

MODELOWANIE FIZYCZNE I NUMERYCZNE PRZEPLYWU WODY W PRZEPLAWCE BIOLOGICZNEJ

Leszek Książek, Andrzej Strużyński, Małgorzata Leja,
Ewelina Pilch

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki modelowania numerycznego warunków przepływu wody w przepławkach biologicznych w formie kanału stanowiącego obejście budowli hydrotechnicznej naśladowującego naturalny strumień, z funkcją kanału tarłowego. Wyniki modelowania porównano z wynikami pomiarów laboratoryjnych rozkładu prędkości w różnych typach siedlisk występujących w naturalnych strumieniach, od przepływu spokojnego do przepływu szybkiego. Uzyskano rozkłady trzech składowych prędkości v_x , v_y i v_z w charakterystycznych punktach profilu podłużnego i przekroju poprzecznego: (1) na zbystrzeniu, (2) w strefie oraz (3) poza strefą turbulencji dla różnych konfiguracji dna i wielkości rumowiska. Wielkości te posłużyły do wyznaczenia profili prędkości, prędkości średnich oraz charakterystyki lokalnych warunków przepływu. Podjęto próbę przeniesienia wyników uzyskanych przy użyciu modelu fizycznego na obiekty rzeczywiste z wykorzystaniem teorii podobieństwa zjawisk fizycznych.

Słowa kluczowe: warunki siedliskowe dla ryb, trzy składowe prędkości, podobieństwo zjawisk

WSTĘP

Rzeki i potoki górskie są dynamicznymi i zróżnicowanymi ekosystemami, a tymczasem w ostatnich latach ich wykorzystanie miało charakter jedynie gospodarczy. Spowodowało to w głównej mierze degradację równowagi ekologicznej oraz przyspieszyło przebieg procesów morfologicznych. Zgodnie z Ramową Dyrektywą Wodną (RDW) w częściach wód uznanych za silnie zmienione i sztuczne należy dążyć do osiągnięcia dobrego potencjału ekologicznego, a w pozostałych do dobrego stanu ekologicznego. Ma to być zrea-

Adres do korespondencji – Corresponding author: dr hab. inż. Leszek Książek, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, e-mail: rmksiaze@cyf-kr.edu.pl.

Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2009–2011 jako projekt badawczy N N523 453736.

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

lizowane między innymi poprzez przebudowę poprzecznych budowli wodnych, tak aby stworzyć jak najlepsze warunki migracji i życia ryb oraz innych organizmów wodnych.

Tylko nieliczne gatunki ryb prowadzą mało ruchliwy tryb życia, bytując na wąskim, wyizolowanym obszarze. Większość gatunków odbywa bliższe lub dalsze wędrówki, które są niezbędne w poszczególnych fazach cyklu życiowego. Do odbycia tej wędrówki potrzebne jest przywrócenie ciągłości ekosystemu rzecznego. Służą do tego celu przepławki dla ryb. Skuteczność działania urządzeń służących migracji ryb wyrażana jest dwoma parametrami:

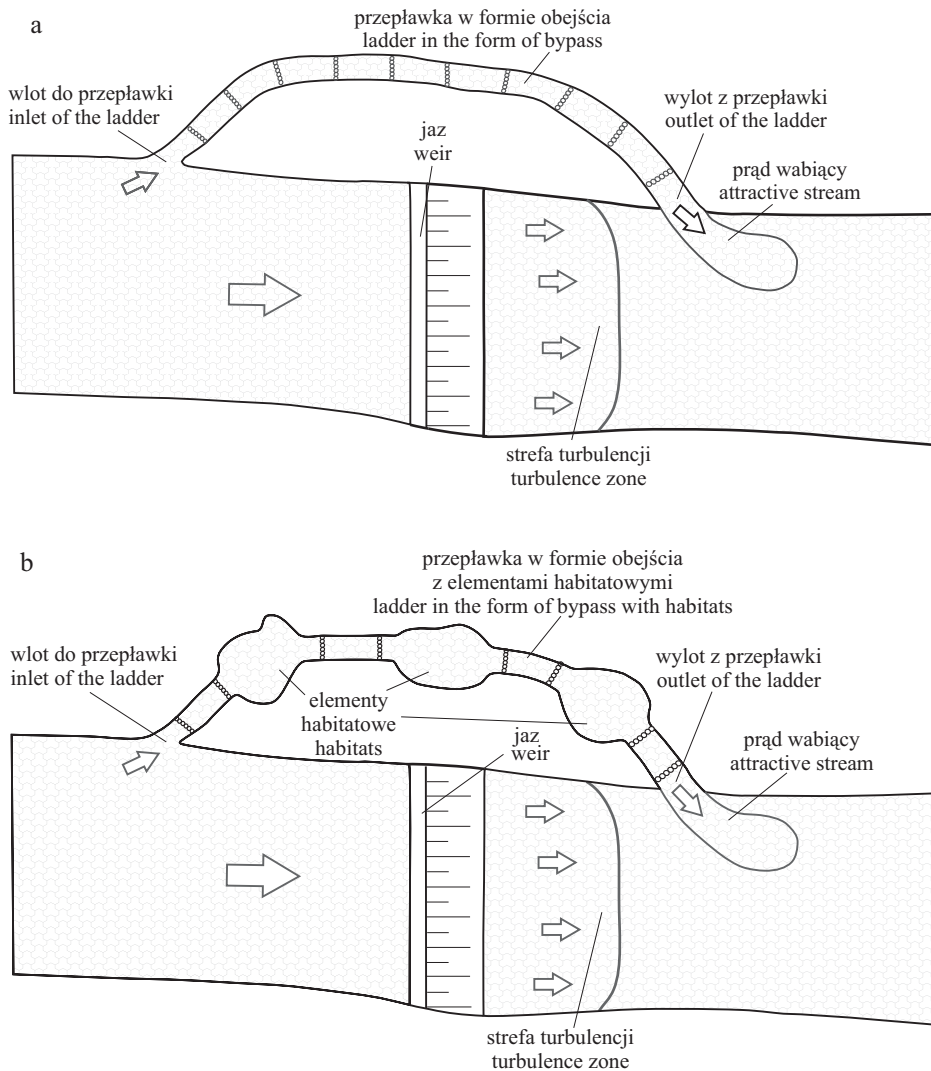
- 1) odsetkiem ryb danego gatunku, które pokonały przeszkodę, w stosunku do liczby wszystkich ryb usiłujących ją pokonać (%),
- 2) opóźnieniem w migracji, to znaczy długością czasu zużytego na pokonanie przeszkody (godz. lub doba).

