

BADANIA MODELOWE ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ ZANIECZYSZCZEŃ PASYWNYCH W STREFIE PRZYPOWIERZCHNIOWEJ STRUMIENIA RZECZNEGO W KORYCIE DWUDZIELNYM

Marcin Krukowski

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. Celem pracy była wizualizacja zjawiska rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w korycie dwudzielnym, polegająca na wprowadzeniu w obszar przepływu wody wskaźnika, który szybko rozprzestrzenia się na cały przekrój strumienia. Szybkość rozprzestrzeniania się wskaźnika w strumieniu wody zależy od wielu czynników, lecz najistotniejsza jest struktura pulsacji prędkości wody. Jednym ze sposobów opisu burzliwego ruchu wody jest opis statystyczny, który występujące w nim wielkości hydrodynamiczne traktuje jako wielkości losowe uśrednione w czasie. Pomiarzy przeprowadzono na modelu hydraulicznym o wymiarach $16 \times 2,08$ m.

Słowa kluczowe: koryto otwarte, przekrój złożony, zanieczyszczenia pasywne, pływające cząstki stałe

WSTĘP

Hydrauliczne warunki przepływu wody w korycie o przekroju dwudzielnym, którego głębokość zmienia się istotnie z szerokością, kształtują się pod wpływem różnorodnej chropowatości dna i skarp oraz wymiany mas wody i pędu pomiędzy terenami zalewowymi a korytem głównym. Wymiana pędu wody pomiędzy strumieniem w korycie głównym i terenami zalewowymi wpływa na charakter przepływu i oddziałuje na transport wody oraz wszelkich domieszek [Knight i in. 1994, Sofialdis i Prinos 1999, Rowiński i in. 2002].

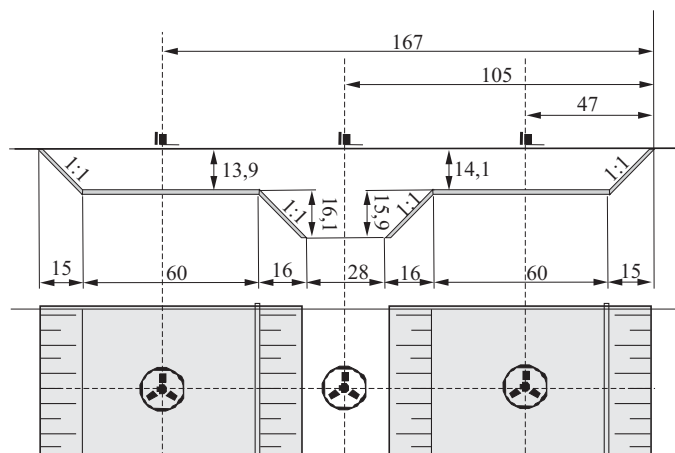
Opisanie procesów transportowych zachodzących podczas przepływu wody w korycie o złożonym przekroju poprzecznym wymaga poznania jego kinematycznej i turbulენტnej struktury. Jedną z metod wizualizacji przepływu wody w korycie o złożonym przekroju jest wprowadzenie wskaźnika, który szybko rozprzestrzenia się na cały przekrój strumienia lub przemieszcza się na powierzchni wody. Do tego celu wykorzystuje się niewielkie

Adres do korespondencji – Corresponding author: dr inż. Marcin Krukowski, Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska, SGGW w Warszawie, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: marcin_krukowski@sggw.pl.

i lekkie cząstki stałe, które pływają na powierzchni wody, reagują na losowe zmiany prędkości i przemieszczają się wraz z wodą w sposób uzależniony od struktury jej turbulencji. Szczegółowy opis ruchu cząstek stałych wymaga użycia równania ruchu cząstki, np. w wersji zaproponowanej przez Tchena [Hinze 1975]. Założenie małych wymiarów cząstek wynika z faktu, że cząstki takie nie zakłócają hydraulicznych warunków przepływu wody [Elghobashi 1994]. Przemieszczanie się pływającej po powierzchni wody cząstki jest wynikiem turbulencji strumienia w strefie przypowierzchniowej. Wyniki pomiarów drogi cząstek stałych interpretowane są na podstawie teorii dyfuzji turbulentnej sformułowanej przez Taylora [1921]. Zakłada się, że obowiązuje tu teoria Ficka, według której cząsteczki znajdują się w lokalnej równowadze z otaczającą wodą. Pozwala to na zastosowanie równania dyfuzji.

