

ROZKŁADY PRĘDKOŚCI W KORYCIE RZECZNYM O ZŁOŻONYM PRZEKROJU POPRZECZNYM Z ROŚLINNOŚCIĄ WYSOKĄ W TERENACH ZALEWOWYCH

Adam Koziół, Janusz Kubrak, Elżbieta Kubrak,
Marcin Krukowski, Adam Kiczko
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. Wykorzystano model Shiono i Knighta [1991] do obliczania poprzecznego rozkładu prędkości wody uśrednionych na głębokości i natężenia przepływu w korytach rzecznych o złożonym przekroju poprzecznym, z roślinnością wysoką w terenach zalewowych. Model wykorzystuje analityczne rozwiązanie równania Naviera-Stokesa z uwzględnieniem wpływu roślinności. Opływ roślinności uwzględniano przez wprowadzenie w równaniu Naviera-Stokesa dodatkowej siły oporu. Wyznaczono wartości współczynników charakteryzujących lepkość wirową i przepływy wtórne, wykorzystywanych w obliczeniach. Wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów hydraulicznych laboratoryjnych i terenowych. Obliczone rozkłady poprzecznej prędkości uśrednionej na głębokości i natężenia przepływu wykazały dobrą zgodność z wartościami zmierzonymi w laboratorium hydraulicznym i w badaniach terenowych.

Słowa kluczowe: prędkość przepływu wody, przepustowość koryta o złożonym przekroju, tereny zalewowe bez i z roślinnością

WSTĘP

Rzeki nizinne mają przekroje złożone z koryta głównego i z terenów zalewowych. Tereny zalewowe i bardzo często skarpy koryta głównego są lokalnie lub całkowicie porośnięte krzewami i drzewami. Obecność roślin znacząco zmienia hydrauliczne warunki przepływu wody w korycie przez zwiększenie oporów przepływu. Powoduje to obniżenia średniej prędkości i wzrost głębokości przepływu wody w terenach zalewowych oraz

Adres do korespondencji – Corresponding authors: dr inż. Adam Koziół, prof. dr hab. Janusz Kubrak, dr inż. Elżbieta Kubrak, dr inż. Marcin Krukowski, dr Adam Kiczko, Katedra Inżynierii Wodnej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa; e-mail: adam_koziol@sggw.pl.

zwiększa różnicę prędkości wody pomiędzy korytem głównym a terenami zalewowymi. Wskutek różnicy prędkości, pomiędzy korytem głównym oraz terenami zalewowymi powstają silne poprzeczne naprężenia ścinające, prowadzące do wymiany masy i pędu wody między tymi częściami przekroju, co z kolei oddziałuje na zdolność transportową strumienia i procesy korytowe. Prognozowanie rozkładu prędkości przepływu wody jest niezbędne dla przeprowadzenia oceny przepustowości koryta, jak również intensywności transportu rumowiska. Oddziaływanie zmian hydraulicznych warunków przepływu w rzece pod wpływem opływanej roślinności ma szczególne znaczenie przy rozpatrywaniu projektów ekologicznych renaturyzacji rzek.

Badania rozkładów prędkości przepływu wody w korytach o złożonym przekroju poprzecznym bez uwzględniania i z uwzględnieniem występowania roślinności na terenach zalewowych, prowadzono początkowo głównie w laboratoriach hydraulicznych. Knight i Shiono [1990] przeprowadzili szczegółowe badania przepustowości modelu koryta zbudowanego w dużej skali i opracowali analityczny opis rozkładu prędkości wody uśrednionej na głębokości i naprężeń stycznych dla koryt pozbawionych roślinności. Wiele podobnych badań laboratoryjnych przeprowadzono na modelach koryt o złożonym przekroju poprzecznym, bez i z różnie rozmieszczoną roślinnością wysoką (krzewy i drzewa) oraz na terenie rzek naturalnych [Shiono i Knight 1988, 1990, 1991, Knight i in. 1989, Babaeyan-Koopaei i in. 2002, Abril i Knight 2004, Rameshwaran i Shiono 2007, Tang i Knight 2008a, 2008b, 2009, Sharifi 2009, Sharifi i in. 2010, Shiono i in. 2012, Kordi i in. 2015].

Na podstawie pomiarów prędkości wody w modelu koryta o złożonym przekroju poprzecznym z roślinnością na terenach zalewowych, Pasche i Rouve [1985] zaproponowali opis uśrednionej na głębokości prędkości wody, oparty na równaniach Naviera-Stokesa. W przypadku występowania roślinności wysokiej w przekroju, interakcja między przepływem a roślinnością była uwzględniana przez wprowadzenie sił oporu wywołanych przez opływ roślin, jako dodatkowego składnika w równaniu Naviera-Stokesa. Roślinność wysoka w przekroju jest często modelowana jako opływ sztywnych walców, dla których znana jest zależność między współczynnikiem oporów, wartością liczby Reynoldsa i średnicą walca. Wartość współczynnika oporu opływającego walca przy wartości liczby Reynoldsa około 1000 wynosi około 1,0. Według Tanino i Nepf [2008] układ roślin w planie koryta zwykle powoduje zmniejszenie wartości współczynnika oporu ze wzrostem gęstości roślinności, wskutek tworzenia się turbulentnego śladu struktur wirowych za roślinnością. Analityczne rozwiązanie równania Naviera-Stokesa dla prędkości wody z uwzględnieniem występowania roślinności podane przez Shiono i Knighta [1991] zależy od czterech parametrów hydraulicznych: współczynnika oporu przepływu (λ), lepkości wirowej (λ_v), uśrednionego przepływu wtórnego (Γ) i przestrzennego uśrednionego współczynnika oporu (C_D) uwzględniającego roślinność.

Celem pracy było określenie wartości współczynników wykorzystywanych w obliczeniach charakteryzujących lepkość wirową i przepływy wtórne na podstawie analitycznego rozwiązania równania Naviera-Stokesa z uwzględnieniem wpływu roślinności jako dodatkowej siły oporu. Weryfikację modelu obliczeniowego przeprowadzono na podstawie wyników hydraulicznych pomiarów laboratoryjnych i wyników pomiarów terenowych wykonanych w Niemczech na rzece Ihme w pobliżu Hanoweru.

