

## **WZGLĘDNA INTENSYWNOŚĆ TURBULENCJI STRUMIENIA WODY W KORYCIE O DWUDZIELNYM PRZEKROJU POPRZECZNYM**

Ewa Sawicka, Adam P. Koziół

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono zmienność względnej intensywności turbulencji strumienia, obliczonej na podstawie pomierzonych chwilowych podłużnych wartości prędkości wody w korycie o dwudzielnym złożonym przekroju poprzecznym. Przeanalizowano zmiany intensywności turbulencji dla jednego napełnienia w warunkach jednostajnie ustalonego przepływu. Pomiary prędkości wody prowadzono w betonowym kanale laboratoryjnym, długości 16 m i szerokości 2,08 m, z symetrycznymi terenami zalewowymi o trapezowym przekroju poprzecznym. Chwilowe składowe prędkości mierzono w korycie z szorstkimi terenami zalewowymi i skarpami koryta głównego. Określono zmiany intensywności turbulencji w poszczególnych częściach koryta. Badania wykazały, że wartości intensywności turbulencji w pionach koryta rosną wraz z oddalaniem się od powierzchni zwierciadła wody w kierunku do dna i skarp. Uzyskane wyniki porównano z opisanymi w literaturze.

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

### **WSTĘP**

Badania turbulentnej struktury w korytach rzek są prowadzone obecnie na całym świecie. Turbulencja jest podstawowym elementem wpływającym na zachodzące procesy w rzekach. Bez poznania kinematycznej i dynamicznej struktury turbulencji strumienia przepływającego w złożonym korycie nie jest możliwe właściwe zrozumienie zachodzących procesów podczas przepływu. Turbulencja ma istotny wpływ m.in. na ruch rumowiska unoszonego i wlezonego, prądy gęstościowe, dyssypację energii, przemieszczanie się zanieczyszczeń, tworzenie form korytowych. Intensywność turbulencji należy

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: Ewa Sawicka, Adam Koziół, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska, Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: adam\_koziol@sggw.pl

do najważniejszych charakterystyk przepływu turbulentnego i jest ilościową oceną burzliwości strumienia, a wyrażana jest zależnością:

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

gdzie:  $u'$  – pulsacja prędkości,  $u_i - U$ ,  
 $u_i$  – chwilowa wartość prędkości,  
 $U$  – uśredniona wartość prędkości.

W praktyce często używa się w opisie turbulencji tzw. względnej intensywności turbulencji określonej ilorazem  $\sigma/U$ .

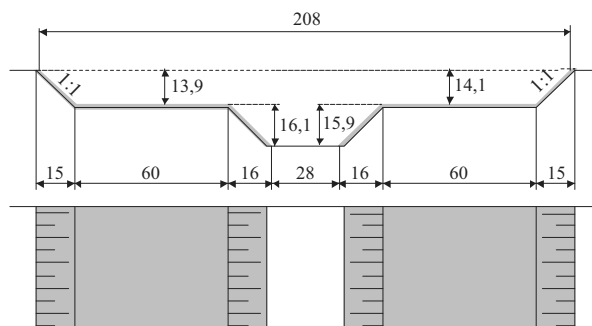
Na podstawie dostępnych publikacji można stwierdzić, że badania turbulentnych charakterystyk strumieni prowadzone są od dawna, najczęściej na małoskalowych modelach, rzadziej wieloskalowych o przekrojach jednodzielnych i wielodzielnych [McQuivery i in. 1971, Czernuszko i Lebiecki 1980, Nezu i Rodi 1986, Knight i Shiono 1990]. Nieliczne są natomiast badania turbulencji w naturalnych rzekach [Czernuszko i Lebiecki 1989, Shteinman i Gutman 1993, Nikora i in. 1994, Nikora i Smart 1997]. W latach 1997–2006 w Katedrze Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie w laboratorium hydraulicznym prowadzono badania nad strukturą turbulentnego przepływu wody w korycie o złożonym, trapezowym przekroju poprzecznym. Jedno- i trójwymiarowe pomiary prędkości wykorzystano do określenia podstawowych parametrów turbulencji w przekroju oraz struktury turbulencji na terenach zalewowych z roślinnością i bez [Kozioł i in. 1998, Rowiński i in. 1998, Kozioł 2002, Rowiński i in. 2002, Czernuszenko i in. 2007, Kozioł 2008, Sawicka 2010] i struktur koherentnych [Czernuszenko i Rowiński 2008].