METODYKA I ZAKRES BADAŃ

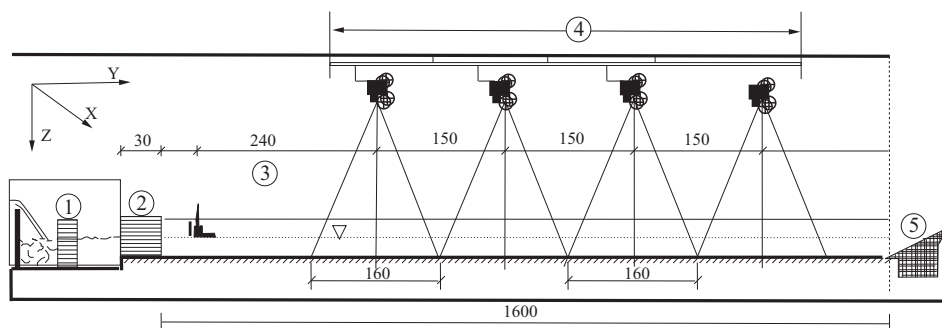
Badania prowadzono w betonowym modelu prostoliniowego odcinka koryta o długości 16 m i szerokości górą 2,08 m, z symetrycznymi terenami zalewowymi o złożonym trapezowym przekroju poprzecznym. Spadek podłużny dna koryta głównego i terenów zalewowych był stały i wynosił 0,5‰. Dno koryta głównego i terenów zalewowych w przekroju było poziome. Powierzchnia dna koryta głównego była gładka, natomiast powierzchnia skarp oraz terenów zalewowych została pokryta warstwą lastryko o średnicy ziaren od 0,5 do 1 cm. Wartości współczynników szorstkości Manninga w korycie wyznaczone w warunkach jednostajnego przepływu były równe $n = 0,011 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ dla gładkiego dna koryta głównego, $n = 0,018 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ dla szorstkiej powierzchni lewego zalewu i $n = 0,025 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ dla zalewu prawego. Schemat dwudzielnego przekroju poprzecznego badanego modelu koryta przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat dwudzielnego przekroju poprzecznego koryta oraz położenie dozownika cząstek (wymiary w cm)

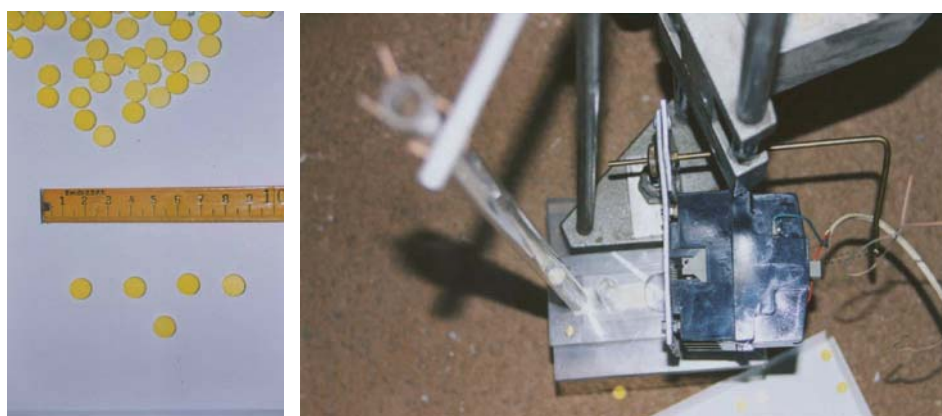
Fig. 1. Scheme showing compound cross-section of channel and location of batcher (dimensions in cm)

Badanie zdolności transportowej strumienia wody w korycie o dwudzielnym przekroju poprzecznym oparte było na zastosowaniu metody analizy obrazu PIV (*Particle Image Velocity*). Do tego celu wykorzystano kamery cyfrowe, które rejestrowały przemieszczanie się pływających cząstek stałych wprowadzanych z nieruchomego, punktowego źródła na powierzchnię turbulentnego przepływu wody w korycie [Krukowski 2005]. Umożliwiło to wyznaczenie podstawowych parametrów charakteryzujących proces ich transportu w przypowierzchniowej warstwie wody. Kamery zostały rozmieszczone w wyznaczonych miejscach pomiarowych w osi koryta na wysokości 3,10 m, tak aby obiektywy 4 kamer obejmowały odcinek koryta o długości 6,40 m. Znajdowały się one w odległościach odpowiednio 2,40 m, 3,90 m, 5,40 m i 6,90 m od dozownika (rys. 2).



Rys. 2. Schemat stanowiska do badań transportu cząstek stałych na powierzchni wody: 1 – przelew, 2 – rurki uspokajające, 3 – dozownik cząstek, 4 – system czterech kamer rejestrujących, 5 – siatka przechwytyjąca cząstki

Fig. 2. Scheme showing test stand for video tracking of solid particles on water surface: 1 – spillway, 2 – flow-soothing pipes, 3 – batcher, 4 – system of four digital cameras, 5 – net catcher



Rys. 3. Widok cząstek oraz dozownika cząstek
Rys. 3. View of particles and batcher

Pomiary prowadzono dla nieruchomego, punktowego źródła cząstek stałych. Cząstki wykorzystywane w badaniach miały kształt walca wykonanego z tworzywa sztucznego (polipropylen). Przygotowano ok. 200 cząstek o średnicy 10 mm i grubości 2 mm i gęstości równej $930 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (rys. 3). Do wprowadzenia cząstek został zaprojektowany i skonstruowany dozownik (rys. 3), który umożliwiał opuszczanie cząstek na powierzchnię wody w zaprogramowanych stałych odstępach czasu. Z zarejestrowanego materiału filmowego za pomocą programu do nieliniowej obróbki wybrano te fragmenty materiału, które umożliwiały określenie współrzędnych położenia cząstek. W tym celu w polu widzenia każdej kamery umieszczono wyskalowaną siatkę o wymiarach $0,10 \times 0,10 \text{ m}$ z głównym reperem. Siatka umożliwiała precyzyjne identyfikowanie położenia dozowanych cząstek. Znajomość wymiarów oczek siatki i prawdziwej rozpiętości utrwalanej sceny pozwalała na wyznaczenie metrycznej rozpiętości filmowanego obrazu oraz określenie wartości współczynnika proporcjonalności światła rzeczywistego do jego filmowego obrazu.

