INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Nr 9/2010, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 123–132
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

Wojciech Bartnik, Leszek Książek, Maciej Wyrębek

HYDRAULICZNE WARUNKI WYSTĘPOWANIA PRĄDU WABIĄCEGO DLA PRZEPŁAWEK RYGLOWYCH

HYDRAULIC CONDITIONS OF ALLURING STREAM OCCURRENCE FOR TRANSOM LADDERS

Streszczenie

Opracowane przez Komisję Europejską w 2007 roku szczegółowe rekomendacje wprowadzają nowe uwarunkowania związane z zapewnieniem ciągłości korytarzy rzecznych. Istniejące budowle piętrzące powinny być wyposażone w przepławki dla zachowania warunków restytucji ryb, a nowe budowle hydrotechniczne powinny uwzględniać takie rozwiązania techniczne, które nie powodują zmian stanu hydromorfologicznego. Celem zachowania warunków stabilności biologicznej dla ryb dwuśrodowiskowych wg Instytutu Rybactwa muszą być spełnione następujące kryteria stabilności biologicznej przy projektowaniu i eksploatacji przepławek:

– kryterium prądu wabiącego,
– kryterium prędkości granicznych,
– kryterium dopuszczalnego napełnienia w przepławce,
– kryterium dopuszczalnej wielkości strat Δh przy przepływie przez rygiel dla przepławek ryglowych.

W artykule przedstawiono wyniki modelowania numerycznego 400-metrowego odcinka rzeki obejmującego jaz powłokowy, małą elektrownię wodną oraz przepławkę dla ryb typu ryglowego. Podjęte działania skupiały się na takim ukształtowaniu przepływu w przepławce i modyfikacji konfiguracji dna na wylocie z elektrowni, aby wytworzyć prąd wabiący. Wyniki modelowania numerycznego zostały porównane z wartościami otrzymanymi ze wzorów empirycznych.

Słowa kluczowe: model dwuwymiarowy, przepławka dla ryb, prąd wabiący

Summary

Detailed recommendations formulated by European Commission in 2007 introduce new regulations regarding the continuity of river channels. The existing hydraulic structures should be equipped with fish ladders in order to keep the fish restitution conditions and the new hydro-technical structures should assure technical solutions that do not cause any change in hydro-morphological state. According to the Fisheries Institute the following conditions of biological stability should be followed to keep the biological stability conditions for diadromic fishes:

- *an alluring stream criterion,*
- *a terminal velocity criterion,*
- *a criterion of admissible fish ladder filling,*
- *a criterion of admissible loss Δh for the transom ladder discharge.*

The paper presents results of numerical modeling of 400-meter sector of a river that includes coated weir, small hydrostation and a fish transom ladder. The action taken concentrated on such formation of the discharge in the ladder and modification of the bed configuration in the hydro mouth that creates the alluring stream. Numerical modeling results were compared to results of calculations by empirical formula.

Key words: *2-dimensional model, fish ladder, alluring stream*

WSTĘP

Komisja Europejska opracowała w 2007 roku ogólne i szczegółowe rekomendacje dla krajów członkowskich UE. Według ogólnych rekomendacji dla określenia zintegrowanej polityki wodnej Ramowa Dyrektywa Wodna (RDW) powinna charakteryzować się elastycznością w ustalaniu celów, które winny uwzględniać aspekty środowiskowe, społeczne i ekonomiczne. Zapewnienie integracji pomiędzy różnymi działaniami technicznymi i nietechnicznymi związanymi z gospodarką wodną oparte być powinno na internalizacji kosztów środowiskowych i korzyści.

Według szczegółowych rekomendacji dla energetyki wodnej należy dążyć do ustanowienia jasnych wytycznych dla wydawania pozwoleń na realizację obiektów energetyki wodnej w zgodzie z wymaganiami RDW. Dla ograniczenia nowych lokalizacji elektrowni wodnych w pierwszej kolejności należy dążyć do modernizacji i zwiększenia mocy w istniejących obiektach. Niezbędne są również wstępne prace planistyczne wyznaczające obszary właściwe dla realizacji obiektów hydroenergetycznych uwzględniające wpływ środowiska, warunków ekonomicznych realizacji przedsięwzięcia oraz obszarów, w których realizacja tych inwestycji z uwagi na ograniczenia środowiskowe nie będzie możliwa.