Pomimo prowadzonych od wielu lat badań nie ma jednego sprawdzonego typu przepławki, a problem za każdym razem musi być rozwiązywany lokalnie. Może to wynikać stąd, że w procesie projektowania rozwiązań konstrukcyjnych posługujemy się wartościami średnimi w przekroju poprzecznym, co upraszcza zagadnienie przepływu wody przez przepławkę (model jednowymiarowy). Lepsze wyniki uzyskuje się, stosując dwuwymiarowe modele numeryczne (2D), gdzie otrzymujemy przestrzenną analizę rozkładów prędkości [Książek i in. 2008]. Jednak i w takim przypadku warunki przepływu wody charakteryzuje się wartościami średnimi w pionie, których rozkład w przekroju poprzecznym zależy od liczby przyjętych węzłów obliczeniowych. Uzupełnieniem modelowania numerycznego mogą być pomiary laboratoryjne. Uzyskujemy możliwość poznania między innymi pionowych rozkładów prędkości, intensywności turbulencji w strefie przydennej oraz zasięgu oddziaływania dna na warunki przepływu wody dla przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych. Wspomaganie projektowania rozwiązań konstrukcyjnych pomiarami laboratoryjnymi oraz modelowaniem numerycznych warunków przepływu wody jest nieodzowne w procesie przywracania ciągłości ekologicznej cieków i restytucji ryb dwuśrodowiskowych [Wiśniewolski 2008]. Przy przenoszeniu wyników z modelu do warunków rzeczywistych trudność może stanowić zachowanie wszystkich skal podobieństwa [Kubrak i Kubrak 2010]. W praktyce wypracowane rozwiązanie konstrukcyjne przepławki stanowi kompromis pomiędzy kosztem uzyskania tego rozwiązania a dokładnością wyniku.

Praca niniejsza stawia sobie za cel określenie warunków hydraulicznych przepływu wody w przepławkach biologicznych. Charakterystyka warunków hydraulicznych przepływu wody zostanie sporządzona na podstawie pomiarów laboratoryjnych i symulacji numerycznych przepływu wody poprzez określenie warunków kształtowania się prędkości przepływu.

MATERIAŁY I METODY BADAŃ

Przepławki bliskie naturze stanowiące obejście budowli hydrotechnicznej, naśladujące naturalny strumień, z funkcją kanału tarłowego przedstawiono schematycznie na rys. 1a i 1b. Konfiguracja dna powinna odtwarzać sekwencje zbystrzeń i plos występujących w naturalnych strumieniach górskich. Pozwala to na zróżnicowanie warunków przepływu wody na długości przepławki, a tym samym na odtworzenie siedlisk występujących w naturalnych strumieniach, od przepływu spokojnego do przepływu szybkiego.



Rys. 1. Obejście w formie kanału: a) naśladowującego naturalny strumień, b) z elementami habitatowymi

Fig. 1. Fish bypass channel: a) as a natural stream, b) with habitat elements

Ponadto przepławki tego typu wyglądają bardziej estetycznie od przepławek z betonu i często są tańsze w wykonaniu.

Badania warunków hydraulicznych przepływu wody wykonano w uchylnym korycie hydraulicznym o wymiarach $12,0 \times 0,5 \times 0,6$ m z zamkniętym obiegiem wody. Pomiarzy prędkości wody zostały przeprowadzone przy użyciu urządzenia, którego działanie opiera się na efekcie Dopplera. Przed przystąpieniem do badań wykonano testowe pomiary zmierzające do ustalenia optymalnych częstotliwości próbkowania oraz czasu trwania

pomiaru. Przyjęto częstotliwość pomiaru 20 Hz, a czas trwania pomiaru ustalono na 60 s [Aberle i in. 2008]. Każda próba pomiarowa prędkości wody liczyła ok. 1200 danych.

Obliczenia warunków przepływu wody przez przepławkę przeprowadzono z wykorzystaniem modelu CCHE2D opracowanego przez Center for Computational Hydroscience and Engineering na University of Mississippi w USA [Jia i Wang 2001]. Model CCHE2D umożliwia wykonanie obliczeń w warunkach ustalonego lub nieustalonego przepływu wody w rzekach i korytach otwartych i z powodzeniem był stosowany w symulacji warunków przepływu wody przez rozbudowane układy hydrauliczne.

CCHE2D jest modelem dwuwymiarowym typu 2DH (dwuwymiarowy w planie). W modelach tego typu następuje uśrednienie wielkości hydraulicznych w pionie. Poziom zwierciadła wody jest obliczany z równania ciągłości. Do rozwiązywania równań różniczkowych (równania zachowania energii, pędu, masy) używa się metody elementów skończonych. Obliczenia parametrów przepływu wykonywane są w węzłach siatki, której wymiary powinny uwzględniać warunki przepływu.

WYNIKI

Badania warunków hydraulicznych przepływu wody przez przepławkę w formie obejścia przeprowadzono dla dna z czterema różnymi wielkościami rumowiska. Pomiaru wykonano dla spadków dna z zakresu ujemne – dodatnie. Wykorzystane przepływy wody miały wartości $0,0325 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $0,0375 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ oraz $0,0458 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

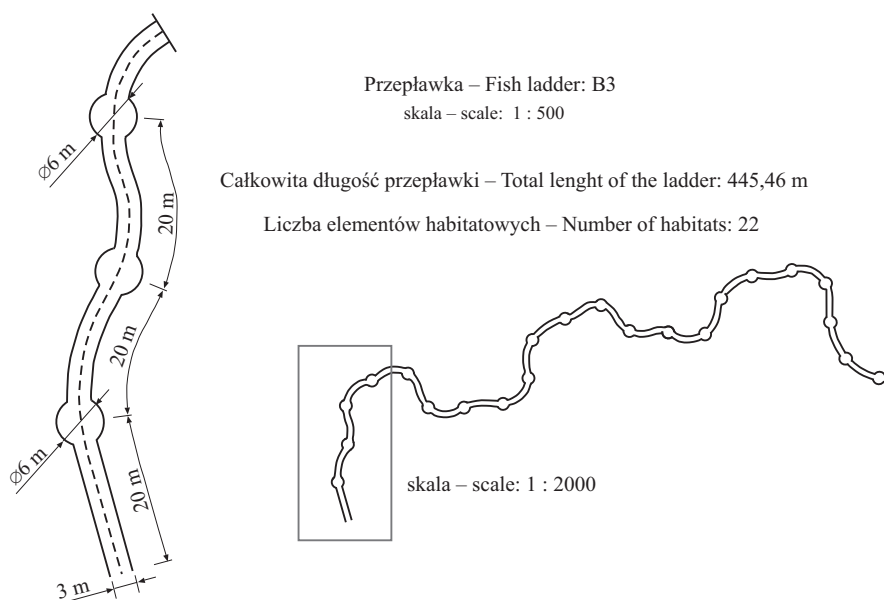
Przebadano różne typy siedlisk występujących w naturalnych strumieniach, od przepływu spokojnego do przepływu szybkiego. Badania laboratoryjne przeprowadzono w pięciu seriach pomiarowych oznaczonych następująco:

- D1, D2 i D3 – rumowisko odpowiednio $d_i = 0\text{--}2$, $2\text{--}4$, $4\text{--}6$ cm, płaskie dno koryta;
- D4a i D4b – rumowisko $d_i = 6\text{--}8$ cm, dno koryta wyprofilowano tak, aby uzyskać zróżnicowanie prędkości w przekroju poprzecznym; w D4b dodatkowo zastosowano progi.

Modelowanie numeryczne przepławkę bliskich naturze przeprowadzono dla rzeczywistych warunków przepływu wody. Wykonano model przepławkę w formie obejścia budowli naśladowującej naturalny strumień, z funkcją kanału tarłowego. Modelowanie numeryczne przeprowadzono dla różnych wariantów obliczeniowych obejmujących przypadki strumienia bez elementów różnicujących o długości 445 m i szerokości 3 m w wariacie podstawowym A oraz z elementami różnicującymi przepływ wody, tj. z progami o różnych wysokościach i rozstawach w wariantach C1, C2 i C3 – odpowiednio co 60, 40 i 20 m – a w trzech wariantach B z elementami habitatowymi o różnej głębokości, w obrębie których szerokość koryta wynosi 6 m; w wariacie B1 poszerzenia rozmieszczone zostały co 60 m, w wariacie B2 co 40 m, a w wariacie B3 co 20 m (rys. 2). Symulacje komputerowe w każdym wariacie konstrukcyjnym obejmowały różne spadki dna kanału: 0,0025, 0,0030 i 0,0035, oraz rozmaite wartości przepływu: $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $2,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (przepływ jednostkowy od $0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ do $0,83 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

Parametry symulacji są następujące: czas 600 s, krok czasowy 0,05 s – łącznie 12 000 kroków. Siatka obliczeniowa składa się z 69 099 węzłów (31×2229 węzłów). Pojedyncza komórka obliczeniowa odpowiada figurze zbliżonej do prostokąta o wymiarach $0,10 \text{ cm} \times 0,20 \text{ m}$.

Na rys. 3 tytułem przykładu przedstawiono przestrzenny rozkład prędkości średnich w przepławce bez elementów różnicujących warunki przepływu dla spadku dna



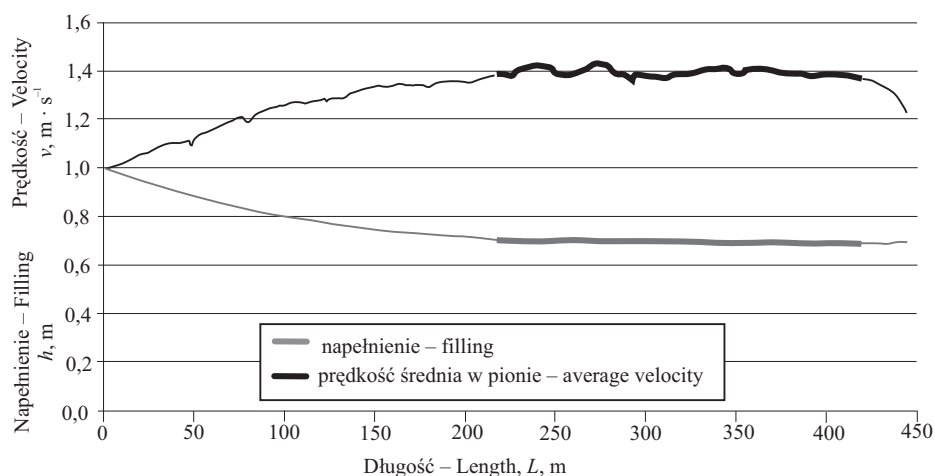
Rys. 2. Fragment przepławki z elementami habitatowymi – wariant B3 [Pilch 2011]

Fig. 2. Fragment of fish bypass channel with habitat elements – variant B3 [Pilch 2011]

$I = 0,0035$ przy przepływie $Q = 2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($q = 0,83 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). Warunki przepływu wody w górnej części przepławki, poza obszarem oddziaływania cofki z dolnego stanowiska, są ustalone. Na znacznej jej długości prędkość przepływu wynosi $1,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Napełnienie na tym odcinku przepławki jest stałe na ok. 250 m i wynosi ok. 0,7 m. Zauważalny jest brak zróżnicowania wektorów prędkości w nurcie głównym zarówno w przekrojach poprzecznych, jak i na długości przepławki (rys. 4a). Dla opisanych warunków hydraulicznych naprężenia styczne na dnie osiągają wartości ok. $22 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$.

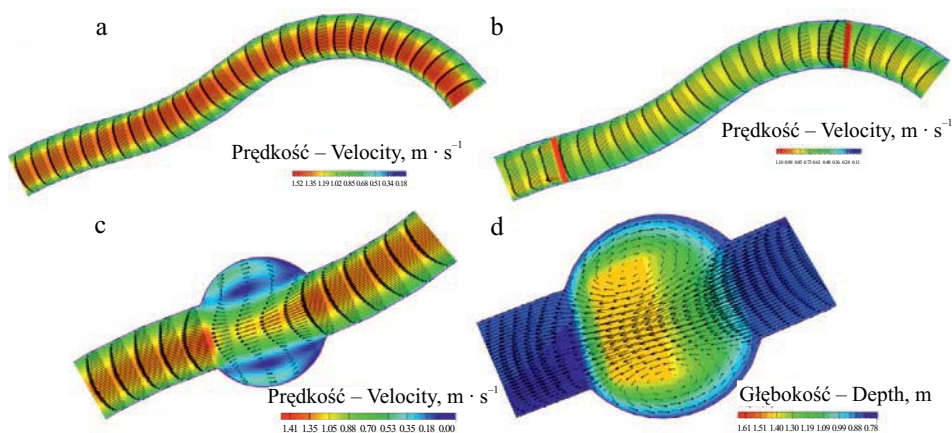
Na rys. 4b przedstawiono prędkość przepływu wody przy spadku dna $I = 0,0030$ i przepływie $Q = 0,83 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, z elementami różnicującymi warunki przepływu wody w postaci progów o wysokości 0,6 m (wariant C). Średnia prędkość przepływu w basenach wynosi ok. $0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Na progach prędkość wody wzrasta do $1,7\text{--}1,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Napełnienie w komorach przepławki wynosi ok. 1,1 m, a na przelewach ok. 0,5 m. Redukcja prędkości w basenach powoduje spadek naprężeń stycznych do wartości ok. $8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$.

