INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Nr 8/1/2010, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 153–164
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

Mieczysław Chalfen, Tadeusz Molski, Tomasz Tymiński

WPŁYW ROŚLIN NA ZMIANĘ PROFILU PRĘDKOŚCI PRZEPŁYWU W MAŁYM CIEKU

THE INFLUENCE OF VEGETATION ON VELOCITY PROFILES IN SMALL RIVER

Streszczenie

Roślinność porastająca koryto cieku istotnie oddziałowuje na warunki przepływu. Redukcji ulega czynny przekrój przepływowy, zaburzone jest pole prędkości i rosną opory przepływu. Konsekwencją tego jest zmiana położenia zwierciadła wody, wzrost głębokości w porównaniu do przepływu w korycie bez roślin.

Jednym ze sposobów matematycznego opisu oddziaływania hydraulicznego roślin są równania zachowania pędu dla przepływu w korycie z drzewami oparte na koncepcji lepkości wirowej, zaproponowane przez Rowińskiego i Kubraka [2002]. Równania powyższe rozwiązano, wykorzystując jawny i niejawny schemat różnicowy, otrzymując jako rozwiązanie rozkład prędkości przepływu w profilu pionowym. Dokładność zaproponowanych algorytmów przetestowano, porównując rozwiązania numeryczne ze szczególnymi rozwiązaniami analitycznymi, uzyskując bardzo dobrą zgodność. Wyliczony z modelu rozkład prędkości wykorzystano do wyznaczenia wielkości przepływu.

W celu oceny możliwości zastosowania opracowanego modelu do obliczeń małych cieków z roślinnością przeprowadzone zostały badania terenowe na odcinku cieku Ślęganina. Oprócz pomiarów geodezyjnych, wykonane zostały profile lokalnej prędkości przepływu dla przekrojów porośniętych oraz wolnych od roślinności. Wyniki pomiarów terenowych posłużyły do weryfikacji modelu matematycznego bazującego na równaniach zachowania pędu.

Słowa kluczowe: roślinność, profile prędkość przepływu, model matematyczny

Summary

Vegetation growing in the River Bed is strongly influencing flowing condition. Effective flow section is reduced, velocity field is disturbed and flow resistance is increased. Its consequence is change of water level and depth in comparison with flow in river bed without vegetation.

Equations of momentum conservation in river bed with trees based on a concept of whirly viscosity proposed by Rowiński and Kubrak [2002] are one of mathematical description of vegetation hydraulic influence. Above equations were solved using implicit and explicit differential scheme to determine flow velocities distribution in vertical profile. Accuracy of proposed algorithms was tested by comparing numerical solutions with detailed analytical solution obtaining very good conformity. Velocity distribution calculated on the base of the model was used to determine volume of the flow.

To evaluate possibilities of using developed model for calculation concerning small rivers with vegetation, some filed investigation on one section of Ślęganina river were carried out. Despite of geodetic measurements, some profiles of local flow velocities for vegetated and free of plants sections were made. Field measurements results were used for verification of mathematical model based on equations of momentum conservation.

Key words: *vegetation, velocity profile, mathematical model*

WPROWADZENIE

Małe cieki wodne, czyli niewielkie, często meandrujące rzeki, a także kanały i rowy melioracyjne należą do śródlądowych wód wolno płynących szczególnie intensywnie zasiedlanych przez rośliny. Oprócz porastającej brzegi wikliny spotkać w nich można zarówno gatunki swobodnie pływające, jak i przytwierdzone do podłoża, a także typowe również dla wód stojących rośliny szuwarowe (pałka wodna, trzcina pospolita, turzyca, mozga trzcinowata i in.) [Głuchowska 2005].

Występująca w ciekach wodnych roślinność istotnie oddziaływuje na panujące w nich warunki hydrauliczne i hydrologiczne, m.in. redukcji ulega czynny przekrój przepływowy, zmienia się szorstkość koryta, konfiguracja dna i spadek zwierciadła wody, wegetacja przyspiesza procesy sedymentacji i zamulania, zaburzone jest pole prędkości, a poziom wody podnosi się nie tylko w korycie, lecz również na terenach przyległych, opóźnieniu ulega odpływ wody ze zlewni [Dąbkowski, Pachuta 1996; Mokwa 2002; Tymiński 1999].