Opublikowane rekomendacje szczegółowe wprowadzają nowe uwarunkowania, związane z zapewnieniem ciągłości korytarzy rzecznych. Istniejące budowle piętrzące powinny być wyposażone w przepławki dla zachowania warunków restytucji ryb, a nowe budowle hydrotechniczne mają uwzględniać takie

rozwiązania techniczne, które nie powodują zmian stanu hydromorfologicznego (Dyrektywa 85/337/EEC o ocenach oddziaływania na środowisko znowelizowana dyrektywami 97/11/WE i 2003/35/WE) [www.rdw.org.pl].

Dla zachowania warunków stabilności biologicznej dla ryb dwuśrodowiskowych muszą być spełnione następujące kryteria stabilności biologicznej [Wiśniewolski i in. 2008]:

– kryterium prądu wabiącego (prąd wabiący > 1,10–1,20 $v_{śr}$),

– kryterium prędkości granicznych określonych dla poszczególnych gatunków ryb,

– kryterium dopuszczalnego napełnienia w przepławce w zależności od gatunków ichtiofauny,

– kryterium dopuszczalnej wielkości strat hydraulicznych Δh przy przepływie przez rygiel dla przepławek ryglowych.

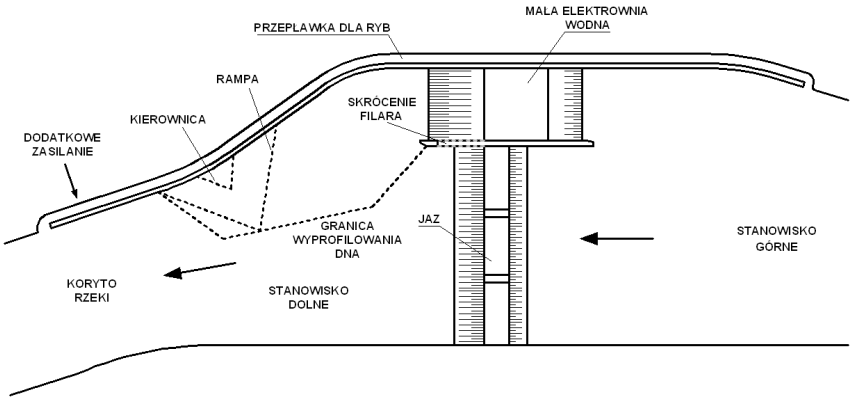
W artykule przedstawiono warunki symulacji potrzebnych do spełnienia kryterium prądu wabiącego na podstawie modelowania dwuwymiarowym modelem numerycznym CCHE2D. Obejmuje ono modyfikację konfiguracji dna na wylocie z elektrowni i regulowanie przepływem w przepławce. Symulacje zostały przeprowadzone dla wydatku turbiny wynoszącego Q = 132 m^3/s.

Weryfikację zasięgu oddziaływania prądu wabiącego przeprowadzono na podstawie procedury obliczeniowej zaproponowanej przez Rembezę [2008].

MODEL NUMERYCZNY

Siatka obliczeniowa została wykonana w programie CCHE2D Mesh Generator. Odcinek rzeki objęty modelowaniem ma długość 400 m. Znajduje się na nim jaz powłokowy, mała elektrownia wodna oraz przepławka typu ryglowego. Przepławka usytuowana jest w prawym umocnieniu brzegu po tej samej stronie co mała elektrownia wodna (rys. 1). Wylot z przepławki znajduje się w odległości 200 m od wylotu z elektrowni. Na tym odcinku siatka została dodatkowo zagęszczona. Liczba węzłów obliczeniowych wynosi 43 316, a ich zagęszczenie 0,1–3,3 m. Obliczenia wzorami empirycznymi zostały przeprowadzone w zasięgu oddziaływania wylotu z przepławki, w punktach odpowiadających węzłom zrobionej wcześniej siatki obliczeniowej. Pozwoliło to na porównanie obu metod.

Na podstawie przeprowadzonego wcześniej modelowania stwierdzono, że przy pracy turbiny o wydatku wynoszącym Q =132 m^3/s i braku modyfikacji wylotu z MEW nie występuje nadwyżka prędkości wody wypływającej z przepławki. Aby zapewnić przewyższenie prędkości proponuje się wzmocnienie prądu wabiącego poprzez doprowadzenie dodatkowej ilości wody rurociągiem [Książek i in. 2008].