Elementy rozpraszające energię w przepławce z funkcją kanału tarlowego stanowią baseny o szerokości 6 m i głębokości 0,6 m. Przestrzenny rozkład prędkości średnich w przepławce z elementami habitatowymi, które różnicują warunki przepływu dla spadku dna $I = 0,0035$ przy przepływie $Q = 2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, przedstawiono na rys. 4c. Wartości prędkości średniej są zróżnicowane na długości przepławki. Na odcinkach pomiędzy elementami habitatowymi średnie prędkości przepływu wody wynoszą ok. $1,2\text{--}1,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. W basenach ulegają redukcji do wartości $0,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Ponadto w basenach zauważalne są wiry i miejsca zastoiskowe (rys. 4d), które z jednej strony stwarzają warunki do odpoczynku, ale z drugiej – mogą dezorientować ryby. Obecność elementów habitatowych sprzyja zróżnicowaniu warunków siedliskowych ze względu na zmienne prędkości przepływu, napełnienia oraz naprężenia styczne na dnie.



Rys. 3. Obliczone napętnienie oraz średnia prędkość przepływu w przepławce – wariant A, spadek dna $I = 0,0035$, przepływ $Q = 2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 3. Calculated water depth and average velocity in fishladder – variant A for bed slope $I = 0.0035$ and discharge $Q = 2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

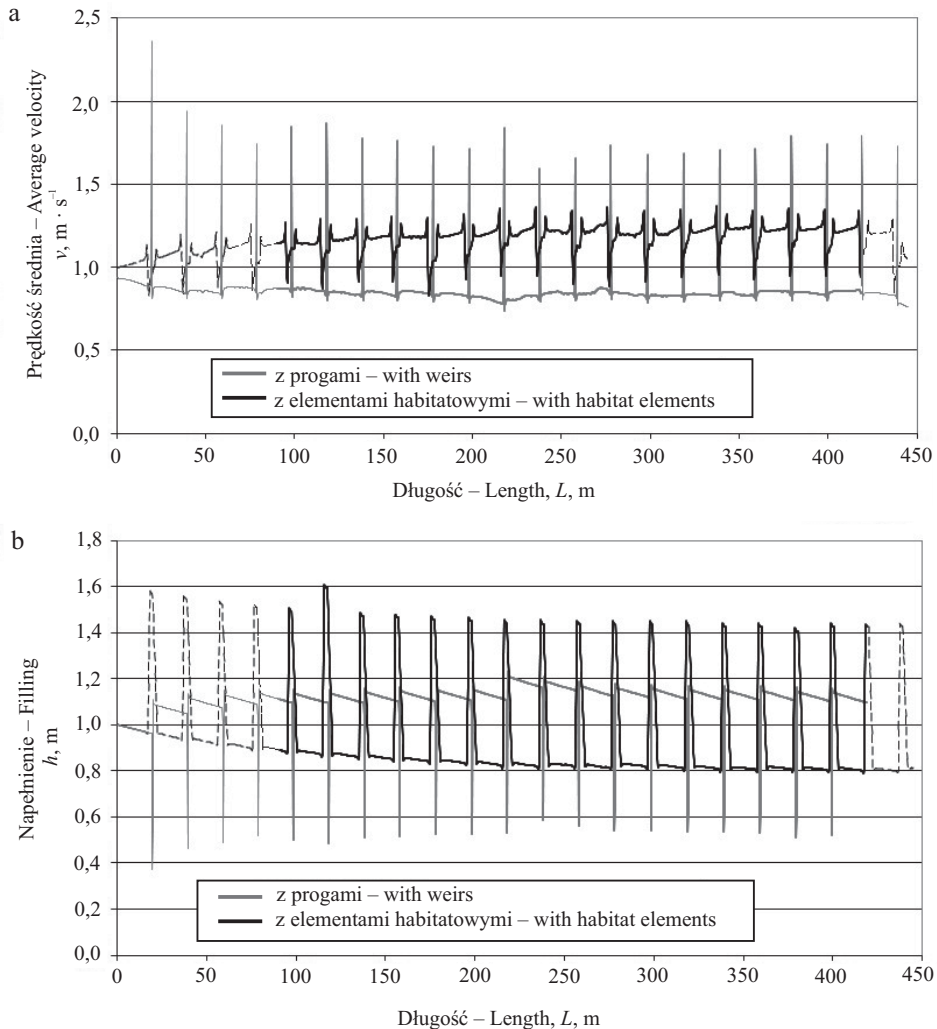


Rys. 4. Wektory prędkości dla $Q = 2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$: a) wariant A, $I = 0,0035$, b) wariant C, $I = 0,0035$, c) wariant B, $I = 0,0035$, d) w basenie na tle głębokości, wariant B, $I = 0,0030$

Fig. 4. Velocity vectors for $Q = 2.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$: a) variant A, $I = 0.0035$, b) variant C, $I = 0.0035$, c) variant B, $I = 0.0035$, d) velocity vectors and water depth at pool, variant B, $I = 0.0030$

ANALIZA WYNIKÓW

Porównanie warunków hydraulicznych przepływu wody w przepławkach bez elementów i z elementami różnicującymi warunki przepływu wskazują na istotną redukcję prędkości przepływu (rys. 5a) przy jednoczesnym zwiększeniu napętnień (rys. 5b) oraz zmniejszeniu naprężeń stycznych. Na odcinkach pomiędzy progami (seria C) prędkość przepływu wody jest mniejsza w stosunku do prędkości otrzymanej dla odcinków pomiędzy elementami habitatowymi (seria B). Jednak na przelewie przez próg prędkości wody przekraczają