MODEL SHIONO I KNIGHTA (SKM)

Model Shiono i Knighta [1991] jest bardzo szczegółowo opisany w literaturze. Zarówno wyprowadzenie wykorzystywanego równania, jak i omówienie stałych i parametrów nie są w tej pracy przytoczone, gdyż można je znaleźć w przytoczonych materiałach źródłowych. Podstawowe równie modelu Shiono i Knighta wyprowadzono z równania Naviera-Stokesa. Uwzględnienie opływu roślinności wysokiej w równaniu Naviera-Stokesa otrzymano po wprowadzeniu dodatkowego składnika [np. Rameshwaran i Shiono 2007, Tang i Knight 2009]:

$$\underbrace{\frac{\partial[H(\rho UV)_d]}{\partial y}}_I = \underbrace{\rho g H J}_{II} - \underbrace{\rho \frac{\lambda}{8} U_d^2 \sqrt{1 + \frac{1}{s^2}}}_{III} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial y} \left[\rho \lambda_v H^2 \sqrt{\frac{\lambda}{8}} U_d \frac{\partial U_d}{\partial y} \right]}_{IV} - \underbrace{\frac{1}{2\delta} \rho (C_D S_F A_p H)_i U_d^2}_V \quad (1)$$

gdzie:

- H – głębokość przepływu,
- U, V, W – uśrednione w czasie składowymi prędkości w kierunku osi x, y, z , oznaczające odpowiednio kierunek przepływu, poprzeczny i prostopadły do niego,
- d – indeks odnoszący się do wartości uśrednionych na głębokości,
- ρ – gęstość wody,
- g – przyspieszenie ziemskie,
- J – podłużny spadek dna koryta,
- λ – współczynnik oporu Darcy-Weisbacha dla dna i skarp koryta,
- s – spadek poprzeczny przekroju,
- λ_v – współczynnik lepkości wirowej,
- δ – porowatość,
- C_D – współczynnik oporu,
- S_F – współczynnik przysłonięcia,
- A_p – powierzchnia roślinności w kierunku przepływu na jednostkę objętości.

Efekt hamowania przepływu wody przez roślinność opisuje porowatość δ , która jest zdefiniowana stosunkiem objętości roślinności do objętości przepływu [Tang i Knight 2009].

W równaniu (1) składnik I jest składową adwekcyjną Γ i dotyczy przepływu wtórnego, składnik II jest składową siły ciężkości, składnik III jest składową naprężenia stycznego przy dnie, składnik IV jest składową naprężenia poprzecznego, a składnik V jest składową siły oporu opływanej roślinności.

Równanie (1) można rozwiązać numerycznie po wprowadzeniu warunków brzegowych. W tym celu przekrój poprzeczny dzieli się na obszary-paski o stałej głębokości, albo o stałym spadku poprzecznym. Następnie wprowadza się warunki brzegowe na granicach między przyległymi paskami i między paskami krawędzią przekroju, zakładając warunek braku poślizgu [Tang i Knight 2009]. Każdy pasek wymaga kalibrowania

trzech parametrów: λ – współczynnika oporów dna lub skarp koryta, λ_v – współczynnikiem lepkości wirowej, Γ – uśrednionego przepływu wtórnego. Wartości parametrów λ , λ_v i Γ wyznaczano w przekrojach poprzecznych koryt sztucznych i naturalnych bez i z roślinnością wysoką [np. Shiono i Knight 1991, Knight i Shiono 1996, Babaeyan-Koopaei i in. 2002, Abril i Knight 2004, Chlebek i Knight 2006, Tang i Knight 2009, Rameshwaran i Shiono 2007, Sharifi 2009, Knight i in. 2010, Shiono i in. 2012, Kordi i in. 2015]. Praktyczne zastosowanie modelu SKM w rzekach ilustrują prace: McGahey [2006] oraz McGahey i in. [2006].

W pierwszych analizach Shiono i Knight [1991] przyjęli, że składnik przepływu wtórnego ($\partial H(\rho UV)_d / \partial y$) jest równy zero. Mimo to, prognozowany poprzeczny rozkład prędkości wody uśrednionej na głębokości był zgodny z wynikami pomiarów. Zgodności takiej nie wykazywały obliczane graniczne naprężenia styczne. Uwzględnienie w rozwiązaniach składnika przepływu wtórnego, spowodowało znaczącą poprawę zgodności obliczanych wartości granicznych naprężeń stycznych ze zmierzonymi [Knight i in. 1994]. Shiono i Knight [1991] wykazali, że wskutek przepływów wtórnych, składnik naprężenia stycznego zmniejsza się w korycie głównym liniowo do wartości minimalnej, która występuje na granicy terenu zalewowego i koryta głównego. Składnik przepływu wtórnego ($\partial H(\rho UV)_d / \partial y$) może być wyrażony stałą wartością parametru Γ [Shiono i Knight 1991, Kubrak i Nachlik 2003]. Wtedy równanie (1) staje się liniowym równaniem różniczkowym drugiego rzędu, które może być rozwiązane analitycznie.

Dla przepływu nad płaskim dnem w korycie z roślinnością, rozwiązanie analityczne równania (1) dla prędkości uśrednionej na głębokości U_d ma postać:

$$U_d = [A_1 e^{\gamma y} + A_2 e^{-\gamma y} + k]^{1/2} \quad (2)$$

gdzie:

A_1, A_2 – stałe dla każdego analizowanego paska w przekroju koryta, obliczane z warunków brzegowych [np. Knight i in. 2004 i 2007, Tang i Knight 2009].

Wartości stałych γ i k są wyznaczone z zależności:

$$\gamma = \sqrt{\frac{2}{\lambda_v} \left[\frac{\lambda}{8} \right]^{1/4}} \frac{1}{H} \sqrt{\frac{\lambda}{8} + \left(\frac{H}{2\delta} \right) C_D S_F A_p}, \quad k = \frac{gJH - \Gamma / \rho}{\lambda / 8 + (1 / (2\delta)) C_D S_F A_p} \quad (3)$$

Jeśli w korycie nie występuje roślinność wysoka, równanie (3) przyjmuje postać podaną przez Shiono i Knighta [1991].