Celem pracy była analiza zmian i rozkładu względnej intensywności turbulencji strumienia wody w korycie o przekroju dwudzielnym. Analiza została wykonana dla jednego napelnienia koryta w warunkach ustalonego jednostajnego przepływu wody. Pomierzone składowe prędkości w 250 punktach przekroju poprzecznego koryta wykorzystano do ilustracji zmian względnej intensywności turbulencji w pionach na terenach zalewowych, skarpach koryta głównego i nad dnem koryta głównego oraz do opisu rozkładu względnej intensywności turbulencji strumienia wody w przekroju poprzecznym koryta.

## METODYKA I ZAKRES BADAŃ

Względną intensywność 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 prostoliniowym, betonowym modelu koryta 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 modelu przedstawiono na rysunku 1. Powierzchnia dna koryta głównego była gładka, natomiast po-

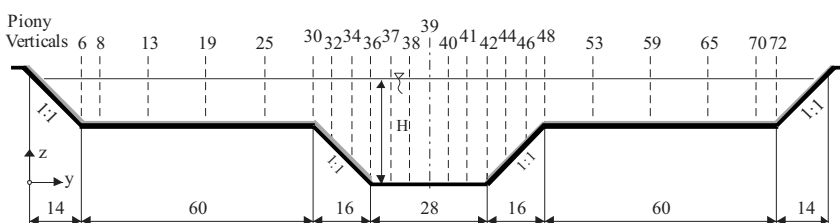
wierzchnia skarp koryta głównego oraz terenów zalewowych została pokryta warstwą lastryko, o średnicy ziaren od 0,5 do 1 cm, położoną na zaprawie cementowej. Wartości absolutnej chropowatości powierzchni koryta wyznaczono metodą pośrednią ze wzoru Colebrooka-White'a na podstawie średnich prędkości przepływu w tych częściach koryta. Otrzymano wartości absolutnej chropowatości  $k_s = 0,00005$  m dla powierzchni dna oraz  $k_s = 0,0074$  m dla powierzchni lewego terenu zalewowego i  $k_s = 0,0124$  m dla powierzchni prawego terenu zalewowego.



Rys. 1. Schemat przekroju poprzecznego badanego modelu [cm]

Fig. 1. Cross-section of a compound channel [cm]

Do analizy względnej intensywności turbulencji chwilowe wartości prędkości w przekroju koryta rejestrowano sondą ADV w 250 punktach położonych w 23 pionach pomiarowych (rys. 2). Długość rejestrowanych ciągów pomiarowych, wynosząca 9000 elementów (6-minutowy czas pomiaru), została ustalona po analizie podstawowych charakterystyk turbulencji i opisana w pracy Koziola [1999]. Chwilowe składowe prędkości przepływu mierzono przy głębokości przepływu  $H = 28,3$  cm w korycie głównym, natężeniu przepływu  $Q = 95,2$  l·s<sup>-1</sup> i średniej głębokość na terenach zalewowych  $h_z = 12,3$  cm. Na podstawie zarejestrowanych ciągów chwilowych prędkości obliczono wartości średniej prędkości ( $U$ ) i średnie odchylenie standardowe ( $\sigma$ ), a następnie względną intensywność turbulencji ( $\sigma/U$ ).



Rys. 2. Piony pomiarowe [cm]

Fig. 2. Measuring verticals [cm]

## WYNIKI BADAŃ I ANALIZA WZGLĘDNEJ INTENSYWNOŚCI TURBULENCJI

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych w korycie o dwudzielnym przekroju poprzecznym w warunkach ustalonego jednostajnego przepływu wody przedstawiono izolinie względnej intensywności turbulencji ( $\sigma/U$ ) w przekroju poprzecznym koryta (rys. 3), a pionowe rozkłady w poszczególnych częściach koryta na rysunku 4. Zmienność względnej intensywności turbulencji w pionach pomiarowych przedstawiono na głębokości względnej  $z/h$ , gdzie  $z$  oznacza odległość od dna, a  $h$  – głębokość w pionie.