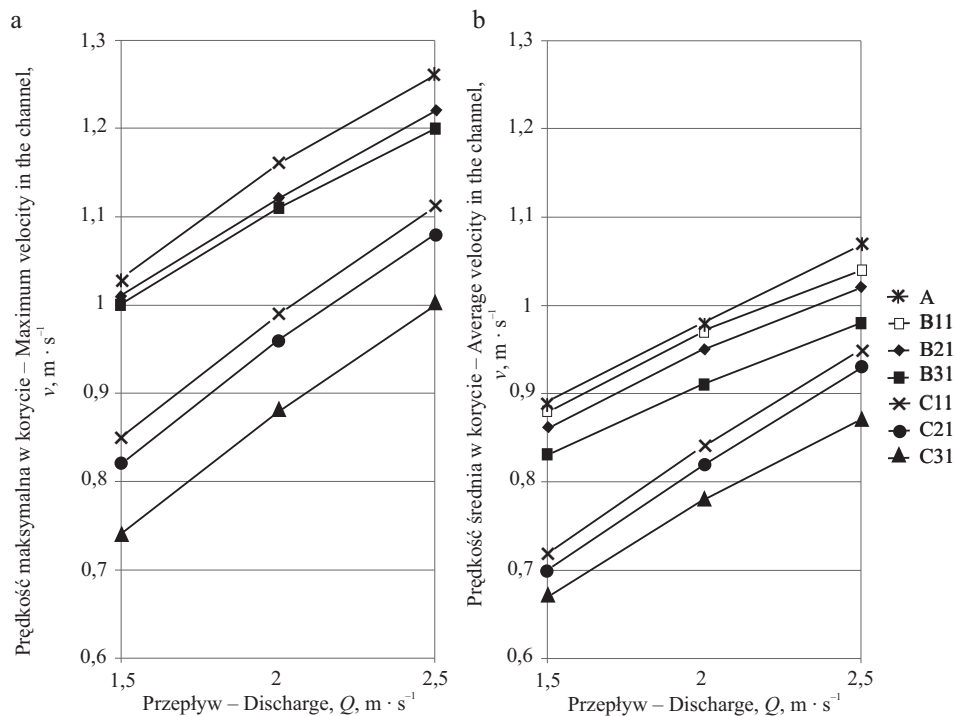


Rys. 5. Warunki przepływu wody przez przepławkę dla spadku dna $I = 0,003$ i przepływu $Q = 2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$: a) prędkość średnia w pionie, b) napełnienie

Fig. 5. Water flow conditions along fishlader for $I = 0,003$ and discharge $Q = 2.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$: a) vertical average velocity, b) water depth

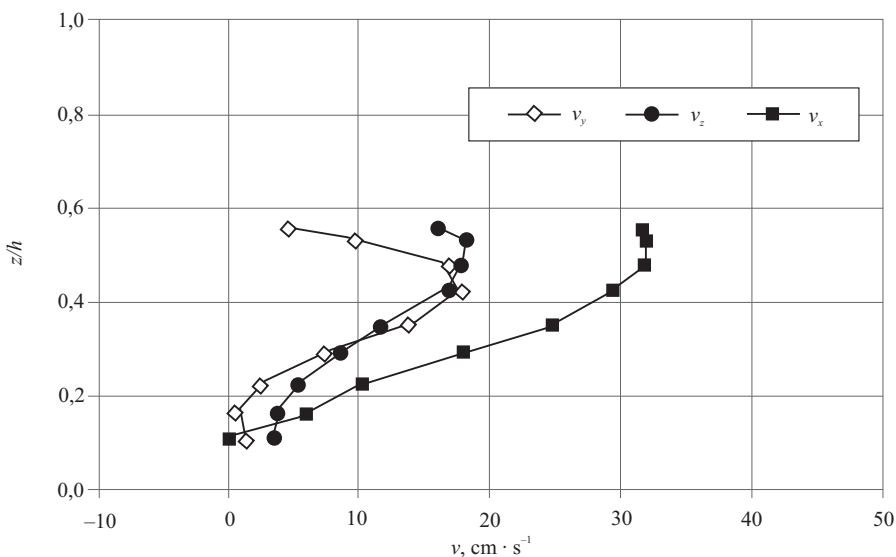
wartości graniczne, uniemożliwiając pokonanie ich przez ichtiofaunę. W przepławkach z elementami habitatowymi prędkości nie przekraczają nigdy dopuszczalnych wartości, a więc w tym typie przepławki występują korzystniejsze warunki hydrauliczne.

Odległości pomiędzy elementami konstrukcyjnymi przepławek mają wpływ na napełnienie, a tym samym na zmniejszenie prędkości przepływu. Na podstawie symulacji numerycznych można stwierdzić, że zmniejszanie odległości pomiędzy elementami konstrukcyjnymi może prowadzić do poprawy warunków hydraulicznych przepływu wody (rys. 6).

Ryc. 6. Obliczone maksymalne i średnie prędkości przepływu dla spadku $I = 2,5\text{‰}$ Fig. 6. Calculated maximum and average flow velocity for bed slope $I = 2.5\text{‰}$