Dla przekroju o stałym spadku poprzecznym dna (1 : s), rozwiązanie analityczne równania (1) względem prędkości uśrednionej na głębokości U_d ma postać:

$$U_d = [A_3 \xi^\alpha + A_4 \xi^{-(\alpha+1)} + \omega \xi + \eta]^{1/2} \quad (4)$$

Wartości stałych A_3 i A_4 oblicza się jak dla płaskiego dna koryta, ξ jest głębokością lokalną na skarpiu, a stałe α , ω i η określone są z zależności:

$$\alpha = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{s(1+s^2)^{1/2}}{\lambda_v} (8\lambda)^{1/2}}, \quad \omega = -\frac{gJ}{\frac{(1+s^2)^{1/2}}{s} \left(\frac{\lambda}{8}\right) - \frac{\lambda_v}{s^2} \left(\frac{\lambda}{8}\right)^{1/2}}, \quad \eta = \frac{-\Gamma}{\frac{(1+s^2)^{1/2}}{s} \rho \left(\frac{\lambda}{8}\right)} \quad (5)$$

PRZEBIEG OBLICZEŃ

Metodę Shiono i Knight [1991] wykorzystano do obliczania poprzecznego rozkładu prędkości uśrednionych na głębokości i natężenia przepływu w korycie o złożonym przekroju poprzecznym bez roślinności i z roślinnością wysoką (drzewa) w terenach zalewowych (ryc. 1). Szczegółowy opis przeprowadzonych badań można znaleźć w pracach Koziola [2008, 2011, 2013], Czernuszenki i in. [2007] oraz Rowińskiego i in. [2002].

Złożony przekrój poprzeczny podzielono na 41 pasków (podobszarów) o szerokości 0,05 m każdy. W paskach obowiązują liniowe równania różniczkowe drugiego rzędu. Utworzony zestaw równań liniowych (2) i (4) jest wykorzystywany do obliczenia wartości dwóch współczynników A_1 i A_2 w każdym pasku. W zależności od liczby przyjętych pasków równania mogą być rozwiązane albo algebraicznie lub numerycznie. W pracy równania algebraiczne rozwiązano programem Microsoft Excel.

Z równań (2) i (4) obliczano uśrednione na głębokości prędkości U_d w poszczególnych paskach przekroju poprzecznego kanału. Niezbędne jest do tego znajomość wartości bezwymiarowego współczynnika oporu λ Darcy-Weisbacha, współczynnika opływu roślin C_D , współczynnika przysłonięcia S_F , porowatości α , współczynnika lepkości wirowej λ_v i wartości składowej adwekcyjnej Γ . Współczynniki lepkości wirowej λ_v i składowe adwekcyjne Γ zostały określane podczas kalibracji modelu SKM, a pozostałe wartości parametrów oszacowane w następujący sposób.

Literatura podaje najczęściej kilku formuł do oszacowania wartości współczynników oporu przepływu λ . Pierwszym sposobem obliczenia współczynników oporu jest użycie zależności Darcy-Weisbacha do obliczania średniej prędkości przepływu wody w jednodzielnym korycie lub w poszczególnych częściach koryta wielodzielnego:

$$\lambda = \frac{8gR_h J}{U_i^2} \quad (6)$$

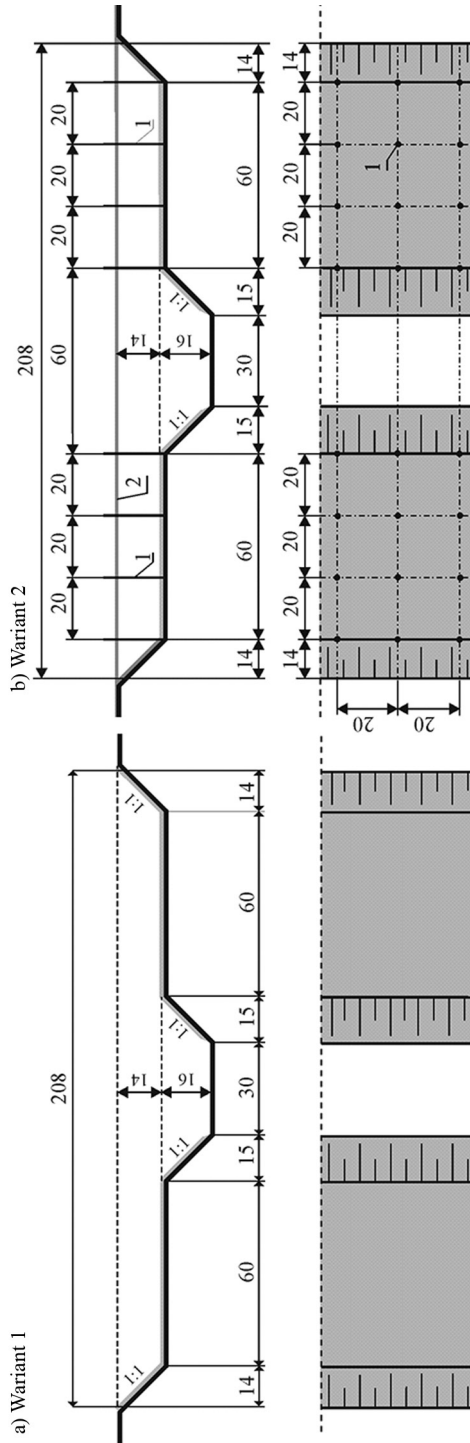
gdzie:

R_h – promień hydrauliczny,

U_i – prędkość średnia w danej części koryta.

Drugim sposobem jest najpierw obliczenie współczynnika Manninga n , a następnie absolutnej chropowatości k_s z zależności [Ackers 1991]:

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{8,25g^{1/2}} \quad (7)$$



Ryc. 1. Schematy przekrojów poprzecznych dwóch wariantów modelu: (a) wariant 1 – koryta z gładką powierzchnią dna koryta głównego, chropowatą powierzchnią skarp koryta głównego i terenów zalewowych, (b) wariant 2 – tereny zalewowych, (b) wariant 2 – tereny zalewowe z rozmieszczonymi drzewami; 1 – aluminiowe rurki o średnicy 0,8 cm imitujące drzewa, 2 – listwy utrzymujące drzewa

Fig. 1. Scheme of a laboratory cross section for two considered tests: (a) tests 1 – a channel with the smooth bed of the main channel, the rough sloping bank of the main channel and rough floodplains; (b) tests 2 – in a channel with floodplains vegetated with trees; 1 – aluminum pipes of 0.8-cm diameter imitating trees, 2 – wooden strips supporting the trees (dimensions in centimeters)

Korzystając z k_s i dostosowanego równania Colebrooka-White'a, można obliczyć miejscowy współczynnik oporu:

$$\lambda = \frac{1}{\left[-2 \log \left(\frac{2,51v}{\sqrt{128gJH^{3/2}}} + \frac{k_s}{14,84H} \right)\right]^2} \quad (8)$$