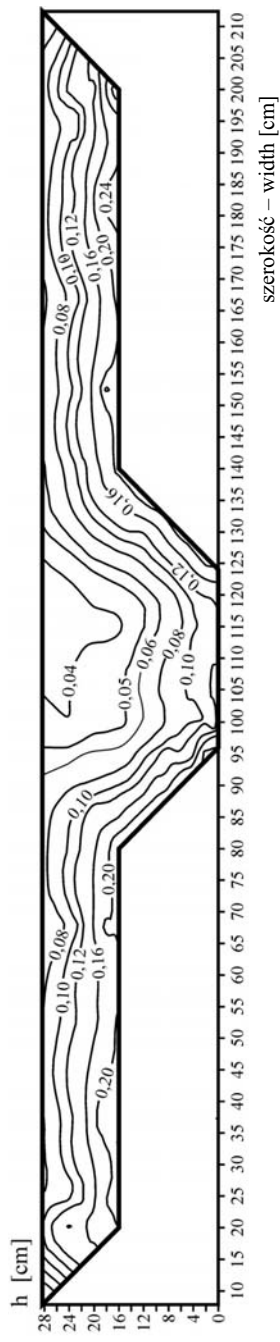
Analizując wyniki przedstawione na rysunkach 3 i 4, należy stwierdzić, że wartość względnej intensywności turbulencji zwiększa się od powierzchni zwierciadła wody do dna. Największe wartości zaobserwowano w pobliżu dna, gdyż występują tam największe gradienty prędkości średniej. Porównując względne intensywności turbulencji w przekroju poprzecznym koryta, przedstawione na rysunku 3, stwierdzono, że największe wartości występują na terenach zalewowych i obszarze połączenia koryta głównego z terenem zalewowym. Mniejsze względne intensywności turbulencji są nad skarpami koryta głównego, a najmniejsze – nad dnem koryta głównego.

W artykule Czernuszenki i Lebieckiego [1980] przedstawiono wyniki analizy intensywności turbulencji, uzyskane w prostokątnym kanale doświadczalnym dla prędkości mierzonych za pomocą mikromłynka DELFT. W prostokątnym kanale intensywność rośnie także wraz z odległością od zwierciadła wody w kierunku do dna kanału, a największe jej wartości są przy dnie (rys. 5). Według autorów, przy ściankach bocznych kanału intensywność turbulencji jest stała i nie zależy od głębokości ( $h$ ), ponieważ generowana jest ona przez ściankę boczną. W bezpośrednim sąsiedztwie ścianek intensywność jest największa, a wraz ze wzrostem odległości od ścianek maleje. Pierwsze w kraju pomiary turbulencji rzecznej wykonano na Wiśle i Wkrze specjalnym młynkiem hydrometrycznym, wyposażonym w rejestrator pomiarów [Lebiecki i Czernuszenko 1987]. Pomiary wykonano na Wiśle w rejonie elektrowni Połaniec oraz na Wkrze w miejscowości Ciekosyn. Zbadano rozkłady chwilowych wartości prędkości wokół średniej oraz obliczono intensywność turbulencji, funkcje autokorelacyjne oraz średnią długość największych wirów. Pionowe rozkłady względnej intensywności turbulencji na rzece Wiśle i Wkrze przedstawiono na rysunku 5.