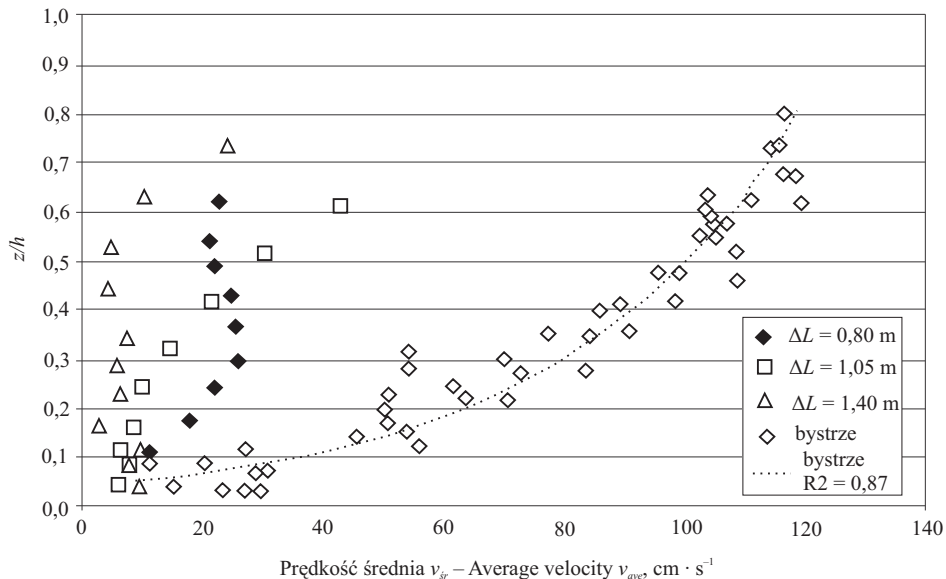
Dwuwymiarowe modelowanie numeryczne nie pozwala na zróżnicowanie wartości prędkości przepływu w pionie hydrometrycznym oraz na analizę składowych prędkości. Przykładowe wyniki pomiarów laboratoryjnych przedstawiono na rys. 6, gdzie zaprezentowano rozkłady trzech składowych prędkości: v_x , v_y i v_z , w jednym z przekrojów znajdującym się w strefie turbulencji, dla rumowiska 6–8 cm, spadku dna $I = 0,0167$ oraz przepływu $Q = 0,0458 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Maksymalna zmierzona wartość składowej prędkości v_x wynosi $0,33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. W strefie turbulencji składowe prędkości poprzeczne v_y i pionowe v_z osiągają zbliżone wartości i wynoszą $0,18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Na rys. 8 przedstawiono rozkłady prędkości średnich poza strefą turbulencji dla układów z rozstawą progów wynoszącą $\Delta L = 0,80 \text{ m}$, $1,05 \text{ m}$ i $1,40 \text{ m}$ na tle rozkładu prędkości na bystrzu. Zauważalne jest zróżnicowanie prędkości przepływu wody i zakłócenie logarytmicznego rozkładu owych prędkości. Efekt ten jest wywołany obecnością progów, które redukują prędkości. Na przelewach prędkości wzrastają do $0,95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ przy spadku $0,0083$ oraz $1,2\text{--}1,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ przy spadku $0,256$ ($x = 4,95 \text{ m}$, tab. 1), które to prędkości są akceptowalne z punktu wymagań ichtiofauny [Wiśniewolski 2008]. W tab. 1 zestawiono napełnienia, prędkości średnie w przekroju poprzecznym oraz liczby Froude'a, których wartości mniejsze od $1,0$ wskazują na ruch spokojny wody, a większe od 1 na ruch rwący.



Rys. 7. Składowe prędkości v_x , v_y i v_z w strefie turbulencji, spadek dna $I = 0,0167$, przepływ $Q = 0,0458 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,

Fig. 7. Velocity components v_x , v_y and v_z in turbulent zone, bed slope $I = 0.0167$, discharge $Q = 0,0458 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$



Rys. 8. Rozkłady prędkości średnich v_{sr} w basenie, poza strefą turbulencji oraz na zbystrzeniu; rurowisko 6–8 cm, spadek dna $I = 0,0083$, przepływ $Q = 0,0458 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,

Fig. 8. Average velocity distributions v_{ave} in pool, outside turbulent zone and riffle zone; bed material 6–8 cm, bed slope $I = 0.0083$, discharge $Q = 0.0458 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

Tabela 1. Napełnienie, prędkość średnia w przekroju poprzecznym oraz liczba Froude'a dla różnych warunków przepływu wody w korycie hydraulicznym

Table 1. Water depth, cross-section average velocity and Froude number for different water flow conditions

Przypadek Case	Spadek Slope, I	x m	y m	$Q = 0,0319 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$			$Q = 0,0375 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$			$Q = 0,0458 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$			
				h m	v_{sr} $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Fr	h m	v_{sr} $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Fr	h m	v_{sr} $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Fr	
Bystrze D4a	-0,0254	4,35	0,070	0,213	0,50	0,34	0,225	0,52	0,35	0,242	0,57	0,37	
			0,140	0,184		0,37	0,196		0,38	0,213		0,40	
			0,205	0,194		0,36	0,206		0,37	0,223		0,39	
			0,275	0,165		0,39	0,177		0,40	0,194		0,42	
	-0,0084	4,35	0,070	0,203	0,53	0,38	0,213	0,57	0,40	0,225	0,64	0,43	
			0,140	0,174		0,41	0,184		0,43	0,196		0,46	
			0,205	0,174		0,40	0,194		0,41	0,206		0,45	
			0,275	0,184		0,43	0,165		0,45	0,177		0,49	
	0,0083	4,35	0,070	0,166	0,74	0,58	0,176	0,78	0,59	0,192	0,83	0,60	
			0,140	0,137		0,63	0,147		0,65	0,163		0,65	
			0,205	0,147		0,61	0,157		0,63	0,173		0,63	
			0,275	-	-	-	-	-	-	0,144		0,70	
0,0167	4,35	0,070	0,153	0,84	0,68	0,163	0,87	0,69	0,179	0,93	0,70		
		0,140	0,124		0,76	0,134		0,76	0,150		0,76		
		0,205	0,134		0,73	0,144		0,73	0,160		0,74		
		0,275	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
0,0256	4,35	0,070	0,140	0,96	0,82	0,150	0,99	0,82	0,166	1,04	0,81		
		0,140	0,111		0,92	0,121		0,91	0,137		0,90		
		0,205	0,121		0,88	0,131		0,88	0,147		0,86		
		0,275	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Progi $\Delta L = 0,80 \text{ m}$ D4b1	0,0083 (S)	4,95	0,195	0,080	0,95	1,07	0,090	0,95	1,01	0,100	0,95	0,97	
			4,55	0,242	0,36	0,23	0,251	0,40	0,26	0,262	0,46	0,29	
			4,04	0,237	0,37	0,24	0,250	0,40	0,26	0,270	0,45	0,27	
	0,0167 (T)	4,95	0,195	0,070	1,12	1,35	0,080	1,11	1,25	0,090	1,06	1,13	
			4,55	0,230	0,38	0,26	0,242	0,42	0,27	0,254	0,48	0,31	
			4,04	0,238	0,37	0,24	0,250	0,40	0,26	0,262	0,46	0,29	
	0,0256 (T)	4,95	0,195	0,060	1,31	1,71	0,080	1,05	1,19	0,085	1,20	1,31	
			4,55	0,221	0,41	0,28	0,234	0,44	0,29	0,249	0,50	0,32	
			4,04	0,227	0,39	0,26	0,242	0,42	0,27	0,259	0,47	0,30	
	Progi $\Delta L = 1,05 \text{ m}$ D4b2	0,0083 (T)	5,00	0,175	0,217	0,40	0,27	0,214	0,46	0,32	0,252	0,46	0,29
				4,60	0,225	0,38	0,26	0,228	0,43	0,29	0,257	0,46	0,29
		0,0167 (T)	5,00	0,175	0,211	0,41	0,28	0,207	0,48	0,34	0,256	0,45	0,29
4,60				0,219	0,40	0,27	0,224	0,44	0,30	0,256	0,46	0,29	
0,0256 (T)		5,00	0,175	0,206	0,42	0,30	0,207	0,48	0,34	0,236	0,50	0,33	
			4,60	0,217	0,40	0,27	0,222	0,44	0,30	0,239	0,50	0,33	
Progi $\Delta L = 1,40 \text{ m}$ D4b3		0,0083 (T)	5,23	0,175	0,225	0,37	0,25	0,232	0,42	0,28	0,216	0,56	0,38
				5,00	0,227	0,37	0,25	0,235	0,41	0,27	0,218	0,55	0,38
		0,0167 (T)	5,23	0,175	0,217	0,38	0,26	0,224	0,43	0,29	0,245	0,47	0,31
				5,00	0,221	0,38	0,26	0,229	0,43	0,29	0,247	0,47	0,30
		0,0256 (P)	5,23	0,175	0,216	0,39	0,27	0,212	0,47	0,32	0,231	0,51	0,34
				5,00	0,218	0,39	0,26	0,215	0,46	0,32	0,236	0,50	0,33