W literaturze podane są przekształcone równania Colebrooka-White'a do obliczania lokalnego współczynnika oporu λ powierzchni gładkich i wirów wywołanych roślinnością wysoką w terenach zalewowych [np. Rameshwaran i Shiono 2007]. Współczynniki oporu dla powierzchni gładkich koryta można obliczyć z zależności:

$$\lambda = \frac{1}{\left[-2 \log \left(\frac{3,02v}{\sqrt{128gH^3J}} + \frac{k_s}{12,3H} \right)\right]^2} \quad (9)$$

W terenach zalewowych z roślinnością wysoką, za pniami roślin formują się dodatkowe wiry, które generują złożoną formę strumienia na terenie zalewowym i wpływają na pionowy profil prędkości odbiegający od profilu logarytmicznego przyjętego w równaniu Colebrooka-White'a. Dlatego, skalibrowana wersja równania Colebrooka-White'a z współczynnikiem k_s jest przedstawiona w postaci [np. Rameshwaran i Shiono 2007]:

$$\lambda = \frac{1}{\left[-2 \log \left(\frac{3,02v}{\sqrt{128gH^3J}} + \frac{k_s}{1,20H} \right)\right]^2} \quad (10)$$

Wyniki obliczeń średnich współczynników oporu, współczynników Manninga i absolutnej chropowatości k_s w poszczególnych częściach koryta o złożonym przekroju poprzecznym dla wariantu 1 i 2 (bez drzew i z drzewami na terenach zalewowych) zestawiono w tabeli 1. W korycie głównym i na obu terenach zalewowych średnią chropowatość k_s oszacowano z równań (8) i (9) na podstawie obliczonych z równania (6) średnich współczynników oporu λ oraz z równania (7) na podstawie średnich współczynników Manninga. W wariancie 1 na terenach zalewowych wszystkie oszacowane wartości chropowatości powierzchni k_s są bardzo zbliżone, bo różnice nie przekraczają jednego milimetra. Natomiast wartości chropowatości powierzchni k_s w korycie głównym obliczone z równań (7) i (8) są zbliżone. W korycie głównym są dwie różne powierzchnie, gładkie dno i chropowate skarpy, więc obliczone chropowatości k_s są wartościami średnimi. Drzewa na terenach zalewowych (wariant 2) spowodowały wzrost współczynników oporu λ i współczynników Manninga nie tylko na terenach zalewowych, ale również w korycie głównym (tab. 1). Obliczone wartości chropowatości k_s z równania (7) i (8) wzrosły, natomiast wyznaczane z równania (10) zmalały, co świadczy o jego nieprzydatności dla takich warunków przepływu. W obliczeniach uśrednionej prędkości przepływu na głębokości U_d w paskach przekroju poprzecznego koryta z równań (2) i (4), wykorzystano obliczone współczynniki oporu λ i uśrednione wartości chropowatości k_s (tabela 2).

Tabela 1. Średnie wartości współczynników oporu, współczynników Manninga i absolutnej chropowatości w korycie głównym (KG) i na terenach zalewowych (TZ)

Table 1. The mean values of resistance coefficients: the Manning's roughness coefficient and the absolute roughness of the main channel and the floodplains

Nr wariantu Głębokość wody w korycie głównym No test Depth of water in the main channel	Oznaczenie Symbol (nr)	Lewy teren zalewowy The left floodplains (LTZ)	Koryto główne The main channel (KG)	Prawy teren zalewowy The right floodplains (PTZ)
1 $H = 0,283$ m	λ (6)	0,0500	0,0449	0,0499
	$n, m^{-1/3} \cdot s$	0,0173	0,0174	0,0173
	k_s, m (7)	0,0081	0,0082	0,0081
	k_s, m (8)	0,0089	0,0093	0,0088
	k_s, m (9)	0,0086	0,0151	0,0086
2 $H = 0,280$ m (drzewa) (trees)	λ (6)	0,1357	0,0760	0,1337
	$n, m^{-1/3} \cdot s$	0,0285	0,0226	0,2826
	k_s, m (7)	0,1584	0,0393	0,1515
	k_s, m (8)	0,0669	0,0330	0,0653
	k_s, m (10)	0,0063	0,0052	0,0062

W przeprowadzonych hydraulicznych badaniach laboratoryjnych drzewa na terenach zalewowych modelowano pionowymi, gładkimi równomiernie rozmieszczonymi prętami. Wartości współczynników oporu odpływu prętów C_D określano z zależności Wieselbergera [Bertram 1985] w funkcji liczby Reynoldsa ($Re = U_d D \cdot \nu^{-1}$, D – średnica pręta). Dla wartości liczb Reynoldsa $800 \leq Re \leq 8000$ współczynnik oporu C_D jest równy 1.0. Dla rozmieszczonych prętów współczynnik przysłonięcia S_F wynosi 0,964. W przeprowadzonych doświadczeniach dla średnicy prętów $D = 0,008$ m i gęstości prętów 33,3 na m^2 porowatość α wynosi 0,9983.

Lepkości wirową w równaniu (1) wyrażano zależnościami $\epsilon_{yx} = \lambda_y H U_* = \lambda_y H U_d (\lambda/8)^{1/2}$ [np. Shiono i Knight 1991, Abril i Knight 2004, Rameshwaran i Shiono 2007] i rozpatrywano dwa modele (A i B) dla koryta o złożonym przekroju poprzecznym. W modelu 1A przyjęto stałą wartość współczynnika lepkości wirowej λ_y w całym przekroju koryta. Natomiast w modelu 1B wartość współczynnika lepkości wirowej była różna w korycie głównym i na terenach zalewowych.

WYNIKI OBLICZEŃ I ICH ANALIZA

Do weryfikacji opisanej metody obliczeń prędkości uśrednionych na głębokości U_d i przepływu Q wykorzystano wyniki pomiarów z dwóch wariantów badań hydraulicznych: wariant 1 z gładkim dnem koryta głównego i chropowatą powierzchnią skarp

koryta głównego oraz terenów zalewowych, wariant 2 z rozmieszczonymi drzewami na terenach zalewowych. Równanie (1) daje możliwość utworzenia różnych modeli obliczeniowych dla analizowanego koryta, bez i z uwzględnieniem drzew w terenach zalewowych. Wykorzystane modele obliczeniowe zestawiono w tabeli 2. Trzy modele (modele 1A, 1B i 1C) zostały przygotowane dla wariantu 1 – bez drzew, w którym układ równań zapisano przy $C_D = 0$ i $\delta = 1$. W wariantie 2 z drzewami na terenach zalewowych, również przygotowano trzy modele. Dwa układy równań (model 1A i 1B) utworzono przy założeniu $C_D = 0$ i $\delta = 1$, a wpływ drzew na przepływ uwzględniono za pomocą średniego współczynnika oporu λ na terenach zalewowych (tabela 1). Trzeci model 2A opracowano na podstawie równania (1) i uwzględnia siły oporu wywołane przez opływane drzewa.