Rejestrację ruchu cząstek prowadzono przy trzech położeniach dozownika cząstek w przekroju poprzecznym (rys. 1) i trzech różnych natężeniach przepływu w korycie (tab. 1). Przeprowadzone doświadczenia różniły się wielkością natężenia przepływu wody w korycie, napelnieniem i średnią prędkością przepływu. W każdym położeniu dozownika wypuszczano 195 cząstek (w 3 doświadczeniach wypuszczono 2360 cząstek).

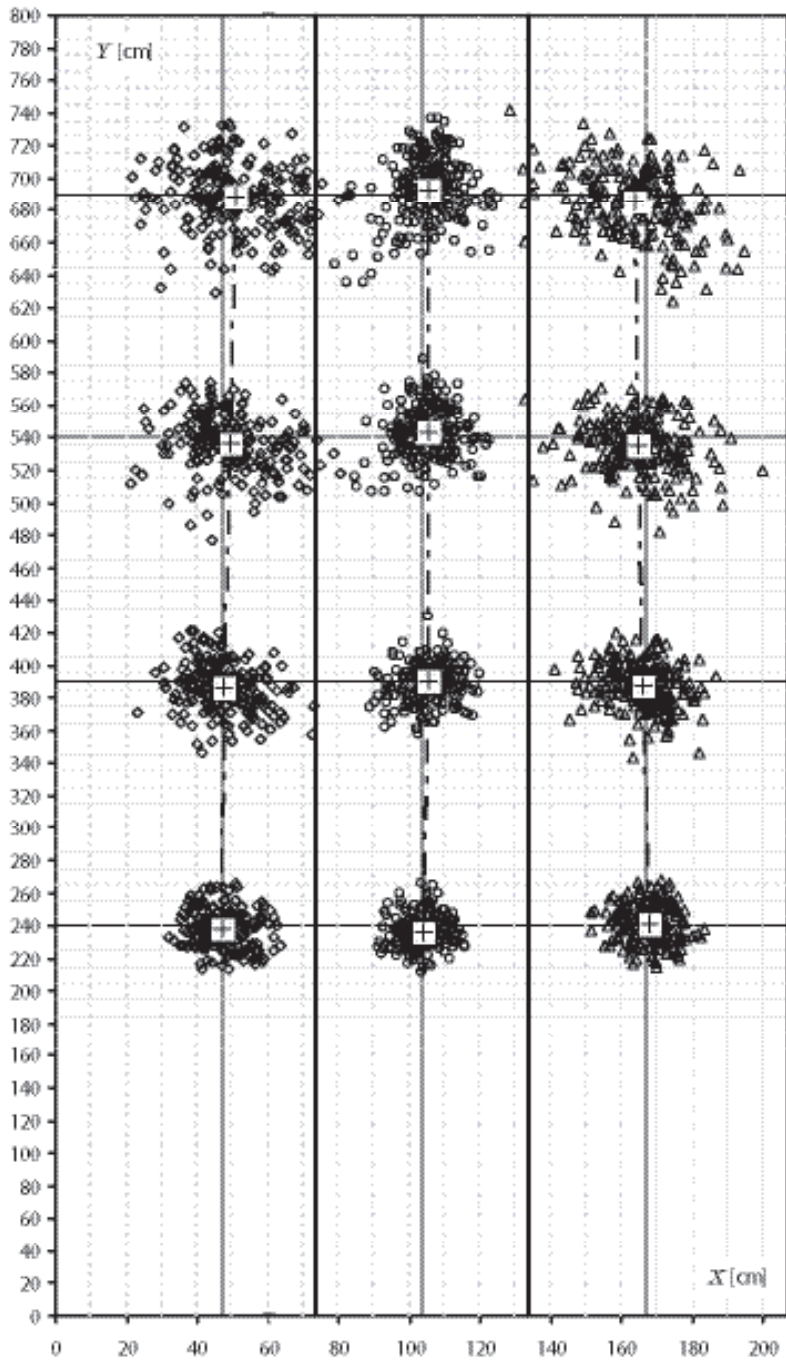
Zasadniczym elementem opracowania zarejestrowanego materiału filmowego było określanie współrzędnych położenia cząstek (x_i, y_i) po upływie czasu dozowania (tab. 1). Współrzędne położenia cząstek różniły się między sobą ze względu na turbulentny charakter przepływu, a ich rozproszenie charakteryzuje zdolność transportową strumienia (rys. 4). Przyjęto założenie, że współrzędne położenia cząstek (x_i, y_i) stanowią niezależne zmienne losowe i podlegają rozkładowi normalnemu.