Warunki przepływu przez przelew – Flow conditions across overflow:

przekrój – cross-section $x = 4,95 \text{ m}$; w strefie turbulencji – within turbulence zone $x = 4,55, 5,00, 5,23 \text{ m}$;poza strefą turbulencji – outside turbulence zone $x = 4,04, 4,60, 5,00 \text{ m}$;

S – przelewanie się strumienia ponad koronami progów – streaming flow,

T – strefa turbulencji obejmująca cały basen – transition flow,

P – strefa turbulencji występująca tylko w obrębie przelewu – plunging flow

Dla przeprowadzonych pomiarów laboratoryjnych występują trzy rodzaje ruchu wody w basenach (tab. 1): przelewanie się strumienia ponad koronami progów, strefa turbulencji obejmująca cały basen oraz strefa turbulencji występująca tylko w obrębie przelewu. Sposób, w jaki następuje przepływ wody przez baseny, jest przyczyną zróżnicowania profilów prędkości w obrębie basenów.

DYSKUSJA

Przeniesienie uzyskanych na modelu fizycznym wyników na obiekty rzeczywiste przeprowadza się przy wykorzystaniu teorii podobieństwa zjawisk fizycznych. Siłami działającymi na przepływający strumień są siły bezwładności, ciężkości, tarcia, sprężystości i napięcie powierzchniowych. Uzyskanie pełnego podobieństwa dynamicznego (wszystkich sił) jest praktycznie niemożliwe. Jeżeli jedną z sił uznamy za dominującą w zjawisku, wystarczy, aby stosunki tych sił i sił bezwładności były sobie równe [Kubrak i Kubrak 2010]. W przypadku modelowania warunków hydraulicznych przepływu wody za dominującą siłę uznajemy siłę ciężkości. Według kryterium podobieństwa Froude'a dwa układy podobnie geometrycznie są podobne wtedy, gdy liczba Froude'a jest jednakość na modelu i w rzeczywistości:

$$Fr = \frac{v_m^2}{g} \cdot L_m = \frac{v_{rz}^2}{g} \cdot L_{rz}$$

gdzie:

- v_m – prędkości w modelu, $m \cdot s^{-1}$,
- v_{rz} – prędkości w rzeczywistości, $m \cdot s^{-1}$,
- L_m – wymiar liniowy w modelu, m,
- L_{rz} – wymiar liniowy w rzeczywistości, m,
- g – przyspieszenie ziemskie.

Przyjmując, że $g_m = g_{rz}$, oraz stosując tą samą ciecz na modelu i w rzeczywistości, uzyskujemy:

$$\text{skalę prędkości} \quad \alpha_v = \frac{v_m}{v_{rz}} = \alpha_L^{0,5}$$

$$\text{skalę przepływu} \quad \alpha_Q = \alpha_L^{2,5}$$

$$\text{skalę spadków} \quad \alpha_i = 1$$

gdzie:

$$\alpha_L - \text{skala podobieństwa geometrycznego} \quad \alpha_L = \frac{L_m}{L_{rz}}$$

We wzorze na liczbę Froude'a występuje prędkość, która jest prędkością średnią w pionie hydrometrycznym. Przeniesienie do warunków naturalnych pionowego rozkładu prędkości nie jest jednoznaczne, ponieważ należy dodatkowo uwzględnić wpływ dna na warunki przepływu. Do wyznaczenia skali podobieństwa oporów ruchu wykorzystuje się równanie Saint-Venanta. W równaniu tym występują opory przepływu obliczone ze wzoru Chezy'ego $\frac{v^2}{c^2} \cdot R$ oraz opory przepływu wywołane bezwładnością cieczy w ruchu

nieustalonym $\frac{dv}{g \cdot dt}$. Przeniesienie pomierzonych prędkości przepływu wody do warunków rzeczywistych z wykorzystaniem podobieństwa oporów ruchu według równania Saint-Venanta jest możliwe tylko dla wartości średnich (prędkość średnia, natężenie przepływu, układ zwierciadła wody), a nie parametrów ruchu poszczególnych strug cieczy. Z tego względu do przeniesienia pomierzonych rozkładów prędkości w pionach hydrometrycznych w warunki naturalne należy wykorzystać inną metodę niż teorię podobieństwa zjawisk fizycznych.

W przypadku posługiwania się wartościami średnimi parametrów przepływu w przekroju poprzecznym skala oporów ruchu wyrażona jest wzorem:

$$\text{skala szorstkości} \quad \alpha_n = \frac{n_m}{Ln_{rz}} = \alpha_L^{\frac{1}{6}}.$$

Na przykład przy zachowaniu skali prędkości średnia wartość prędkości wynosząca na modelu fizycznym w skali 1 : 6 $v_m = 0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ wynosiłaby w warunkach rzeczywistych $\alpha_v = 6^{0,5} = 2,45 \rightarrow v_{rz} = 0,74 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (założenia: zachowana skala spadku, przepływu, szorstkości).

W przypadku skażenia skal, to znaczy przyjęcia różnych skal wysokości i długości (dystorsja stosowana jest, gdy brak możliwości wykonania pomiarów ze względu choćby na małe napelnienie) skala spadku wynosi $\alpha_i = \frac{\alpha_h}{\alpha_L} = D$. Spadek podłużny na modelu jest większy niż spadek w rzeczywistości [Kubrak i Kubrak 2010].