Tabela 2. Zastosowane modele w korycie o złożonym przekroju poprzecznym.
Table 2. Applied models for the compound channel.

Model Model	Współczynniki Coefficients { C_D ; δ }	Współczynnik lepkości wirowej Eddy viscosity λ_v	Współczynnik oporu Friction factor λ_f (equation)
Model 1A	{ $C_D = 0$; $\delta = 1$ }	$\lambda_{vKG} = \lambda_{vTZ}$	(6)
Model 1B	{ $C_D = 0$; $\delta = 1$ }	$\lambda_{vKG} \neq \lambda_{vTZ}$	(6)
Model 1C	{ $C_D = 0$; $\delta = 1$ }	$\lambda_{vKG} = \lambda_{vTZ}$	λ_{KG} (8), λ_{TZ} (9)
Model 2A	{ $C_D = 1$; $\delta = 0,9983$ }	$\lambda_{vKG} = \lambda_{vTZ}$	λ_{KG} (8), λ_{TZ} (10)

W tabeli 3 zestawiono wartości parametrów z kalibracji metody SKM dla układu równań utworzonych na podstawie równania (1), odchylenia obliczonych prędkości od zmierzonych ($errU$) i odchylenia obliczonych natężeń przepływu od zmierzonych (dQ). Porównanie obliczonych wartości prędkości otrzymanych z równania (1) z wynikami pomiarów dla obu wariantów pokazano na rysunku 2. W wariantie 1 z gładkim dnem koryta głównego i chropowatymi skarpami koryta głównego oraz chropowatymi terenami zalewowymi w obliczeniach wykorzystano średnie współczynniki oporu przepływu λ (modele 1A i 1B) oraz średnią chropowatości k_s (model 1C) w korycie głównym i terenach zalewowych (tab. 3). Rysunek 2a przedstawia dobrą zgodność obliczonych wartości prędkości U_d w korycie o złożonym przekroju poprzecznym z wartościami zmierzonymi w korycie głównym i terenach zalewowych w wariantie 1. Największe różnice między obliczonymi a zmierzonymi prędkościami występują w obszarze połączenia koryta głównego z terenem zalewowym. Otrzymane odchylenia obliczonych prędkości od zmierzonych ($errS$) są zbliżone i zawierają się w zakresie $0,012 \div 0,013 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($3,1 \div 3,3\%$), natomiast odchylenia obliczonych natężeń przepływu od zmierzonych (dQ) nie przekraczają $0,0015 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i $1,5\%$ (tab. 3). Na podstawie otrzymanych wartości odchyłeń z zastosowanych modeli wynika, że wartości są prawie jednakowe, a tylko nieznacznie lepsze wyniki uzyskano w modelu 1B, w którym różne są współczynniki lepkości wirowej w korycie głównym i na terenach zalewowych. Mała różnica w wynikach potwierdza możliwość stosowania jednakowej wartości współczynnika lepkości wirowej w całym korycie.

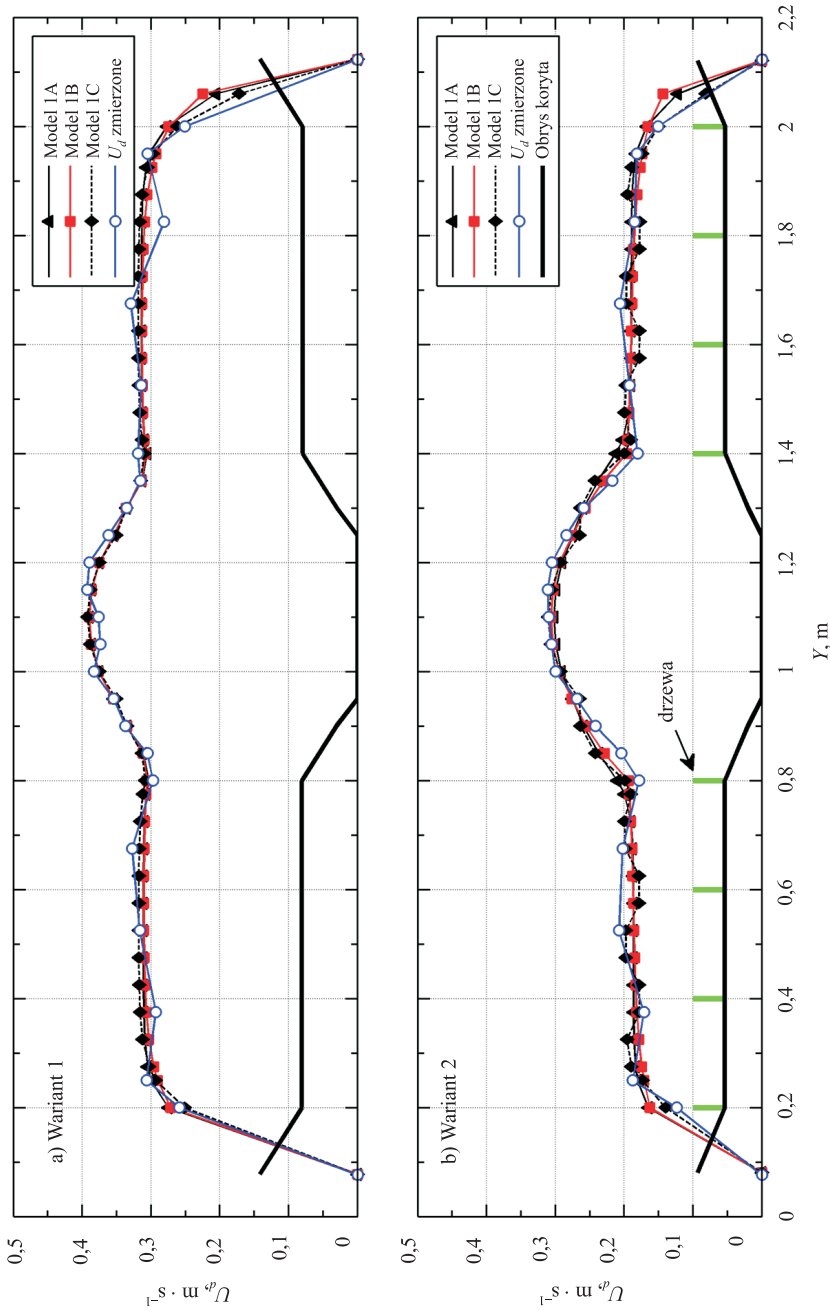
Tabela 3. Parametry modelu SKM dla wariantu 1, 2 (drzewa) i dla rzeki Ihme (krzewami na skar-pach koryta głównego), KG – koryto główne, TZ – tereny zalewowe
 Table 3. SKM model parameters for test 1, 2 (trees) and for the River Ihme (bushes over sloping banks of the main channel), KG – the main channel, TZ – the floodplains