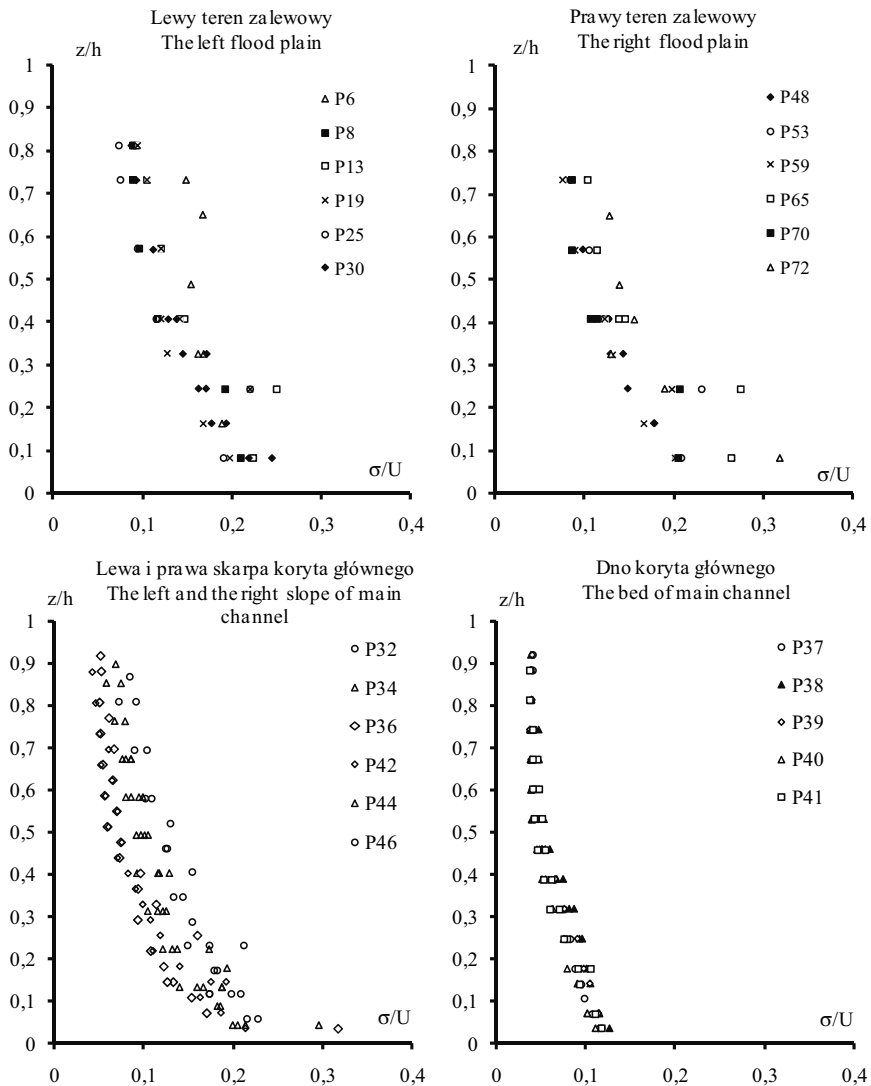
Otrzymane pionowe rozkłady względnej intensywności turbulencji we wszystkich częściach koryta o dwudzielnym przekroju poprzecznym (rys. 4) są zbliżone do otrzymanych z pomiarów na rzekach i w laboratorium w kanale prostokątnym (rys. 5).

Na rysunku 6 przedstawiono w układzie podwójnie logarytmicznym rozkłady względnej intensywności turbulencji z badań własnych koryta dwudzielnego i podanych w literaturze. Porównując otrzymane wyniki, należy stwierdzić, że występuje duża zgodność z wynikami z pomiarów na rzece Narwi [Nikora i in. 1994], z zależnością Nikory [1985] (rzeki z piaszczystym dnem), z danymi Yokosi [1967] (rzeki górskie) i McQuivey [1973] (rzeki Missouri i Mississippi).

Przedstawione wyniki pozwalają stwierdzić duże podobieństwo charakteru zmian intensywności turbulencji, występujących w korycie o dwudzielnym przekroju poprzecznym i w rzekach naturalnych. Wyniki pomiarów na rzekach oraz w laboratorium wykazują, że wartość względnej intensywności turbulencji rośnie od powierzchni zwierciadła

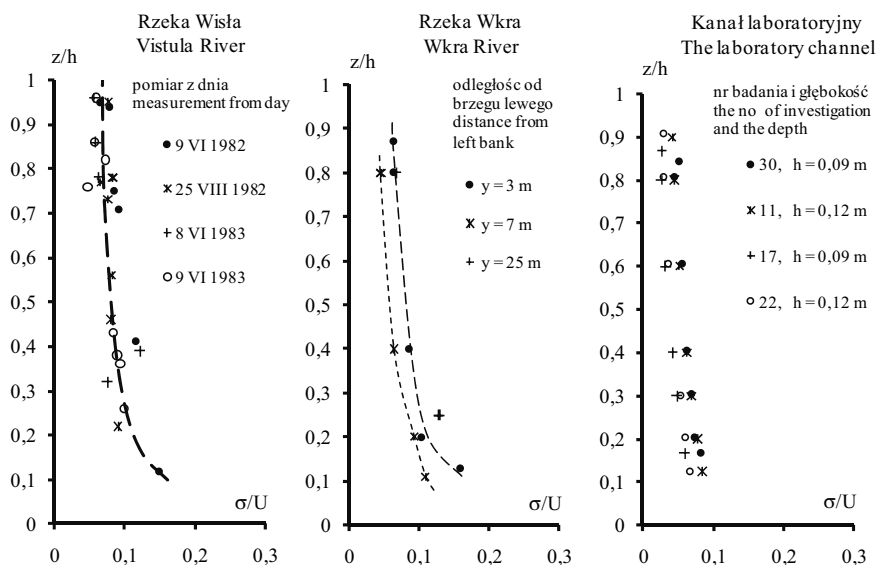


Rys. 3. Izolinie względnej intensywności turbulencji w przekroju poprzecznym koryta  
 Fig. 3. Contour lines for relative turbulent intensities in a cross-section channel