Fotografia 1. Koryto Ślęganiny porośnięte roślinnością
Photo 1. The vegetated Ślęganina river

CEL I ZAKRES BADAŃ

Przy tworzeniu modelu matematycznego dla przepływu w korycie z roślinami w niektórych przypadkach zachodzi konieczność wprowadzenia uproszczeń, jak np. założenie sztywności łodyg roślin i nieuwzględnianie w równaniach przepływu ich właściwości biomechanicznych (problematyka sprężystości roślin została opisana szczegółowo w innych pracach autorów, m.in. Tymiński [2007]).

Jednym ze sposobów matematycznego opisu oddziaływania hydraulicznego roślin są równania zachowania pędu oparte na koncepcji lepkości wirowej zaproponowane przez Rowińskiego i Kubraka [2002], które wyprowadzone zostały dla roślinności sztucznej w kształcie prostych i gładkich cylindrów. Równania te mogą być wykorzystane m.in. do analizy zaburzeń pola prędkości przepływu w korytach zarośniętych.

Głównym celem przeprowadzonych badań była ocena możliwości zastosowania ww. modelu matematycznego do obliczeń małych cieków z porostem roślinnym. Założono przy tym, że wysokość roślin jest większa od napełnienia

koryta, czyli strumień opływa łodygi (w przeciwieństwie do przepływu ponad roślinnością denną) oraz, że w niewielkich ciekach silnie zarośniętych w całym przekroju poprzecznym (fot. 1), prędkość przepływu jest na tyle mała, iż parcie hydrodynamiczne nie powoduje ugięcia roślin. Innymi słowy przyjęto model dla roślinności sztywnej (drzew), o kołowym przekroju poprzecznym, równomiernie rozłożonej w przekroju koryta. W modelu dopuszczono zmienną w pionie liczbę łodyg oraz zmienną średnicę przekroju poprzecznego łodyg.

W celu weryfikacji rozwiązań numerycznych przeprowadzono kontrolne badania terenowe na wybranym odcinku cieku Ślęganina. Oprócz pomiarów geodezyjnych, wykonane zostały profile lokalnej prędkości przepływu dla przekrojów porośniętych oraz wolnych od roślinności.

PODSTAWY MODELU MATEMATYCZNEGO

Rozkład prędkości w profilu pionowym koryta cieku w warunkach ruchu ustalonego z uwzględnieniem roślinności sztywnej opisuje układ równań (1–2) [Kubrak i in. 2005; Kubrak, Nachlik 2003; Rowiński, Kubrak 2002]:

$$\frac{d}{dz}\left(z^2 \frac{dv}{dz}\left|\frac{dv}{dz}\right|\right) - \frac{C_w(v)m(z)v^2 d(z)}{2\kappa^2} + \frac{gi}{\kappa^2} = 0 \text{ dla } 0 \le z \le h_e \tag{1}$$

$$\frac{d}{dz}\left(z^2 \frac{dv}{dz}\left|\frac{dv}{dz}\right|\right) + \frac{gi}{\kappa^2} = 0 \text{ dla } h_e < z < H \tag{2}$$

gdzie:

- z – składowa pionowa [m],
- v = v(z) rozkład prędkości przepływu wody w korycie [$m \cdot s^{-1}$],
- $C_w(v)$ – współczynnik oporu opływu drzew [·],
- m(z) – liczba łodyg na m^2 [m^{-2}],
- d(z) – średnica łodygi [m],
- $\kappa = 0{,}41$ – stała Karmana [·],
- $g = 9{,}81$ [$m \cdot s^{-2}$],
- i – spadek dna koryta [·],
- H – głębokość wody [m],
- h_e – wysokość roślinności [m].

W modelu przyjęto, że współczynnik oporu opływu C_w pojedynczej łodygi określony jest zależnością:

$$C_w = \alpha \mathrm{Re}^{-\beta} \tag{3}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{v(z)d}{\nu} \tag{4}$$

gdzie:

ν – kinematyczny współczynnik lepkości wody,

stałe $\alpha = 3{,}07$, $\beta = 0{,}168$.