Rysunek 1. Plan rozmieszczenia elementów budowli hydrotechnicznej z zaznaczonymi modyfikacjami (linia przerywana)
Figure 1. Plan of hydro-technical structure elements arrangement with marked modifications (dashed line)

Badania podzielono na 2 etapy. W pierwszym etapie sprawdzono wpływ dodatkowego zasilania wylotu z przepławki na tworzenie się prądu wabiącego. Posłużono się tutaj modelowaniem numerycznym oraz obliczeniami wzorami empirycznymi. W drugim etapie skupiono się na modyfikacji wylotu z elektrowni (tab. 1).

Tabela 1. Warianty obliczeniowe
Table 1. Variants of computation

Przypadek Case	Opis Description
v 1.1	Brak dodatkowego zasilania wylotu z przepławki $Q_p = 0$ m^3/s
v 1.2	Dodatkowe zasilanie wylotu z przepławki $Q_p = 1$ m^3/s
v 1.3	Dodatkowe zasilanie wylotu z przepławki $Q_p = 2$ m^3/s
v 2.1	Skrócona filar MEW od strony wody dolnej – skrócenie z 25 do 15 m
v 2.2	Kierownica – wysokość 1,50 m,
v 2.3	Obniżone i wyprofilonowane dno przy wylocie z elektrowni
v 2.4	Skrócony filar MEW + kierownica + obniżone i wyprofilowane dno
v 2.5	Skrócony filar MEW + obniżone i wyprofilowane dno + zastosowanie rampy zamiast kierownicy + dodatkowe zasilanie wylotu z przepławki $Q_p = 1$ m^3/s

Symulacje komputerowe zostały przeprowadzone za pomocą programu CCHE2D opracowanego na Uniwersytecie Missisipi USA. Oprogramowanie CCHE2D umożliwia wykonanie modeli *quasi*-trójwymiarowych, opartych na siatce dwuwymiarowej i wykonanie obliczeń rozkładu prędkości przepływu wody przy zastosowaniu metody elementów skończonych [Zhang 2006]:

$$\frac{\partial Z}{\partial t}+\frac{\partial (hu)}{\partial x}+\frac{\partial (hv)}{\partial y}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=-g\frac{\partial Z}{\partial x}+\frac{1}{h}[\frac{\partial (h\tau_{xx})}{\partial x}+\frac{\partial (h\tau_{xy})}{\partial y}]-\frac{\tau_{bx}}{\rho h}+f_{Cor}v \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=-g\frac{\partial Z}{\partial y}+\frac{1}{h}[\frac{\partial (h\tau_{yx})}{\partial x}+\frac{\partial (h\tau_{yy})}{\partial y}]-\frac{\tau_{by}}{\rho h}-f_{Cor}u \tag{3}$$

gdzie:

u, v – uśrednione prędkości w kierunku x i y,
g – siła przyciągania ziemskiego,
Z – poziom zwierciadła wody,
H – lokalna głębokość wody,
F_{Cor} – parametr Coriolisa,
τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yx} , τ_{yy} – uśrednione na głębokości naprężenia Reynoldsa,
τ_{bx} , τ_{by} – naprężenia styczne na powierzchni dna.

ZASIĘG PRĄDU WABIĄCEGO

Prędkości wody wypływającej z elektrowni (U) i z przepławki (v) odczytano z przeprowadzonego w pierwszym etapie modelowania. Na ich podstawie obliczono przepływ, będący podstawą dalszych obliczeń.

$$q=q_{\min}=\mu b\sqrt{v^2-U^2} \tag{4}$$

gdzie:

b – połowa szerokości wylotu z przepławki [m],
v – prędkość wody wypływającej z przepławki [m/s],
U – prędkość wody wypływającej z elektrowni [m/s].

Następnie obliczono wartości x_s i y_a, określające orientacyjnie strefę oddziaływania strumienia przepławki i porównano te strefy w wynikami modelowania (rys. 3).

$$x_s = -b\sqrt{1+\left(\frac{q}{\mu U b}\right)^2} \tag{5}$$

$$y_{as} = \frac{q}{U} \tag{6}$$

W zasięgu oddziaływania tego strumienia obliczono prędkości przepływu wody:

$$v_x = U + \frac{q}{\mu}\frac{x}{R - x^2 - y^2}\sqrt{\frac{R-b^2}{R+b^2}} \tag{7}$$

$$v_y = \frac{q}{\mu}\frac{y}{R - x^2 - y^2}\sqrt{\frac{R+b^2}{R-b^2}} \tag{8}$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad \text{dla y} \neq 0 \text{ przy } |x| < b \tag{9}$$

$$R = x^2 + y^2 + \sqrt{\left(x^2 + y^2 + b^2\right)^2 - 4x^2b^2} \tag{10}$$

gdzie:

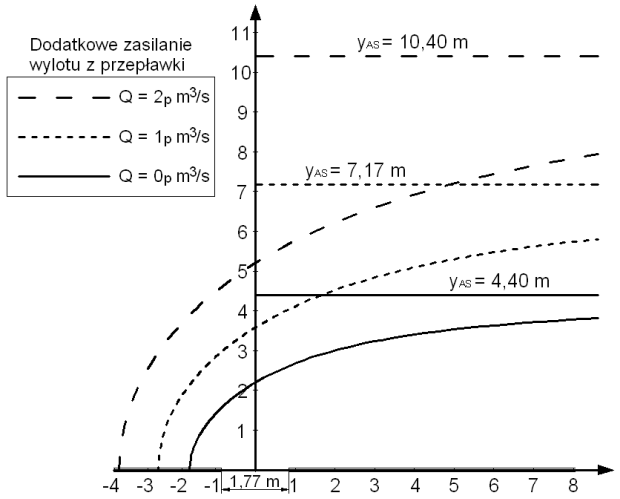
x, y – współrzędne odpowiadające lokalizacji węzłów siatki modelowania.

WYNIKI

W tabeli 2 przedstawiono wyniki dla etapu pierwszego. Widać tutaj zgodność wyników otrzymanych z modelowania i obliczonych wzorami empirycznymi dla wersji v 1.2 oraz v 1,3. W przypadku v 1.1 większy zasięg oddziaływania strumienia wody wypływającej z przepławki uzyskano z symulacji. Przestrzenne rozkłady prędkości przepływu wody uzyskane z modelowania numerycznego posłużyły do obliczenia zasięgu prądu wabiącego zgodnie z procedurą zaproponowaną prze Rembezę. Jako prędkość przepływu wody w korycie przyjęto prędkość, przy której zaczynają mieszać się strugi wody z przepławki i MEW, U = 0,3 m/s (rys. 3). Prędkość ta nie jest stała na całej szerokości koryta, lecz osiąga swą wartość w odległości ok. 3 m od wylotu przepławki. Efekt ten nie jest uwzględniany przy obliczeniach wzorami, gdzie założona jest stała prędkość przepływu wody w korycie. Może to powodować zaniżone wartości oddziaływania strumienia wody wypływającej z przepławki dla mniejszych przepływów.

Tabela 2. Wyniki z modelu i wzorów empirycznych v 1.1 – v 1.3
Table 2. The results gathered from modeling and empirical for v 1.1 – v 1.3

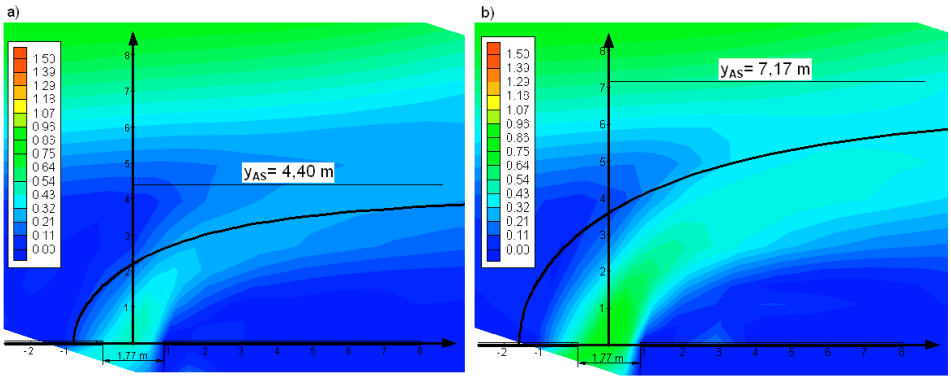
Parametr Parameter	Opis Description	Wersja/Case		
		v 1.1 $Q_p = 0$ m^3/s	v 1.2 $Q_p = 1$ m^3/s	v 1.3 $Q_p = 2$ m^3/s
prędkość przepływu wody v [m/s]	wylot MEW	1,3–1,7	1,3–1,7	1,3–1,7
	wylot przepławki	0,56	0,83	1,16
zasięg oddziaływania strumienia przepławki [m]	modelowanie	6,00	7,00	10,00
	wzory empiryczne	4,40	7,17	10,40