Tabela 1. Charakterystyka wykonanych doświadczeń

Table 1. Description of experiments

Doświadczenie Experiment	Położenie dozownika Position of batcher	Czas dozowania Time of batching $t, \text{ s}$	Głębokość w korycie Depth in channel $H, \text{ m}$	Natężenie przepływu Flow $Q, \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Prędkość średnia Mean velocity $V, \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	Liczba cząstek Number of particles N
1	ZL	6,52	0,202	0,0359	0,230	195
	KG	4,29			0,340	195
	ZP	6,81			0,220	195
2	ZL	5,55	0,241	0,0616	0,270	195
	KG	4,17			0,360	195
	ZP	5,77			0,260	195
3	ZL	4,84	0,283	0,0805	0,310	195
	KG	3,94			0,380	195
	ZP	5,00			0,300	195

ZL – zalew lewy – left floodplain, KG – koryto główne – main channel, ZP – zalew prawy – right floodplain



Rys. 4. Zarejestrowane obszary położenia cząstek w ustalonych miejscach pomiarowych
Fig. 4. Recorded areas of particle locations at fixed measuring points

WYNIKI BADAŃ

Gdy cząstka stała jest mała, to jej ruchu nie różni się od ruchu cząstki wody na powierzchni przy przepływie turbulentnym. Cząsteczka stała porusza się z eulerowską prędkością płynącej wody $u(X, t)$. Oznaczając przesunięcie wybranej cząstki x w czasie $t = \tau$ jako $X(x, \tau)$, można zapisać:

$$X(x, \tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} V(x, t) dt \quad (1)$$

gdzie:

- $X = (X_1, X_2, X_3)$ – współrzędne Eulera,
- $x = X(x, t_0)$ – lagrange'owska współrzędna cząsteczki wody w chwili $t_0 = 0$,
- $X(x, t)$ – losowy wektor przesunięcia cząstki x ,
- $V(x, t)$ – lagrange'owski wektor prędkości cząstki opisywany eulerowskim wektorem prędkości: $V(x, t) = u(X(x, t), t)$.

Wektor przesunięcia jest wielkością losową i jego określenie wymaga znajomości trzech rozkładów gęstości prawdopodobieństwa $p(X|t, x, t_0)$ położenia wybranej cząstki x w miejscu X w czasie t . W przypadku stacjonarnych i jednorodnych turbulencji rozkład funkcji gęstości położenia cząsteczki wody $p(X|x, t)$ można traktować jak rozkład normalny. Rozważano dwie główne charakterystyki losowego wektora przesunięcia: moment pierwszego i drugiego rzędu. Średnią wartość tego wektora można zapisać jako:

$$\overline{X(x, \tau)} = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \overline{V(x, t)} dt \quad (2)$$

oznaczając przemieszczenie cząstki x w czasie $t = \tau$ przez $X(x, \tau)$, a jego turbulentną fluktuację jako:

$$X'(x, t) = X(x, t) - \overline{X(x, t)} = \int_0^t V'(x, s) ds \quad (3)$$

gdzie moment drugiego rzędu losowego przemieszczenia wyraża się przez charakterystyki pola prędkości [Monin i Yaglom 1971]:

$$D_{ij}(t) = \overline{X'_i(t)X'_j(t)} = \overline{(u_i'^2 u_j'^2)^{0,5}} 2 \int_0^t V'(t-s) R_{ij}^L(s) ds \quad (4)$$

gdzie:

u' – pulsacja składowej prędkości.

Wartości momentu drugiego rzędu zależą od czasu, jak również od postaci funkcji korelacyjnej, która w pewnym sensie jest „miarą pamięci” przepływu turbulentnego i charakteryzuje strukturę istniejących wirów oraz stopień skorelowania przyszłych pręd-

kości z wartościami bieżącymi. Wartości funkcji autokorelacyjnej będą dążyć do zera przy długich czasach i do wartości 1, gdy czas będzie równy zeru.

Formuła (4) jest najważniejsza w teorii Taylora i wskazuje ona na liniową zależność pomiędzy wariancją, a czasem transportu cząstki (równanie 5).

$$D_{ii}(t) = \overline{2u_i'^2 T_i t} \quad (5)$$

Nawiązując do teorii Taylora, można stwierdzić, że ta właściwość jest charakterystyczna dla dyfuzji molekularnej. Przy długich czasach istnieje podobieństwo między dyfuzjami turbulentną i molekularną, a po upływie dostatecznie długiego okresu, wariancja cząstek $D_{ii}(t)$ wzrasta liniowo wraz z upływem czasu z prędkością $\overline{2u_i'^2 T_i t}$.