Równanie powyższe uzupełniono warunkami brzegowymi definiującymi prędkość na dnie koryta oraz na powierzchni swobodnej $v(0) = v_0$, $v(H) = v_H$. Dysponując rozkładem prędkości przepływu wody obliczono przepływ w profilu pionowym według wzoru:

$$Q = \int_o^H v(z)dz \tag{5}$$

METODA ROZWIĄZANIA

Do rozwiązania układu równań (1–2) zastosowano metodę schematów różnicowych, wprowadzając dodatkową zmienną niezależną τ odgrywającą rolę analogiczną do czasu, po prostym różniczkowaniu otrzymano:

$$2z\frac{\partial v}{\partial z}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + z\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) - Rv^{2-\beta} + G = \frac{\partial v}{\partial \tau} \tag{6}$$

gdzie:

$$R = R(z) = \frac{\alpha(\frac{d}{\nu})^{-\beta} m(z)d(z)}{2\kappa^2} \tag{7}$$

$$G = \frac{gi}{\kappa^2} \tag{8}$$

Wprowadzono dyskretyzację zmiennej przestrzennej $z_i = i\Delta z$, gdzie $\Delta z>0$ jest ustalonym krokiem przestrzennym dyskretyzacji, i = 0,…,n, n – liczba węzłów dyskretyzacji. Przyjęto oznaczenia:

$$v_i = v(z_i, \tau + \Delta\tau), \quad \bar{v}_i = v(z_i, \tau)$$

Równanie (6) wraz z warunkami brzegowymi rozwiązano niejawnym:

$$2z_i\frac{\bar{v}_{i+1} - \bar{v}_{i-1}}{2\Delta z}\left(\frac{v_{i+1} - v_{i-1}}{2\Delta z} + z_i\frac{v_{i+1} - 2v_i + v_{i-1}}{\Delta z^2}\right) - R(z_i)\bar{v}_i^{\,2-\beta} + G = \frac{v_i - \bar{v}_i}{\Delta\tau} \tag{9}$$

oraz jawnym schematem różnicowym:

$$2z_i \frac{\bar{v}_{i+1} - \bar{v}_{i-1}}{2\Delta z}\left(\frac{\bar{v}_{i+1} - \bar{v}_{i-1}}{2\Delta z} + z_i \frac{\bar{v}_{i+1} - 2\bar{v}_i + \bar{v}_{i-1}}{\Delta z^2}\right) - R(z_i)\bar{v}_i^{\,2-\beta} + G = \frac{v_i - \bar{v}_i}{\Delta\tau} \qquad (10)$$

Obliczenia według wzorów (9-10) prowadzono do chwili, gdy $\max_i \left| v_i - \bar{v}_i \right| < \varepsilon$, $\varepsilon = 10^{-9}$.

TEST DOKŁADNOŚCI

Dokładność proponowanych metod rozwiązania równań (1–2) zbadano z wykorzystaniem rozwiązań analitycznych uzyskanych dla trzech szczególnych przypadków:

a) Brak elementów sztywnych zaburzających przepływ, tzn. przyjęto m = 0. Wówczas rozwiązaniem równania (1) dla z>0 jest:

dla i > 0

$$v(z) = 2\sqrt{-Gz + c_1} + \sqrt{c_1}\,\ln\left|\frac{\sqrt{-Gz + c_1} - \sqrt{c_1}}{\sqrt{-Gz + c_1} + \sqrt{c_1}}\right| + c_2 \qquad (11)$$

natomiast dla i = 0

$$v(z) = \sqrt{c_1}\,\ln(z) + c_2 \qquad (12)$$

gdzie:

c_1, c_2 – dowolne stałe całkowania.

b) Roślinność jednorodna w pionie (tzn. m = const., d = const.), spadek i = 0. Wówczas rozwiązaniem równania (6) jest:

$$v(z) = (0.5R\beta^3 z)^{\frac{1}{\beta}} \qquad (13)$$

c) Roślinność jednorodna w pionie (tzn. m = const, d = const), spadek i>0. Szczególne rozwiązanie uzyskano przy dodatkowym założeniu β = 2. Wówczas rozwiązaniem równania (6) jest:

$$v(z) = 2\bar{z} + c_1 \ln\frac{\bar{z} - c_1}{\bar{z} + c_1} + c_2 \qquad (14)$$

gdzie: $$\bar{z} = 2\sqrt{(R-G)z + c_1^2} \tag{15}$$

c_1, c_2 – dowolne stałe.