Wariant Test	Modele Model	λ_v		Γ		$errS$	$errS$	dQ	dQ
		KG	TZ	KG	TZ	$m \cdot s^{-1}$	%	$m^3 \cdot s^{-1}$	%
1	Model 1A	0,02		0,416	-0,006	0,013	3,3	0,0013	+1,3
	Model 1B	0,02	0,07	0,416	-0,006	0,013	3,4	0,0010	+1,0
	Model 1C	0,03		0,527	-0,006	0,012	3,1	0,0015	+1,5
2	Model 1A	0,03		0,371	-0,006	0,018	6,5	0,0012	+1,8
	Model 1B	0,02	0,26	0,384	-0,006	0,015	6,2	0,0008	+1,1
	Model 2A	0,02		0,851	-0,218	0,014	5,5	0,0009	+1,3
rzeka Ihme The River Ihme	Model 1A	0,02		0,159	-0,003	0,109	11,1	-0,914	-0,4

Dobrą zgodność obliczonych wartości prędkości z wartościami zmierzonymi otrzymano, wykorzystując zarówno średnie współczynniki oporu przepływu w modelach 1A i 1B, i na podstawie średnich chropowatości k_s (model 1C) w korycie głównym i terenach zalewowych (wariant 1, ryc. 2a). W analizowanym korycie głównym są dwie powierzchnie o różnych chropowatościach, gładkie dno i chropowate skarpy. Zastosowanie dwóch bardzo różnych współczynników chropowatości w korycie głównym do powyższych równań Colebrooka-White'a powodowało powstawanie nierealnego rozkładu prędkości w przekroju koryta. Najprawdopodobniej koryto główne jest wąskie, a zatem chropowate skarpy znacznie mocniej oddziałują na przepływ niż gładkie dno, dlatego albo należałoby ponownie skalibrować równanie Colebrooka-White'a, albo stosować średni współczynnik oporu przepływu (modele 1A i 1B) lub średnią chropowatości k_s dla wszystkich powierzchni koryta głównego (model 1C).

Wartości parametru przepływu wtórnego Γ są znacznie większe w korycie głównym niż na terenach zalewowych (tab. 3), gdzie są bliskie zero. Dlatego w obliczeniach można przyjąć wartość $\Gamma = 0$. Stosując metodę SKM i zakładając w całym korycie wartości parametru przepływu wtórnego równą zero, otrzymywano dobre wyniki w prognozowaniu rozkładu prędkości w przekroju poprzecznym [np. Shiono i Knight 1991, Kubrak i Nachlik 2003]. Wyznaczone wartości współczynnika lepkości wirowej i parametru przepływu wtórnego w doświadczeniach bez roślinności wysokiej, są zgodne z wartościami podanymi w literaturze, uzyskanymi przez innych badaczy z pomiarów prowadzonych w laboratoriach oraz w rzekach [np. Tang i Knight 2008a, 2008b, Sharifi i in. 2010].

Wyniki kalibracji parametrów metody SKM w wariantie 2 z drzewami na terenach zalewowych zestawiono w tabeli 3. Występowanie drzew w modelach 1A i 1B uwzględniono poprzez średnie współczynniki oporu przepływu λ . W modelu 2A równanie (1) uwzględniało siły oporu wywołane przez drzewa, a oddziaływanie dna obliczono na podstawie średniej chropowatości k_s (tab. 1). Na rycinie 2b przedstawiono porówna-

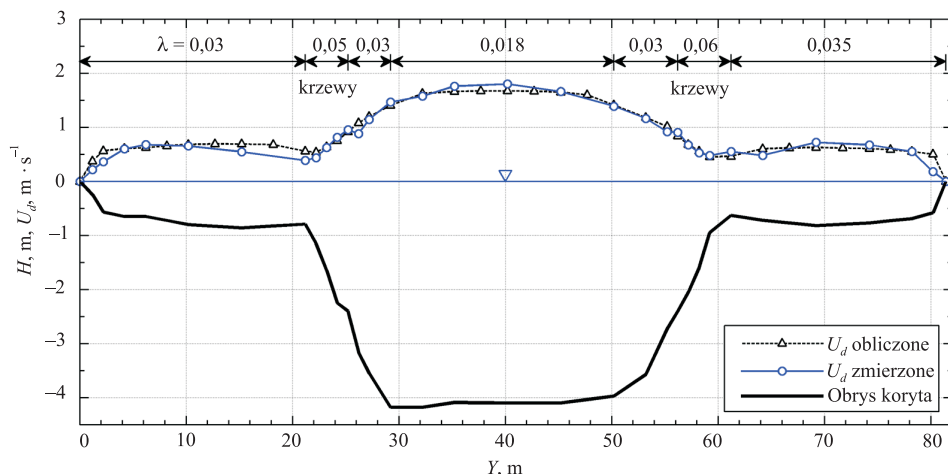


Ryc. 2. Obliczone i zmierzone prędkości przepływu U_d w korycie o złożonym przekroju poprzecznym
 Fig. 2. Calculated and measured velocity U_d in the compound channel

nie obliczonych wartości prędkości z wynikami pomiarów w wariancie 2. W korycie głównym i terenach zalewowych uzyskano dobrą zgodność obliczonych wartości prędkości z wartościami zmierzonymi dla wszystkich zastosowanych modeli. W wariancie 2 z drzewami największe różnice między obliczonymi a zmierzonymi prędkościami występują w obszarze połączenia koryta głównego z terenem zalewowym. Otrzymane odchylenia obliczonych prędkości od zmierzonych są zbliżone i zawierają się w zakresie $0,014 \div 0,018 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($5,5 \div 6,6\%$), a odchylenia obliczonych natężeń przepływu od zmierzonych nie przekraczają $0,0012 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i $1,8\%$ (tab. 3). Na podstawie otrzymanych rozkładów prędkości w przekroju poprzecznym koryta i wartości odchyleń z zastosowanych modeli wynika, że najlepszym modelem jest model 2A, uwzględniający siły oporu opływanych drzew. Uwzględnienie wpływu drzew na przepływ za pomocą średniego współczynnika oporu przepływu na terenie zalewowym spowodowało spłaszczenie rozkładu prędkości w przekroju poprzecznym terenów zalewowych. Uwzględnienie sił oporu wywołanej opływem drzew w równaniu (1) urealniło obliczany rozkład prędkości, tzn. występuje zmniejszenie prędkości za drzewami (model 2A, ryc. 2b).