Równanie (5) można traktować jako miarę rozprzeszczenia chmury cząstek wprowadzonych z punkowego źródła do turbulentnego przepływu. Wielkości $D_{ii}(t)$ stanowią wariancje rozkładu gęstości cząstek, które są oznaczone jako σ_i^2 . Iloczyn $u_i'^2 T_i$ nazywany jest lagrange'owskim współczynnikiem dyfuzji turbulentnej w i -tym kierunku. Współczynnik dyfuzji turbulentnej w jednorodnym stacjonarnym przepływie turbulentnym jest związany z wariancjami funkcji gęstości prawdopodobieństwa zależnością:

$$K_i = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} D_{ii} \equiv \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \sigma_i^2 = \overline{u_i'^2} \int_0^\infty R_{ii}(t) dt \quad i = x, y \quad (6)$$

W przypadku dyfuzji domieszki i chmury cząstek stałych w przepływie turbulentnym, wartość strumienia masy na jednostkę pola w i -tym kierunku opisuje prawo Fick'a:

$$\overline{u_i' c'} = K_i = \frac{\partial C}{\partial X_i} \quad i = x, y \quad (7)$$

gdzie:

C i c' – średnia i chwilowa koncentracja cząstek stałych w jednostce objętości wody.

Rozkład koncentracji domieszki i cząstek spełnia równanie adwekcji-dyfuzji ze współczynnikiem dyfuzji turbulentnej K definiowanym równaniem (6) [Monin i Yaglom 1971].

Powyższe zależności wskazują na podobieństwo między dyfuzją pojedynczej cząsteczki wody a koncentracją domieszki czy chmury cząstek stałych w turbulentnym ruchu wody. Współczynnik dyfuzji turbulentnej obliczony z równania (6) może być stosowany w równaniu dyfuzji do obliczenia rozkładu gęstości cząstek w turbulentnym przepływie [Rowiński i inni 2005]. Wszystkie wymienione wielkości są określane w funkcji czasu, choć często wymagana jest znajomość zmienności tych wielkości w funkcji odległości od źródła. W przypadku współczynników dyfuzji turbulentnej w kierunku X_i , równanie (6) jest modyfikowane poprzez zastąpienie dt przez dX_i/u_i , co uzależni współczynnik dyfuzji w funkcji odległości w kierunku X_i :

$$K_i = \frac{1}{2} u_i \frac{d}{dX_i} D_{ii}(X_i) \quad (8)$$

W przypadku niejednorodnej turbulencji funkcja gęstości prawdopodobieństwa położenia cząstek nie musi przybierać kształtu krzywej rozkładu normalnego Gaussa. W takim przypadku potrzebna jest znajomość zmienności kilku dodatkowych momentów wyższych rzędów, które opisują jej kształt. Zazwyczaj wyznacza się momenty trzeciego i czwartego rzędu dla funkcji gęstości prawdopodobieństwa położenia cząstek, tzn. skośność (asymetria) i kurtozę:

- współrzędne środka ciężkości obszaru położenia cząstek po wybranym czasie (\bar{X} , \bar{Y})

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i; \quad \bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (9)$$

- wariancja

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2; \quad \sigma_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{Y})^2 \quad (10)$$

- skośność

$$S_x = \frac{1}{N\sigma_x^3} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^3; \quad S_y = \frac{1}{N\sigma_y^3} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{Y})^3 \quad (11)$$

- kurtoza

$$K_x = \frac{1}{N\sigma_x^4} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^4; \quad K_y = \frac{1}{N\sigma_y^4} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{Y})^4 \quad (12)$$

gdzie:

N – liczba cząstek.

Na podstawie współrzędnych \bar{X} , \bar{Y} środka ciężkości obszaru („chmury”) położenia cząstek stałych i czasu wyliczono średnie prędkości przemieszczania się cząstek. Tak określone średnie prędkości w kierunku osi y są prawie stałe w poszczególnych częściach przekroju. Natomiast średnie prędkości w kierunku osi x mają różne znaki.

Przykładowe wartości średnich prędkości przemieszczania się cząstek stałych w kierunku osi x i y przedstawiono dla wybranego napełnienia $H = 0,281$ m. Wartości skośności oraz współczynników kurtozy zestawiono w tabelach 2, 3 i 4 oraz pokazano na rysunkach 5 i 6.

Z przedstawionych wykresów wynika, że skośność przybiera wartości bliskie zeru, a kurtoza wartości bliskie 3. Można zatem stwierdzić, że funkcja gęstości prawdopodobieństwa rozkładu współrzędnych cząstek w obszarze jest zbliżona do krzywej rozkładu normalnego (rys. 5 i 6). Zmienność wartości skośności dla wszystkich obszarów świadczy o niewielkim przemieszczaniu się i przesuwanie środka ciężkości obszaru cząstek w kierunku osi koryta lub spowolnieniu cząstek położonych na jego skraju. Obliczone wartości skośności i kurtozy różniły się w niektórych obszarach od wartości charakterystycznych dla rozkładu normalnego.