Testy metody z wykorzystaniem rozwiązań analitycznych (11–15) pokazały, że średnie błędy względne rozwiązań uzyskanych według wzorów (9) lub (10) są poniżej 0,5%. We wszystkich przeprowadzonych eksperymentach obliczeniowych, dla obu schematów różnicowych (9) i (10) uzyskano niemal identyczne rozwiązania. Uznano, że dokładność metod numerycznych do użytych w modelu jest wystarczająca dla praktycznych zastosowań.

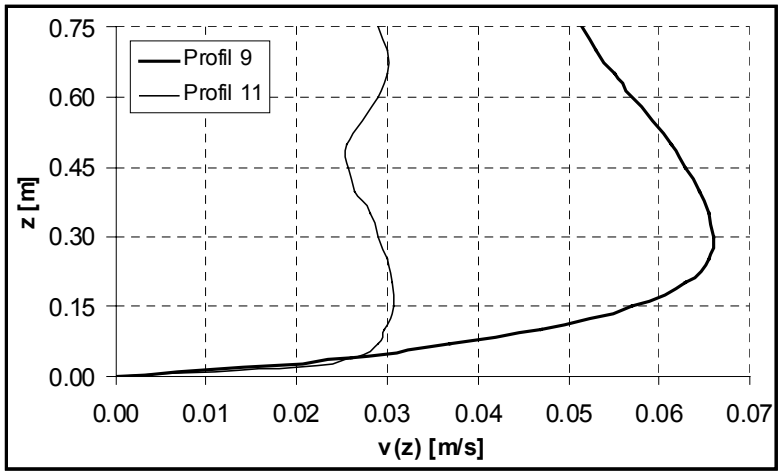
BADANIA TERENOWE

Charakterystyka obszaru badań. Objęty badaniami terenowymi odcinek cieku Ślęganina, pod względem geograficznym, usytuowany jest w Pradolinie Odry na Równinie Wrocławskiej, należącej do makroregionu Niziny Śląskiej, stanowiącej część Niżu Polskiego. Obejmuje on fragment prawobrzeżnej terasy zalewowej Odry powyżej stopnia wodnego Brzeg Dolny w ok. 270 kilometrze rzeki [Kowalski, Molski 2009]. Spiętrzenie Odry stopniem Brzeg Dolny spowodowało trwałe podniesienie poziomu wód podziemnych na terenach przyległych powyżej stopnia. Uwarunkowania wodno-gruntowe omawianego terenu stwarzają potrzebę skutecznego systemu odwadniającego, który może stanowić również ciek Ślęganina. Ważne jest przy tym rozpoznanie odpowiednich warunków hydraulicznych przepływu, zdominowanych przez obecną w tym cieku roślinność.

Pomiary parametrów roślinnych. Gatunkami roślin dominującymi w Ślęganinie są mozga trzcinowata (*Phalaris arundinacea*) i manna mielec (*Glyceria aquatica*). Pomiary terenowe polegały na wyznaczeniu reprezentatywnej dla danego zbiorowiska rośliny (ze względu na jej wymiary geometryczne), pomierzeniu wysokości i średnic charakterystycznych rośliny oraz rozstawy łodyg w kierunku a_x = 0,04 m i prostopadle do kierunku przepływu a_y = 0,04 m. Posłużono się przy tym suwmiarką i przymiarem liniowym o dokładności ± 0,1 mm. Szczegółowe pomiary ilościowe (m.in. gęstości obsadzenia m = 625 łodyg·m^{-2}) przeprowadzone zostały na obszarze kontrolnym zarośniętego dna koryta o wymiarach 1 m x 1 m. Pobrane zostały próbki roślin, które następnie przebadano w laboratorium, określając koncentrację roślin ρ = 2 % metodą objętościową [Tymiński 1999].