Zarówno w wariancie bez drzew, jak i z drzewami na terenach zalewowych wartości parametru przepływu wtórnego Γ są znacznie większe w korycie głównym niż na terenach zalewowych (tab. 3). W obu wariantach wartości Γ są zbliżone w modelach 1A i 1B. W wariancie z drzewami parametru wartości przepływu wtórnego są wyraźnie większe w modelu 2A w korycie głównym i na terenach zalewowych. Otrzymane wyniki uzasadniają przyjęcie jednakowych wartości współczynnika lepkości wirowej i średnich współczynników oporu przepływu λ , uwzględniających wpływ drzew. Przy obliczaniu natężenia przepływu, przy rzadkim rozmieszczeniu drzew obliczany poprzeczny rozkład prędkości jest spłaszczony i nierzeczywisty. Uwzględnienie sił oporu wywołanej przez drzewa w metodzie SKM w równaniu (1) spowodowało urealnienie rozkładu prędkości w przekroju poprzecznym koryta i wzrost wartości parametru przepływu wtórnego Γ w korycie głównym i na terenach zalewowych. Występowanie drzew na terenach zalewowych powoduje wzrostu podłużnej składowej prędkości i poprzecznej intensywności turbulencji w korycie głównym i na terenach zalewowych [Kozioł 2013].

Opisaną metodę obliczeń zastosowano także do obliczeń prędkości w złożonym przekroju poprzecznym rzeki Ihme płynącej koło Hanoweru w Niemczech [Rickert 1986]. W obliczeniach wpływ powierzchni dna koryta i krzewów występujących na skarpach koryta głównego uwzględniono przez zastosowanie średnich współczynników oporu przepływu Darcy-Weisbacha. Przekrój poprzeczny koryta rzeki Ihme dzielono na 41 pasków. Uzyskano dobrą zgodność obliczonych prędkości uśrednionych na głębokości modelem 1A z wartościami zmierzonymi (ryc. 3). Największe różnice między obliczonymi a zmierzonymi wartościami prędkościami występują w obszarze połączenia koryta głównego z lewym terenem zalewowym, co można zaobserwować w innych wynikach podanych w literaturze [np. Rameshwaran i Shiono 2007]. Otrzymane odchylenie obliczonych prędkości od zmierzonych wynosi $0,109 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($11,1\%$), a procentowe odchylenie obliczonego natężenia przepływu od zmierzonego wynosi $-0,4\%$ ($0,914 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, tab. 3). Wyznaczone wartości parametru przepływu wtórnego Γ są stałe w na terenach zalewowych w rzece Ihme. W korycie głównym rzeki Ihme natomiast wartości Γ są wyraźnie mniejsze. Prawdopodobnie wprowadzenie dodatkowego parametru Γ , dla wydzielonych



Ryc. 3. Obliczone i zmierzone rozkłady prędkości przepływu w rzece Ihme

Fig. 3. Calculated and measured velocity for The River Ihme

obszarów z krzewami na skarpach koryta głównego, umożliwiłoby uzyskanie rozkładu prędkości w osi koryta zbliżonego do pomiarów. Wymaga to jednak dodatkowego skalibrowania parametru przepływu wtórnego Γ w układzie równań.

PODSUMOWANIE

Model SKM pozwala obliczać wartości rozkładu uśrednionej na głębokości prędkości w złożonym przekroju poprzecznym koryta bez drzew i z drzewami na terenach zalewowych zgodne z wynikami hydraulicznych pomiarów laboratoryjnych. Podobny wniosek sformułowano po analizie wartości zmierzonych i obliczonych prędkości z uwzględnieniem obecności krzewów na skarpach koryta głównego w rzece Ihme. Odchylenia obliczonych prędkości od zmierzonych laboratoryjnie nie przekraczają $0,02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ przy maksymalnej prędkości $0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. W korycie rzeki Ihme różnice prędkości nie przekraczają $0,11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ przy maksymalnej prędkości $1,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Procentowe różnice obliczonych natężeń przepływu od zmierzonych nie przekraczają 2%.

PIŚMIENNICTWO

- Abril, J.B., Knight, D.W. (2004). Stage-discharge prediction for rivers in flood applying a depth-averaged model. *J. Hydraul. Res.*, 42(6): 616–629.
- Ackers, P. (1991). Hydraulic design of straight compound channels. SR Report 281. HR Wallingford, UK, 1 i 2, 1–130 i 1–140.
- Babaeyan-Koopaei, K., Ervine, D.A., Carling, P.A., Cao, Z. (2002). Velocity and Turbulence Measurements for Two Overbank Flow Events in River Severn. *J. Hydraul. Engin.*, 128(10), 891–900.
- Bertram, H.U. (1985). Über den Abfluß in Trapezgerinnen mit extremer Böschungsrauhheit. *Mitteilungen des Leichtweiss-Instituts für Wasserbau der Technische Universität Braunschweig*, 86.