Rys. 4. Zmienność względnej intensywności turbulencji na terenach zalewowych (P6–P30 i P48–P72), na skarpach koryta głównego (P32–P36 i P43–P46) i nad dnem koryta głównego (P37–P41), P-6, ..., P72 – nr pionów pomiarowych

Fig. 4. Distributions of the relative turbulence intensity on the flood plains (P6–P30 i P48–P72), on the slopes of main channel (P32–P36 i P43–P46) and over the bed of main channel (P37–P41), P-6, ..., P72 – numbers of measuring verticals



Rys. 5. Zmienność względnej intensywności turbulencji na rzece Wiśle i Wkrze [Lebiecki i Czernuszenko 1987] oraz w kanale laboratoryjnym [Czernuszenko i Lebiecki 1980]

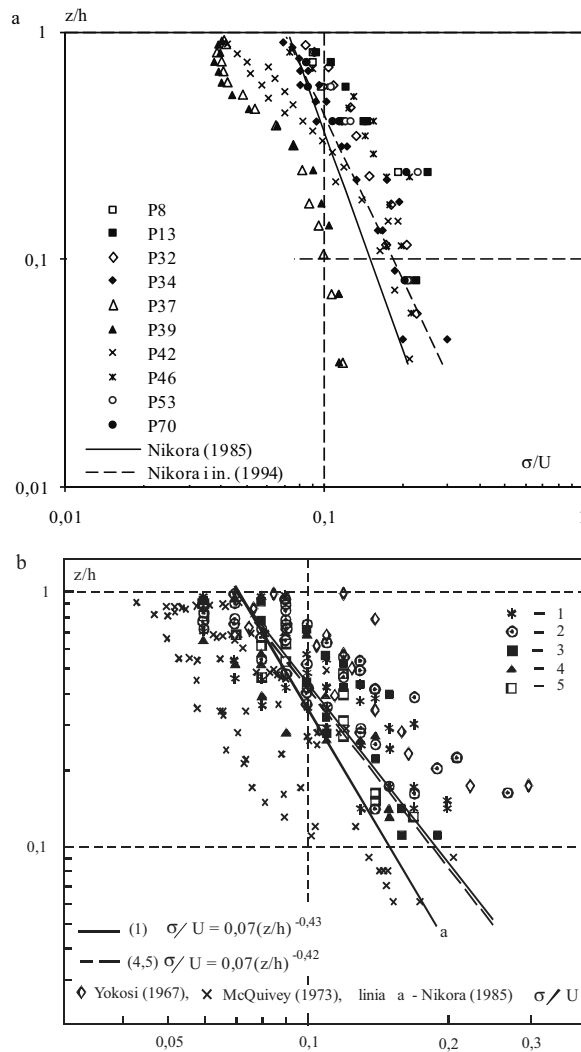
Fig. 5. Distributions of the relative turbulence intensity in the Vistula River and the Wkra River [Lebiecki and Czernuszenko 1987] and in the laboratory channel [Czernuszenko and Lebiecki 1980]

wody do dna. Względne intensywności turbulencji w korycie o dwudzielnym przekroju zmieniały się w przedziale (0,04–0,32), w rzekach: Narew (0,07–0,2), Wkra i Wisła (0,04–0,16), według Yokosi [1967] (0,06–0,3). Można więc stwierdzić, iż otrzymane wyniki z badań laboratoryjnych nie odbiegają od wyników z pomiarów w korytach rzek.

## WNIOSKI

Względną intensywność turbulencji w korycie o dwudzielnym przekroju poprzecznym ustalono na podstawie pomierzonych chwilowych prędkości. Badania wykazały, że:

1. Wartości względnej intensywności turbulencji rosną od powierzchni zwierciadła wody do dna we wszystkich pionach koryta dwudzielnego.
2. Największe gradienty średniej prędkości występują w pobliżu dna i dlatego względne intensywności turbulencji są tu największe.
3. Największe względne intensywności turbulencji występują na terenach zalewowych i w obszarze połączenia koryta głównego z terenem zalewowym.
4. Względne intensywności turbulencji są mniejsze nad skarpami koryta głównego niż na terenach zalewowych, a najmniejsze nad dnem koryta głównego.