Rysunek 2. Strefa oddziaływania strumienia wody wypływającego z przepławki – wzory empiryczne
Figure 2. Shadow zone caused by outflow of water from the fish ladder – empirical formula

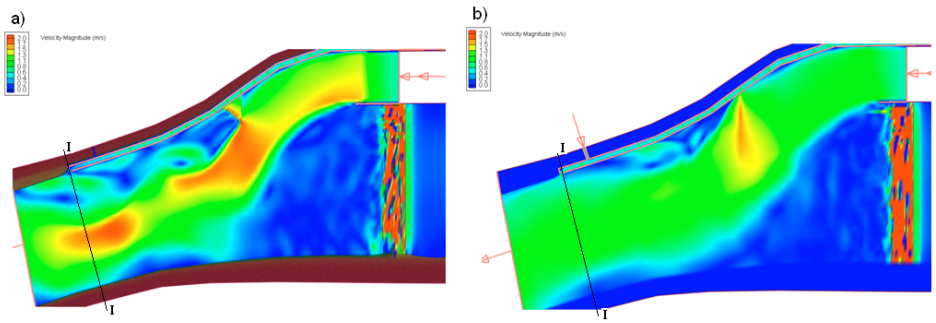
Tabela 3. Wyniki modelowania dla przypadków v 2.1 – v 2.5
Table 3. The results gathered from modeling for v 2.1 – v 2.5

Parametr Parameter	Opis Description	Wersja/Case				
		v 2.1	v 2.2	v 2.3	v 2.4	v 2.5
		$Q_p = 0$ m^3/s	$Q_p = 0$ m^3/s	$Q_p = 0$ m^3/s	$Q_p = 0$ m^3/s	$Q_p = 1$ m^3/s
v [m/s]	wylot MEW	1,1–1,5	1,1–1,9	1,0–1,5	0,8–1,4	1,0–1,4
	wylot przepławki	0,50	0,46	0,60	0,56	0,90
zasięg oddziaływania strumienia przepławki [m]		3,00	11,00	6,00	12,00	14,00



Rysunek 3. Przestrzenny rozkład prędkości dla wylotu przepławki: a) – bez dodatkowego zasilania przepławki, b) – z dodatkowym zasilaniem przepławki Q_p = 1 m^3/s
Figure 3. Spatial distribution of velocity for the fish ladder mouth: a) – no additional supply of the fish ladder, b) – with additional supply of the fish ladder Q_p = 1 m^3/s

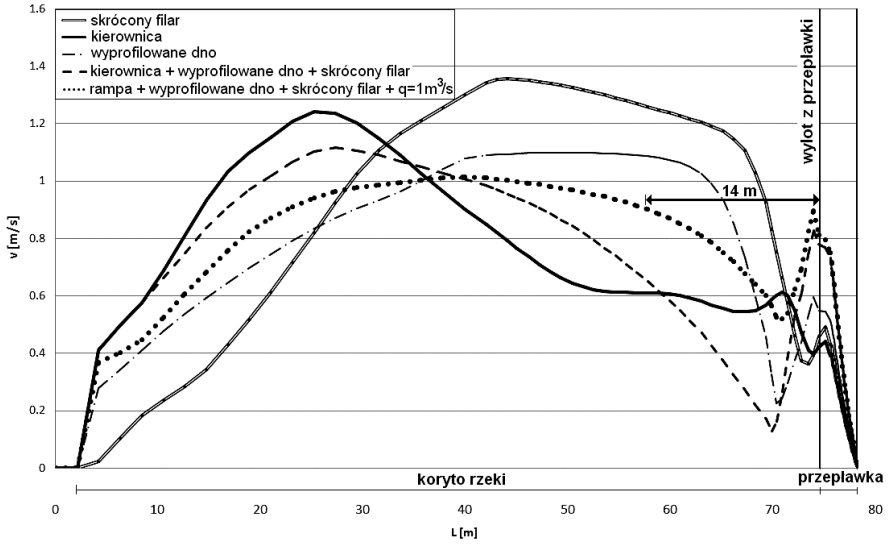
Dla wersji v 2.1 skrócenie filara przyczyniło się do lekkiego poszerzenia strugi wody wypływającej z elektrowni i zbliżenia się jej do wylotu z przepławki. Zastosowanie kierownicy (v 2.2) spowodowało odbicie strumienia i przesunięcie go na drugą stronę koryta. Kierownica powodowała też wzrost turbulencji i prędkości maksymalnych (rys 4). Dla v 2.3 wyprofilowanie dna przy wylocie z elektrowni nie poprawiło znacząco warunków, a zasięg oddziaływania strumienia przepławki wynosi 6 m. Połączenie wszystkich wcześniejszych modyfikacji (v 2.1 – v 2.3) poprawiło warunki, zmniejszając prędkości maksymalne