Tabela 2. Podstawowe parametry charakteryzujące „chmurę” cząstek stałych migrujących w lewym terenie zalewowym (x – współrzędna poprzeczna, y – współrzędna podłużna)
 Table 2. Basic parameters characterising “cloud” of solid particles migrating through left floodplain (x – lateral coordinate, y – longitudinal coordinate)

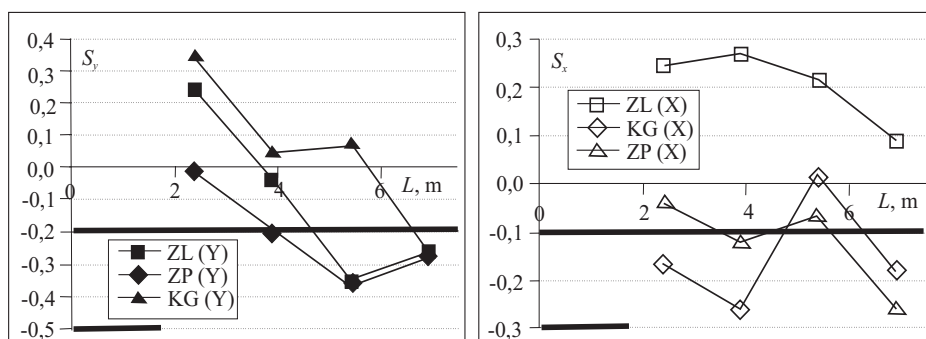
		Lewy teren zalewowy – Left floodplain			
		K1	K2	K3	K4
Położenie czterech kamer Position of four cameras	x , m	0,47	0,47	0,47	0,47
	y , m	2,40	3,90	5,40	6,90
Czas – Time	t , s	7,74	12,58	17,42	22,26
Współrzędne obszaru Coordinates of area	\bar{x} , m	0,472	0,476	0,494	0,508
	\bar{y} , m	2,377	3,864	5,364	6,886
Średnia prędkość obłoku cząstek stałych Mean velocity of cloud of solid particles	u_x , m · s ⁻¹	0,0003	0,0005	0,0014	0,0017
	u_y , m · s ⁻¹	0,307	0,307	0,308	0,309
Wariancja Variance	σ_x^2 , m ²	0,00403	0,00730	0,01280	0,01710
	σ_y^2 , m ²	0,01250	0,02257	0,03152	0,04264
Skośność Skewness	S_x	0,24	0,27	0,21	0,09
	S_y	0,24	-0,04	-0,36	-0,26
Kurtoza Kurtosis	K_x	2,75	3,13	2,89	2,47
	K_y	2,74	2,82	3,19	2,91

Tabela 3. Podstawowe parametry charakteryzujące „chmurę” cząstek stałych migrujących w korycie głównym (x – współrzędna poprzeczna, y – współrzędna podłużna)
 Table 3. Basic parameters characterising “cloud” of solid particles migrating through main channel (x – lateral coordinate, y – longitudinal coordinate)

		Koryto główne – Main channel			
		K1	K2	K3	K4
Położenie czterech kamer Position of four cameras	x , m	1,04	1,04	1,04	1,04
	y , m	2,40	3,90	5,40	6,90
Czas – Time	t , s	6,15	10,09	14,03	17,97
Współrzędne obszaru Coordinates of area	\bar{x} , m	1,038	1,052	1,053	1,055
	\bar{y} , m	2,363	3,898	5,432	6,924
Średnia prędkość obłoku cząstek stałych Mean velocity of cloud of solid particles	u_x , m · s ⁻¹	0,0050	0,0017	0,0013	0,0011
	u_y , m · s ⁻¹	0,384	0,386	0,387	0,385
Wariancja Variance	σ_x^2 , m ²	0,00274	0,00417	0,00528	0,00644
	σ_y^2 , m ²	0,00975	0,01647	0,02543	0,04162
Skośność Skewness	S_x	-0,04	-0,12	-0,07	-0,27
	S_y	0,34	0,04	0,07	-0,26
Kurtoza Kurtosis	K_x	2,67	2,68	2,99	3,65
	K_y	3,17	2,94	2,77	2,85

Tabela 4. Podstawowe parametry charakteryzujące „chmurę” cząstek stałych migrujących w prawym terenie zalewowym (x – współrzędna poprzeczna, y – współrzędna podłużna)
 Table 4. Basic parameters characterising “cloud” of solid particles migrating through right floodplain (x – lateral coordinate, y – longitudinal coordinate)

		Prawy teren zalewowy – Right floodplain			
		K1	K2	K3	K4
Położenie czterech kamer Position of four cameras	x , m	1,67	1,67	1,67	1,67
	y , m	2,40	3,90	5,40	6,90
Czas (Time)	t , s	8,00	13,00	18,00	23,00
Współrzędne obszaru Coordinates of area	\bar{x} , m	1,677	1,660	1,646	1,636
	\bar{y} , m	2,415	3,877	5,353	6,852
Średnia prędkość obłoku cząstek stałych Mean velocity of cloud of solid particles	u_x , $m \cdot s^{-1}$	0,0009	-0,0008	-0,0013	-0,0015
	u_y , $m \cdot s^{-1}$	0,302	0,298	0,297	0,298
Wariancja Variance	σ_x^2 , m^2	0,00373	0,00707	0,01221	0,01664
	σ_y^2 , m^2	0,01236	0,0203	0,02850	0,04542
Skośność Skewness	S_x	-0,17	-0,27	0,02	-0,18
	S_y	-0,01	-0,21	-0,37	-0,28
Kurtoza Kurtosis	K_x	2,77	2,85	3,31	2,96
	K_y	2,52	2,99	3,06	2,96