Charakterystyka hydrauliczna. Pomiary rozkładu prędkości lokalnej w 15. pionach i 8. poziomach poprzecznego przekroju przepływowego koryta, wykonane zostały wg obowiązujących zasad i metodyki zalecanej w *Hydrome-*

trii [Bajkiewicz-Grabowska i in. 1993]. Do pomiarów wykorzystano sondę elektromagnetyczną typu Flowmeter o dokładności ± 0,001 ms^{-1}. Natężenie przepływu Q = 123,1 $dm^3 \cdot s^{-1}$ w korycie Ślęganiny określone zostało na podstawie metody Culmanna, opartej na wielopunktowym pomiarze prędkości lokalnej [Bajkiewicz-Grabowska i in. 1993, Byczkowski 1999]. Pomierzono też wielkości geometryczne przekrojów (głębokość H=0,75m, szerokość B = 4,80 m, nachylenie skarp 1:1,5) oraz spadek zwierciadła wody i = 0,0005 między dwoma oddalonymi od siebie o 70 m przekrojami charakterystycznymi. Dla napełnienia koryta H = 0,75 m możliwe było obliczenie współczynnika szorstkości n = 0,103 odcinka badawczego z przekształcenia powszechnie znanego wzoru Chezy-Manninga [Głuchowska 2005].

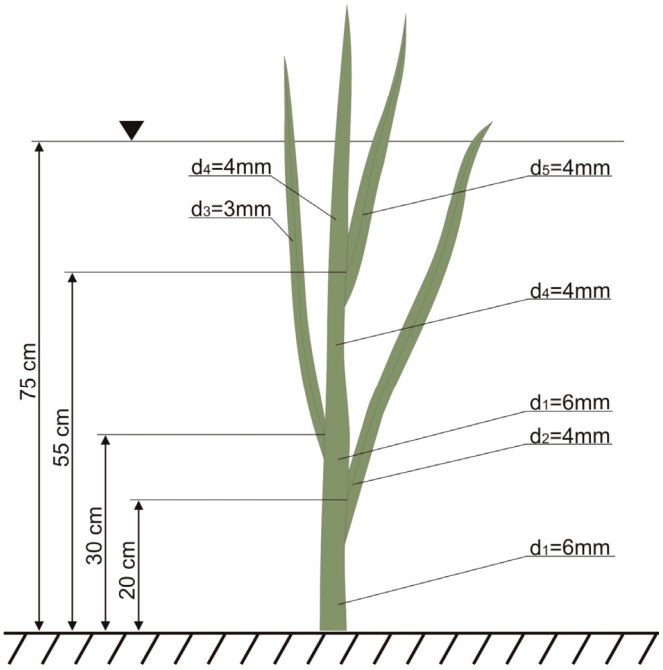


Rysunek 1. Rozkład prędkości $v = f(z)$ dla roślin poniżej lustra wody
Figure 1. Sample velocity profiles $v = f(z=H)$ for channel with vegetation

WERYFIKACJA MODELU

Opracowany model matematyczny dla przepływu w korycie cieku porośniętym roślinnością zweryfikowano, wykorzystując dane pomiarowe wykonane dla cieku Ślęganina: profile prędkości, spadek i = 0,0005 oraz średnią rozstawę roślin $a_x = a_y$ = 0,04 m, co daje m = 625 roślin·m^{-2}.

Średnia głębokość wody w cieku wynosiła 0,75 m, roślinność wystaje wtedy ponad lustro wody na całej szerokości przekroju poprzecznego. Na rysunku 2 przedstawiono pionową strukturę rośliny wraz z pomierzonymi średnicami przekrojów poprzecznych.



Rysunek 2. Pionowa zmienność liczby łodyg i ich średnicy
Figure 2. Vertical variation of stems' numbers and diameter

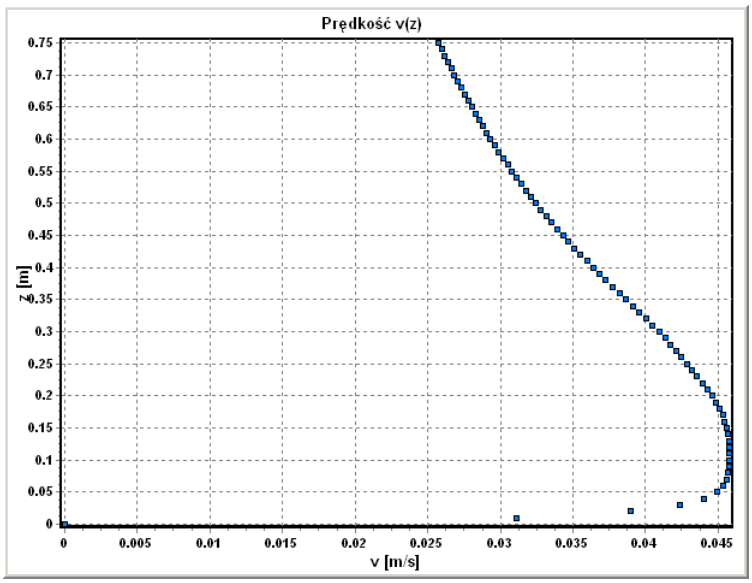
W obliczeniach symulacyjnych założono, że prędkość na dnie koryta wynosi $v(0) = 0$ m·s^{-1}. Prędkość przepływu na powierzchni swobodnej przyjęto za [Kubrak i in. 2005]:

$$v(H) = \sqrt{\frac{2gi}{C_w md}} \tag{16}$$

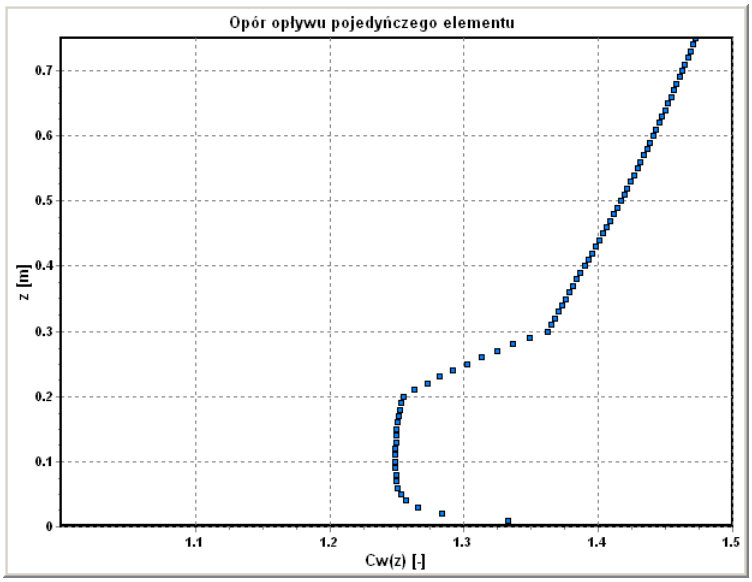
Obliczenia rozkładu prędkości w korycie przeprowadzono dla jednego przekroju pionowego w osi cieku (rys. 3) oraz w trzech przekrojach na skarpie.

Od napełnienia ok. 0,20 m prędkości maleją wraz ze wzrostem napełnienia, ponieważ rosną opory przepływu pojedynczego elementu (rys. 4), a także liczba tych elementów.

Obliczone rozkłady prędkości w kilku charakterystycznych profilach pozwoliły wyznaczyć przepływ całkowity Q_{obl} = 114,5 dm^3·s^{-1}, co wobec przepływu zmierzonego Q_{pom} = 123,1 dm^3·s^{-1} daje błąd względny ok. 7%.



Rysunek 3. Obliczony rozkład prędkości w osi cieku
Figure 3. Calculated velocity profiles in centre of water race



Rysunek 4. Współczynnik oporów opływu pojedynczego elementu jako funkcja głębokości
Figure 4. Resistance coefficient of the flow around single element as a function of the depth

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone pomiary terenowe wykazały istotny wpływ gęstej zabudowy roślinnej w korycie małego cieku Ślęganiny na warunki hydrauliczne przepływu. Hamujące przepływ działanie roślin pokazały wyniki pomiarów prędkości lokalnej, z których żadna wartość nie przekroczyła 7 $cm \cdot s^{-1}$. Podobne rezultaty (v_{max} = 9 $cm \cdot s^{-1}$) uzyskał w porównywalnych ze Ślęganiną, silnie zarośniętych ciekach Holandii Querner [za Kubrakiem i Nachlik 2003].

Małe prędkości przepływu przez szuwary Ślęganiny nie powodowały uginania się roślin pod wpływem parcia hydrodynamicznego. Założenie sztywności łodyg w analizowanym modelu matematycznym jest więc poprawne, aż do momentu przekroczenia pewnej prędkości granicznej, powyżej której należy uwzględniać w opisie sprężystość roślin.