Rysunek 4. Przestrzenny rozkład prędkości, przypadek obliczeniowy, a) v 2.2. b) v 2.5
Figure 4. Spatial distribution for case a) v 2.2 and b) v 2.5

z 1,9 do 1,4 m/s. Zastosowanie rampy w miejscu kierownicy przyczyniło się do równomiernego rozkładu prędkości w korycie, a w połączeniu z dodatkowym

zasilaniem wylotu z przepławki przepływem Q_p = 1 m^3/s utworzyło wabiący w odległości 14 m (rys 4). Rysunek 5 przedstawia profile średnich prędkości w przekroju I-I.



Rysunek 5. Rozkład średnich prędkości – przekrój I-I
Figure 5. Mean velocity distribution – cross section I-I

PODSUMOWANIE

Program CCHE2D z powodzeniem stosowany jest do rozwiązywania problemów inżynierskich. Jest to model dwuwymiarowy typu 2DH, w którym następuje uśrednienie wielkości hydraulicznych w pionie. Wzory zaproponowane przez Rembezę zostały wyprowadzone przy założeniu przepływu odbywającego się w płaszczyźnie poziomej. Sprawia to, że obie te metody dają porównywalne wyniki, lecz obliczenia wzorami empirycznymi ograniczone są tylko do obszaru bezpośredniego oddziaływania wylotu z przepławki. Na podstawie modelowania zauważono, że na prędkość wody wypływającej z przepławki wpływ ma nie tylko przepływ przez nią, ale także warunki ruchu panujące w korycie głównym. Stwierdzono też, że przesunięcie strumienia wody wypływającej z MEW powoduje zwiększenie prędkości maksymalnych i turbulencji, a więc w modelowaniu warunków hydraulicznych przepływu należy wytworzyć warunki wcześniejszego ograniczenia zasięgu oddziaływania budowli hydrotechnicznej. Wymaga to zarówno dodatkowego zasilania przepławki, jak i zmiany konfiguracji dna na stanowisku dolnym budowli hydrotechnicznej. Dla maksymalnego przepływu

przez elektrownie wodną najlepsze efekty uzyskano dla przykładu obliczeniowego v 2.5, w którym skrócono filar MEW, obniżono i wyprofilowano dno, zastosowano rampę oraz dodatkowe zasilanie wylotu z przepławki $Q_p = 1\ m^3/s$.

PODZIĘKOWANIA

Badania finansowane z grantu badawczo-rozwojowego: N R14 0041 06.

The Authors would like thanks to The University of Mississippi, National Center for Computational Hydroscience and Engineering (NCCHE) for allowing us to use the CCHE2D model.

BIBLIOGRAFIA

Książek L., Bartnik W., Wyrębek M. *Modelowanie numeryczne warunków przepływu wody w przepławce dla ryb*. Ochrona ichtiofauny w rzekach z zabudową hydrotechniczną, Monografia pod redakcją Mokwy M. i Wiśniewolskiego W., Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2008, s.156–164.

Ramowa Dyrektywa Wodna 2000/60/WE (RDW), 2000.

Rembeza L. *Hydrauliczne warunki przepływu w strefie wejścia ryb do przepławki*. Gospodarka Wodna nr 3/2008, Wydawnictwo SIGMA-NOT, s.102–104.

Wiśniewolski W., Mokwa M., Zioła S. *Migracje ryb – przyczyny zagrożenia i możliwości ochrony*. Ochrona ichtiofauny w rzekach z zabudową hydrotechniczną, Monografia pod redakcją Mokwy M. i Wiśniewolskiego W., Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2008, s.9–19.

Zhang Y. *CCHE-GUI – Graphical User Interface for NCCHE Model USER's Manual* – Version 3.0, National Center for Computational Hydroscience and Engineering, School of Engineering, The University of Mississippi, MS 38677, portable document, http:/ncche. olemiss.edu, 2006, s. 158.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Bartnik
Dr inż. Leszek Książek
Mgr inż. Maciek Wyrębek
Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków
tel. (012) 662-40-23
rmksiaze@cyf-kr.edu.pl

Recenzent: *Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Parzonka*