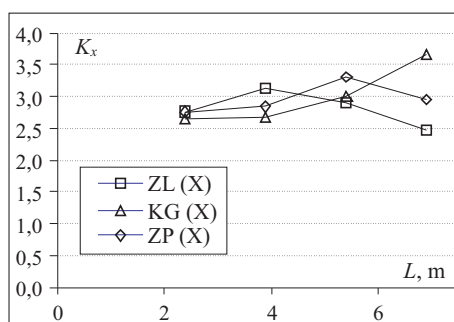
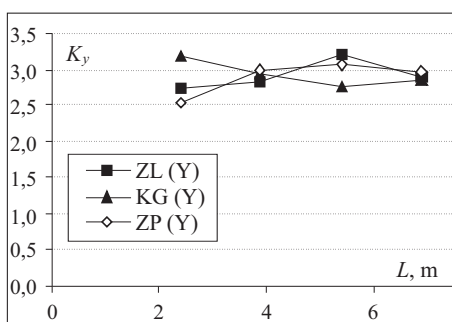
Rys. 5. Zmienność wartości skośności na długości koryta. ZL – lewy teren zalewowy, KG – kanał główny, ZP – prawy teren zalewowy

Fig. 5. Skewness variation as function of channel length. ZL – left floodplain, KG – main channel, ZP – right floodplain

Wzrost wartości wariancji świadczy o stopniowym powiększaniu się obszaru występowania cząstek w korycie głównym i na terenach zalewowych wraz z oddalaniem się od źródła dozowania (tab. 2, 3, 4). Jest to wynik występowania dużego gradientu prędkości między korytem głównym a terenami zalewowymi.

Tabela 5. Średnie wartości współczynników dyfuzji turbulentnej D_i dla cząstek pływających
 Table 5. Average coefficients of turbulent diffusion D_i for floating particles

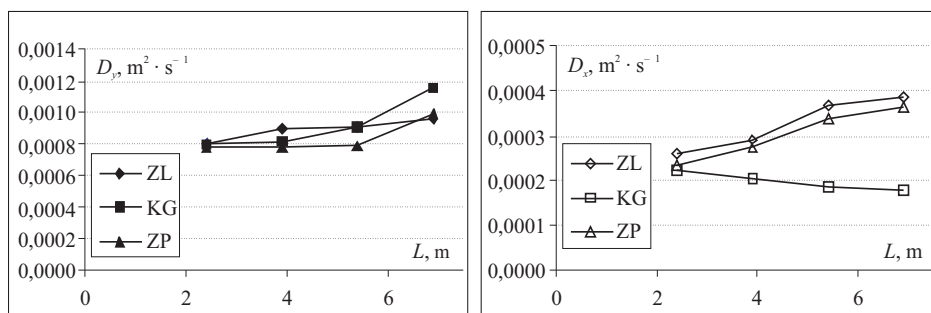
Część koryta Part of channel	Kamery Cameras	Współrzędne położenia kamer Coordinates of camera position m		Czas Time s	$D_{t=x,y}$ $m^2 \cdot s^{-1}$	
		x	y		x	y
Lewy teren zalewowy Left floodplain	K1	0,47	2,40	8,88	0,00022	0,00088
	K2		3,90	14,43	0,00024	0,00090
	K3		5,40	19,98	0,00033	0,00096
	K4		6,90	25,53	0,00036	0,00104
Koryto główne Main channel	K1	1,04	2,40	6,67	0,00011	0,00042
	K2		3,90	10,84	0,00011	0,00045
	K3		5,40	15,01	0,00010	0,00050
	K4		6,90	19,18	0,00010	0,00059
Prawy teren zalewowy Right floodplain	K1	1,67	2,40	9,23	0,00020	0,00098
	K2		3,90	15,00	0,00021	0,00095
	K3		5,40	20,77	0,00028	0,00101
	K4		6,90	26,54	0,00030	0,00110



Rys. 6. Zmienność wartości kurtozy na długości koryta. ZL – lewy teren zalewowy KG – kanał główny, ZP – prawy teren zalewowy

Fig. 6. Kurtosis variation as function of channel length. ZL – left floodplain, KG – main channel, ZP – right floodplain

Natomiast współczynnik dyfuzji turbulentnej D_i w jednorodnym ustalonym przepływie turbulentnym charakteryzuje zdolności transportowe przepływu i jest związany z momentem drugiego rzędu równaniem (7). Obliczone średnie wartości współczynników dyfuzji turbulentnej na odcinku od źródła do rozpatrywanego obszaru D_i przedstawiono w tabeli 5 i na rysunku 7.