- Chlebek, J., Knight, D.W. (2006). A new perspective on sidewall correction procedures, based on SKM modelling. [W:] F. Alves, L. Cardoso (red.). *River Flow 2006*, t. 1. Taylor & Francis, Lisbon.
- Czernuszenko, W., Koziół, A., Rowiński, P.M. (2007). Measurements of 3D turbulence structure in a compound channel. *Arch. Hydroengin. Environm. Mech.*, 54(1), 55–73.
- Knight, D.W., Shiono, K., Pirt, J. (1989). Prediction of depth mean velocity and discharge in natural rivers with overbank flow. *Proc. Int. Conf. on Hydraulic and Environmental Modelling of Coastal, Estuarine and River Waters*. Ed. R.A. Falconer, P. Goodwin, R.G.S. Matthew. Gower Technical, University of Bradford, September, Paper 38, 419–428.
- Knight, D.W., Shiono, K. (1990). Turbulence measurements in a shear layer region of a compound channel. *J. Hydraul. Res.*, 28(2), 175–196.
- Knight, D.W., Yuen, K.W., Alhamid, A.A. (1994). Boundary Shear Stress Distribution in open channel flow. *Physical Mechanics of Mixing and Transport in the Environmental*. Eds. K. Bevea, R. Chatwin, and J. Millbank. J.Wiley, New York, 1–38.
- Knight, D.W., Shiono, K. (1996). River channel and floodplain hydraulics. In: Anderson M.G, Walling D.E, Bates P D, eds. *Floodplain Processes*. J. Wiley, Chichester, 139–181
- Knight, D.W., Omran, M., Abril, J.B. (2004). Boundary conditions between panels in depth-averaged flow models revisited, *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Fluvial Hydraulics: River Flow 2004*, Naples, 24–26 June, 1, 371–380.
- Knight, D.W., Omran, M, Tang, X. (2007). Modelling depth-averaged velocity and boundary shear in trapezoidal channels with secondary flows. *J. Hydraulic. Eng.*, 133(1), 39–47.
- Knight, D.W., Tang, X., Sterling, M., Shiono, K., McGahey, C. (2010). Solving open channel flow problems with a simple lateral distribution model. [W:] A. Dittich, K. Koll, J. Aberle, P. Geisenhainer (red.). *River Flow 2010*, t. 1. Karlsruhe, 41–48.
- Kordi, H., Amini, R., Zahiri, A., Kordi, E. (2015). Improved Shiono and Knight Method for Overflow Modeling. *J. Hydrol. Engin.*, 20(11).
- Koziół, A. (2008). Badanie czasowej i przestrzennej makroskali turbulencji w korycie o złożonym przekroju poprzecznym. *Acta Sci. Pol., Architectura*, 7(4), 15–23.
- Koziół, A. (2011). Turbulent kinetic energy of water in a compound channel. *Ann. Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Land Reclam.*, 43(2), 193–205.
- Koziół, A.P. (2013). Three-Dimensional Turbulence Intensity in a Compound Channel. *J. Hydraul. Engin.*, 139(8), 852–864.
- Kubrak, J., Nachlik, E. (red.) (2003). *Hydrauliczne podstawy obliczania przepustowości koryt rzecznych*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, ss. 317.
- McGahey, C. (2006). A practical approach to estimating the flow capacity of rivers. PhD Thesis. Faculty of Technology, The Open University (and British Library), May, ss. 371.
- McGahey, C., Samuels, P.G., Knight, D.W. (2006). A practical approach to estimating the flow capacity of rivers – application and analysis. [W:] F. Alves, L. Cardoso (red.). *River Flow 2006*, t. 1. Taylor & Francis, Lisbon.
- Pasche, E., Rouve, G. (1985). Overbank flow with vegetatively roughened flood plains. *J. Hydraul. Engin.*, 111(9), 1262–1278.
- Rameshwaran, P., Shiono, K. (2007). Quasi two-dimensional model for straight overbank flows through emergent vegetation on floodplains. *J. Hydraul. Res.*, 45(3), 302–315.
- Rowiński, P.M., Czernuszenko, W., Koziół, A.P., Kubrak, J. (2002). Properties of a Streamwise Turbulent Flow Field in an Open Two-Stage Channel. *Arch. Hydro-Engin. Environm. Mechanics*, XLIX(2), 37–57.
- Rickert, K. (1986). Der Einfluß von Gehölzen auf die Lichtverhältnisse und das Abflussverhalten in Fließgewässern. *Mitteilungen 61*, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Landwirtschaftlichen Wasserbau, Universität Hannover.
- Sharifi, S. (2009). Application of evolutionary computation to open channel flow modelling, PhD thesis, University of Birmingham, UK.

- Sharifi, S., Sterling, M., Knight, D.W. (2010). Can the application of a multi-objective evolutionary algorithm improve conveyance estimation? *Water Environ. J.*, 25, 230–240.
- Shiono, K., Knight, D.W. (1988). Two-dimensional analytical solution for a compound channel. *Proc. 3rd Intl. Symposium on Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements*. Universal Academy Press, 591–599.
- Shiono, K., Knight, D.W. (1990). Mathematical Models of Flow in Two or Multi Stage Straight Channels. *Intern. Conference on River Flood Hydraulics*. Red. W.R. White. Wiley, Wallingford, 229–238.
- Shiono, K., Knight, D.W. (1991). Turbulent open channel flows with variable depth across the channel. *J. Fluid Mech.*, 222(5), 617–646.
- Shiono, K., Takeda, M., Yang, K., Sugihara, Y., Ishigaki, T. (2012). Modeling of vegetated rivers for inbank and overbank Flows. [W:] *River Flow 2012 – Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics*, 263–269.
- Tang, X., Knight, D.W. (2008a). A general model of lateral depth-averaged velocity distributions for open channel flows. *Advan. Water Resour.*, 31, 846–857.
- Tang, X., Knight, D.W. (2008b). Lateral depth-averaged velocity distribution and bed shear in rectangular compound channels. *J. Hydraul. Engin.*, 134(9), 1337–1342.
- Tang, X.N., Knight, D.W. (2009). Lateral distributions of streamwise velocity in compound channels with partially vegetated floodplains. *Sci. China Ser. E-Tech Sci.*, 52(11), 3357–3362.
- Tanino, Y., Nepf, H. M. (2008). Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders. *J. Hydraul. Engin.*, 134(1), 34–41.

DISTRIBUTIONS OF VELOCITY IN COMPOUND CHANNELS WITH HIGH VEGETATION ON FLOODPLAINS

Abstract. The method of Shiono and Knight [1991] is applied for predicting the lateral velocity profile averaged in depth in compound channels with high vegetation on floodplains. The model is based on the analytical solution of Navier-Stokes equations that include the effect of vegetation. The flow through vegetation was modeled by an additional term in Navier-Stokes equations for the resistance force. The coefficients characterizing the eddy viscosity and secondary flows, necessary for calculations were identified. The computational results were compared with laboratory and field measurements. The elaborated transverse velocity profiles averaged in depth and water discharges are in a good agreement with laboratory and field observations.

Key words: flow velocity of water, discharge of compound channel, floodplain with and without vegetation

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 1.12.2016

Do cytowań – For citation: Kozioł, A., Kubrak, J., Kubrak, E., Krukowski, M., Kiczko, A. (2016). Rozkłady prędkości w korycie rzecznym o złożonym przekroju poprzecznym z roślinnością wysoką w terenach zalewowych. *Acta. Sci. Pol., Formatio Circumietus*, 15(4), 227–241.