Rys. 6. Pionowe rozkłady względnej intensywności turbulencji: a – badania własne w korycie o dwuzielnym przekroju poprzecznym, b – rzeka Narew, przekroje 1–5 (dane Nikory inych [1994], porównane z danymi Nikory [1985], Yokosi [1967] i McQuiveya [1973])

Fig. 6. Distributions of the relative turbulence intensity: a – the two-stage channel, b – in the Narew River, cross section 1–5 (data of Nikora et al. [1994] compared to data of Nikora [1985], Yokosi [1967] i McQuivey [1973])



5. Porównując uzyskane wyniki z wynikami badań na rzekach i w badaniach laboratoryjnych, stwierdzono, że charakter zmienności intensywności turbulencji nie odbiega od występującego w badanym korycie o dwudzielnym przekroju poprzecznym.

## PIŚMIENNICTWO

- Czernuszenko W., Lebiecki P., 1980. Turbulentne charakterystyki strumienia w kanale otwartym. *Archiwum Hydrotechniki* XXVII, 1, 19–38.
- Czernuszenko W., Lebiecki P., 1989. Turbulencja w przepływach rzecznych. *Archiwum Hydrotechniki* XXXVI, 1–2, 17–34.
- Czernuszenko W., Rowiński P.M., 2008. Shear stress Statistics in a compound channel flow. *Archives of Hydro-engineering and Environmental Mechanics* 55, 1–2, 3–27.
- Czernuszenko W., Kozioł A., Rowiński P.M., 2007. Measurements of 3D turbulence structure in a compound channel. *Archives of Hydro-engineering and Environmental Mechanics* 54, 1, 55–73.
- 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.
- Kozioł A., 1999. Badania laboratoryjne warunków przepływu w korytach o złożonych przekrojach poprzecznych porośniętych roślinnością wysoką. Rozprawa doktorska. SGGW, Warszawa.
- Kozioł A., 2002. Mikrowiry Kolmogorowa w korycie o złożonym przekroju poprzecznym. *Wiadomości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej* XXV (XLVI), 1, 37–42.
- Kozioł A., 2008. Badanie czasowej i przestrzennej makroskali turbulencji w korycie o złożonym przekroju poprzecznym. *Acta Scientiarum Polonorum – Architectura* 7 (4), 15–23.
- Kozioł A., Kubrak J., Kuśmierczuk K., 1998. Charakterystyki turbulencji strumienia w korycie o złożonym przekroju poprzecznym. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych Polskiej Akademii Nauk, Wydział Nauk Rolniczych i Leśnych*, 458, 75–87.
- Lebiecki P., Czernuszenko W., 1987. Pomiary podstawowych charakterystyk turbulencji rzecznej. *Gospodarka Wodna* 3, 52–56.
- McQuivey R.S., 1973. Summary of turbulence data from rivers, conveyance channels and laboratory flumes. U.S. Geological Survey 802-B, B1–B66.
- 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., 1985. On the structure of turbulence of river flows over a sand-wave bottom. *Meteorology Hydrol., Hydrometeoizdat, Russia*, 74–81.
- 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, 191–208.
- Rowiński P., Czernuszenko W., Kozioł A., Kuśmierczuk K., Kubrak J., 1998. Longitudinal turbulence characteristics in a compound channel under various roughness conditions. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference 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. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics* XLIX, 2, 37–57.
- Sawicka E., 2010. Intensywność turbulencji w korycie o dwudzielnym przekroju poprzecznym. Praca inżynierska. Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska SGGW, Warszawa.

Shteinman B., Gutman A., 1993. Flow turbulence and dispersion of different matter in the river mouth. *Wat. Sci. Tech.* 27, 7–8, 397–404.

Yokosi, S., 1967. The structure of river turbulence. *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute of Kyoto University* 17 (121), 1–29.

## **RELATIVE TURBULENCE INTENSITY IN A TWO- STAGE CHANNEL**

**Abstract.** Analysis of the relative turbulence intensity of the present paper are based on the measurements of instantaneous of longitudinal velocities in a two-stage channel. It analyzes changes of turbulence intensity for one brimming in conditions established flow at regular intervals. A straight open channel with symmetrically complex trapezoidal cross section, 16 m long and 2.08 m wide was used for the laboratory tests. Measurements with electromagnetic liquid velocity meter were used with the rough overbank channels and the slopes of main channel. Changes of turbulence intensity in particular parts of the channel were evaluated. These investigations mainly have shown the following: values of intensity of turbulence increase from the surface of water in the direction to the bottom and the bed slopes. The results were compared with the ones described in literature.

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

Accepted for print – zaakceptowano do druku: 2.03.2010