Rys. 7. Zmiany współczynników dyfuzji turbulentnej w funkcji odległości od punktu dozowania cząstek stałych. ZL – lewy teren zalewowy KG – kanał główny, ZP – prawy teren zalewowy

Fig. 7. Turbulent diffusion coefficients (longitudinal and lateral) as function of channel length from point of solid particles release. ZL – left floodplain, KG – main channel, ZP – right floodplain

Wartości współczynników dyfuzji turbulentnej D_y w kierunku przepływu rosną wraz z odległością od źródła w korycie głównym i na terenach zalewowych, przy czym współczynniki dyfuzji na terenach zalewowych są większe niż w korycie głównym (rys. 7). Wynikać to może z większego gradientu prędkości w kierunku poprzecznym na terenach zalewowych. Należy podkreślić fakt, że wartości współczynników dyfuzji turbulentnej w kierunku poprzecznym D_x wyraźnie rosną na terenach zalewowych, natomiast zdecydowanie maleją one w korycie głównym. Taki spadek może być spowodowany interakcją strumieni wody w korycie głównym i terenach zalewowych.

WNIOSKI

Przeprowadzone badania modelowe rozprzestrzeniania się cząstek ciała stałego na powierzchni wody w korycie dwudzielnym pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Zastosowana metodyka badań rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń pasywnych z wykorzystaniem techniki PIV (*Particle Image Velocity*) pozwoliła na określenie podstawowych charakterystyk powierzchniowego rozplywu zanieczyszczeń.
2. Analiza statystyczna rozkładów współrzędnych cząstek pływających w korycie o przekroju dwudzielnym potwierdziła, że ich rozkład nie jest rozkładem normalnym, co można tłumaczyć intensywną wymianą pędu wody pomiędzy korytem głównym a terenami zalewowymi.
3. Rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń w kierunku podłużnym jest znacznie większe niż w kierunku poprzecznym. Świadczy o tym liniowy wzrost wariancji podłużnej i poprzecznej wraz ze wzrostem odległości od źródła (tab. 2, 3, 4), a także wielkość obszaru zajmowanego przez rozproszony wskaźnik (rys. 4).
4. Zmiany wartości wariancji i współczynnika asymetrii są charakterystyczne dla transportu w strefie adwekcyjnej przejściowej.

5. Wartości współczynników dyfuzji turbulentnej w kierunku podłużnym rosną wraz z oddalaniem się od źródła dozowania cząstek, co może świadczyć o udziale coraz to większych wirów w procesie dyfuzji cząstek pływających,
6. Zmieniają się one wraz z położeniem źródła zanieczyszczeń w dwudzielnym przekroju koryta. Wartości współczynników dyfuzji w terenach zalewowych są znacznie większe niż w korycie głównym.

PIŚMIENNICTWO

- Elghobashi S., 1994. On predicting particle-laden turbulent flows. *Appl. Sci. Res.* 52, 309–329.
- Hinze J.O., 1975. *Turbulence*. McGraw-Hill, Inc. New York.
- Knight D.W., Yuen K.W.H., Al-hamid A.A.I., 1994. Boundary Shear Stress Distributions in Open Channel Flow. [W:] Beven K.J., Chatwin P.C., Millibank J.H (red.). *Mixing and Transport in the Environment*. Wiley Chichester, 51–87.
- Krukowski M., 2005. Modelowanie migracji cząstek stałych w korycie o dwudzielnym przekroju. Praca doktorska – maszynopis. SGGW Warszawa.
- Monin A.S., Yaglom A.M., 1971. *Statistical Fluid Mechanics: The Mechanics of Turbulence*. Vol. 1. MIT Press Cambridge.
- Rowiński P., Czernuszenko W., Koziół A., Kubrak J., 2002. Properties of a streamwise turbulent flow field in an open two-stage channel. *Arch. Hydro Eng. Environ. Mech.* 49, 37–57.
- Rowiński P., Czernuszenko W., Krukowski M., 2005. Migration of floating particles in a compound channel. [W:] *Water Quality Hazards and Dispersion of Pollutants*. Red. W. Czernuszenko i P.M. Rowiński. Springer Science+Business Media, Inc. New York, 121–141.
- Sofialdis D., Prinos P., 1999. Turbulent flow in open channels with smooth and rough floodplains. *J. Hydraulics Res.* 37 (5), 615–640.
- Taylor G.I., 1921. Diffusion by continuous movements. *Proc. Lond. Math. Soc.* 20, 196–212.

MODELLING PROPAGATION OF PASSIVE POLLUTANTS IN SURFACE ZONE OF RIVER STREAM WITH COMPOUND CHANNEL

Abstract. The work was designed to visualise the propagation of pollutants in the compound channel of a river stream by releasing small light floating solid particles into a turbulent flow in a way allowing to trace them with video cameras (Particle Image Velocimetry). Obviously because the turbulent velocity fluctuations are irregular, the results of each trail differ. On average, the particles wander apart from each other and the rate at which they wander apart can be related to the diffusion coefficient. Experimental investigations of that kind were carried out using a 16 × 2.08 m hydraulic model, and their results are discussed in detail in the present paper.

Key words: open channel, compound cross-section, passive pollutants, floating solid particles

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 21.05.2010