badania te wykazały, że:



Rys. 7. Przykładowe rozkłady długości podłużnych makrowirów w korycie głównym
 Fig. 7. Example distributions of longitudinal sizes of the largest eddies in the main channel

1. Czas osiągnięcia wartości zero przez funkcję autokorelacyjną na terenach zalewowych wynosił od 0,78 do 6,98 s, a w korycie głównym od 0,86 do 11,98 s.

2. Obliczone wartości makroskali czasowej Eulera zmieniają się w przedziale od 0,07 do 1,15 s.

3. Rozkład podłużnych długości makrowirów w pionie nie ujawnia jednakowej stałej tendencji zmian dla całego przekroju poprzecznego koryta. Długości makrowirów rosną wraz ze zwiększaniem się odległości od dna albo oscylują w pobliżu połowy głębokości strumienia.

4. W trzech testach, niezależnie od głębokości, występują jednakowe tendencje.

5. Na obu terenach zalewowych podłużne długości makrowirów rosną wraz ze zwiększaniem się odległości od dna i zmieniają się od 0,1 do 2,5 głębokości strumienia.

6. Na skarpach koryta głównego wartości makrowirów rosną wraz ze zwiększaniem się odległości od powierzchni skarpy, natomiast nad dnem koryta głównego wartości makrowirów nie zmieniają się i oscylują w pobliżu połowy głębokości strumienia.

7. 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., Lebiecki P., 1989. Turbulencja w przepływach rzecznych. *Archiwum Hydrotechniki* XXXVI, 1–2, 17–34.

Elsner J.W., 1987. *Turbulencja przepływów*. PWN, Warszawa.

Kozioł A., 1999. *Badania laboratoryjne warunków przepływu w korytach o złożonych przekrojach poprzecznych porośniętych roślinnością wysoką*. Rozprawa doktorska. SGGW, Warszawa.

- Knight D.W., Shiono K., 1990. Turbulence measurements in a shear layer region of a compound channel. *Journal of Hydraulic Research* 28, 2, 175–196.
- McQuivey R.S., Keefer T.N., Shirazi M.A., 1971. Basic data report on the turbulent spread of heat & matter. USA department of the interior geological survey. Open-file Report. Fort Collins, Colorado.
- Nezu I., Rodi W., 1986. Open-channel flow measurements with a Laser Doppler Anemometer. *Journal of Hydraulic Engineering* 112, 5, 335–355.
- Nikora V.I., Smart G.M., 1997. Turbulence characteristics of New Zeland gravel-bed rivers. *Journal of Hydraulic Engineering* 123, 1, 764–73.
- Nikora V.I., Rowiński P., Suchodolov A., Krasuski D., 1994. Structure of river turbulence behind warm-water discharge. *Journal of Hydraulic Engineering* 120, 2, February, 191–208.
- Rowiński P., Czernuszenko W., Koziół A., Kuśmierczuk K., Kubrak J., 1998. Longitudinal turbulence characteristics in a compound channel under various roughness conditions. Proceedings of the 3rd International Conference on Hydro-Science and -Engineering. Cottbus/Berlin, Germany.
- Rowiński P., Czernuszenko W., Koziół A., Kubrak J., 2002. Properties of a Streamwise Turbulent Flow Field in an Open Two-Stage Channel. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics* XLIX, 2, 37–57.
- Shteinman B., Gutman A., 1993. Flow turbulence and dispersion of different matter in the river mouth. *Wat. Sci. Tech.* 27, 7–8, 397–404.

INVESTIGATION OF THE TIME AND SPATIAL MACRO-SCALE OF TURBULENCE IN A COMPOUND CHANNEL

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 three various depth in the channel. These investigations have shown the following: the values of time macro-scale have changed in range since 0.07 to 1.15 s; in all three tests the distributions of the sizes of the eddies reveal stable regularity; the relative length of eddies are bigger on the flood plains 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 of the total water depth.

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

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 15.12.2008