Decydujący wpływ na wzrost oporów przepływu miały: bardzo wysoki stopień przysłonięcia przekroju (~70 %) oraz gęstość roślin. Ze względu na rozbudowaną przestrzennie (także wraz z wysokością roślin; rys. 2) strukturę geometryczną zbiorowisk, pomierzone średnie obsadzenie roślin m = 625 łodyg/m^2 zmienia się radykalnie, gdy z pojedynczej łodygi wyrastają dodatkowe pędy i liście. Ma to swoje odzwierciedlenie w kształcie otrzymanych profili prędkości (rys. 1, 3).

Testowany model matematyczny dla gładkich prostych cylindrów może być wykorzystany również dla zarośniętych małych cieków naturalnych. Konieczne jest jednak wprowadzenie funkcji opisujących pionową zmienność liczby łodyg i ich średnic. Jednak, biorąc pod uwagę kłopotliwy wymóg znajomości pionowej zmienności struktury roślinnej, ze względów praktycznych wskazane jest zastąpienie w ww. modelu gęstości obsadzenia m innym parametrem roślinnym uwzględniającym przestrzenną zmienność zarośli.

BIBLIOGRAFIA

Bajkiewicz-Grabowska E., Magnuszewski A., Mikulski Z. *Hydrometria*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993, s. 313.

Byczkowski A. *Hydrologia.* Tom 1. Wydawnictwo SGGW, Warszawa 1999, s. 416.

Dąbkowski Sz.L., Pachuta K. *Roślinność i hydraulika koryt zarośniętych*. Wydawnictwo IMUZ, Falenty 1996, s. 152.

Głuchowska A. *Wpływ zarastania rowów na wielkość współczynnika szorstkości koryta*. Rozprawa doktorska (maszynopis), Akademia Rolnicza we Wrocławiu, Wrocław 2005, s. 125.

Kowalski J., Molski T., Ekspertyza w sprawie wpływu piętrzenia wody Odry stopniem Brzeg Dolny na grunty obrębu Raków, gm. Oborniki Śląskie, powiat trzebnicki, Wrocław 2009 (maszynopis).

Kubrak E., Marciszewska K., Dohojda M., 2005. *Małe ugięcie elementów elastycznych po wpływem parcia dynamicznego wody*. Acta Scientiarum Polonorum, Architectura, 4 (2), 2005, s. 27–35.

Kubrak J. (red.), Nachlik E. (red,). *Hydrauliczne podstawy obliczania przepustowości koryt rzecznych*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2003, s. 317.

Mokwa M. *Sterowanie procesami fluwialnymi w korytach rzek przekształconych antropogenicznie*. Zeszyty Naukowe Akad. Rol. we Wrocławiu, Rozprawy, 439, Wrocław 2002, s. 137.

Pływaczyk L., *Opinia techniczno-prawna dotycząca ponownego uruchomienia pompowni Raków dla potrzeb odwodnienia użytków rolnych położonych w zlewni rowu Nr 1 (Ślęganina)*. Wrocław 1993, (maszynopis)

Rowiński P., Kubrak J. *Velocity profiles on vegetated flood plains*. Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow, 2002, p. 303-309.

Tymiński T. (red.). *Analiza wpływu roślinności sprężystej na warunki hydrauliczne przepływu w korytach zarośniętych*. Tom 1*:* Właściwości mechaniczne roślin giętkich. Monografia. Wyd. Uniw. Przyr. we Wrocławiu, Wrocław 2007, s. 82.

Tymiński T. *Wpływ roślinności międzywala na warunki przepływu w korycie wielkiej wody*. Rozprawa doktorska (maszynopis), Akademia Rolnicza we Wrocławiu, Wrocław 1999, s. 199.

Praca finansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, grant badawczy nr NN 523 5676 38

Dr Mieczysław Chalfen
Katedra Matematyki
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
mieczyslaw.chalfen@up.wroc.pl

Dr inż. Tadeusz Molski
Instytut Inżynierii Środowiska
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
tadeusz.molski@up.wroc.pl

Dr inż. Tomasz Tymiński
Instytut Inżynierii Środowiska
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
pl .Grunwaldzki 24
50-365 Wrocław
tomasz.tyminski@up.wroc.pl

Recenzent*: Prof. dr hab. inż. Laura Radczuk*