Warunki przepływu wody określone w pomiarach laboratoryjnych pozwalają na charakterystykę typów siedlisk dla ryb z wykorzystaniem liczby Froude'a. Na podstawie badań Jowetta [1993] wartości graniczne liczby Froude'a wynoszą dla basenów mniej niż 0,18 oraz dla bystrzy więcej niż 0,41 (przepływ normalny $0,18 < Fr < 0,41$). Badania prowadzone w Stanach Zjednoczonych [Panfil i Jacobson 1999] pozwoliły na uwzględnienie napelnienia oraz na zwiększenie wyróżnionych typów siedlisk:

- zastoiska: $h < 0,2 \text{ m}$ i $Fr < 0,2$;
- baseny: $0,7 \text{ m} < h$ i $Fr < 0,1$;
- przepływ spokojny, normalny $0,2 \text{ m} < h < 0,7$ i $Fr < 0,1$ oraz $0,2 \text{ m} < h$ i $0,1 < Fr < 0,2$;
- przepływ szybki: $0,35 < h$ i $0,2 < Fr < 0,4$;
- wartki nurt: $h < 0,35 \text{ m}$ i $0,2 < Fr < 0,4$ oraz $0,35 \text{ m} < h$ i $0,4 < Fr$.

Kryteria te znalazły potwierdzenie w badaniach, które prowadzili Doisy i Rabeni [2001].

Ocena zaprojektowanych rozwiązań przepławek biologicznych w formie kanału naśladującego strumień naturalny powinna uwzględniać ocenę hydrauliczną oraz ocenę warunków siedliskowych dla ichtiofauny i makrobezkręgowców. Przykład modelu biologicznego stanowi model MesoHABSIM [Parasiewicz 2007], a procedurą, która ocenia typy siedlisk, jest Mesohabitat Evaluation Model (MEM) [Hauer i in. 2008]. Model MEM jest to model hydrauliczny pozwalający na określenie 6 typów siedlisk (od wartkiego nurtu do zastoisk) w korycie cieku oraz na prognozowanie ich zmian [Książek i Bartnik 2009]. Na wyniki mają wpływ przyjęte wielkości przedziałów dla napelnienia, prędkości przepływu wody oraz naprężeń. Badania laboratoryjne pozwolą na uszczegółowienie przyjętych przedziałów, na przykład poprzez uwzględnienie intensywności turbulencji.

PODSUMOWANIE

Modelowanie numeryczne przepławek bliskich naturze przeprowadzono dla rzeczywistych warunków przepływu wody. Wykonano model przepławki w formie obejścia budowli naśladującej naturalny strumień oraz z funkcją kanału tarłowego. Modelowanie numeryczne przeprowadzono dla różnych wariantów obliczeniowych obejmujących przypadek strumienia bez elementów różnicujących oraz z elementami różnicującymi przepływ wody, czyli progami i elementami habitatowymi o różnym rozstawie oraz różnej wysokości i głębokości. Obecność elementów habitatowych sprzyja zróżnicowaniu warunków siedliskowych ze względu na zmienne prędkości przepływu, napełnienia oraz naprężenia styczne na dnie na długości przepławki. Wektory prędkości wskazują lokalizacje powstawania wirów i miejsc zastoiskowych.

Pomiary laboratoryjne warunków przepływu wody występujących w różnych typach siedlisk – przy przepływie spokojnym, normalnym i rwącym – przeprowadzono w 5 seriach pomiarowych. Uzyskano rozkłady trzech składowych prędkości v_x , v_y i v_z w charakterystycznych punktach profilu podłużnego i przekroju poprzecznego: (1) na zbystrzeniu oraz (2) w strefie i (3) poza strefą turbulencji dla różnych konfiguracji dna i wielkości rumowiska. Sposób, w jaki następuje przepływ wody na długości przepławki, jest przyczyną zróżnicowania profili prędkości w obrębie basenów i zakłócenia rozkładu logarytmicznego profilu prędkości.

Przeniesienie uzyskanych na modelu fizycznym wyników na obiekty rzeczywiste z wykorzystaniem teorii podobieństwa zjawisk fizycznych jest możliwe tylko dla wartości średnich charakterystyk przepływu, a nie dla poszczególnych strug cieczy.

Warunki przepływu wody określone w pomiarach laboratoryjnych pozwolą na charakterystykę typów siedlisk dla ryb poprzez uwzględnienie rozkładów prędkości, intensywności turbulencji i naprężeń turbulentnych.

PIŚMIENNICTWO

- Aberle J., Koll K., Ditrich A., 2008. Form induced stresses over rough gravel-beds. *Acta Geophys.* 56(3), 584–600, DOI: 10.2478/s11600-008-0018-x.
- Doisy K.E., Rabeni C.F., 2001. Flow conditions, benthic food resources, and invertebrate community composition in a low-gradient stream in Missouri. *J. North Americ. Bentholog. Soc.* 20(1), 17–32.
- Jia Y., Wang S.S.Y., 2001. CCHE2D: Two-dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model For Unsteady Open Channel Flows Over Loose Bed. Technical Report No. NCCHE-TR-2001-1. National Center for Computational Hydroscience and Engineering, The University of Mississippi, USA.
- Jowett I.G., 1993. A method for objectively identifying pool, run, and riffle habitats from physical measurements. *New Zeal. J. Marine Freshwat. Res.* 27, 241–248.
- Hauer C., Tritthart M., Habersack H., 2008. Computer-aided mesohabitat evaluation, Part I: Background, model concept, calibration and validation based on hydrodynamic numerical modeling. *Int. Conf. on Fluvial Hydraulics – River Flow 2008*. Red. M. Altınakar, M.A. Kokpinar, Y. Darma, B. Yeğen i N. Harmancıoğlu. T. 3, 1967–1974.
- Książek L., Bartnik W., 2009. Wykorzystanie warunków hydraulicznych do oceny typów siedlisk w korycie rzeczonym. *Nauka Przyr. Technol.* 3(3), 89, 1–8.

- Książek L., Bartnik W., Rumian J., Zagórowski P., 2011. Turbulent water flow over rough bed – part I. 13th European Turbulence Conference. IOP Publishing. J. Phys.: Conf. Ser. 318 022012. doi:10.1088/1742-6596/318/2/022012.
- Książek L., Bartnik W., Strużyński A., Florek J., Epler P., Jelonek M., 2011. Badania laboratoryjne i modelowanie numeryczne hydraulicznych warunków przepływu wody w przepławkach ekologicznych dla ryb. Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki UR w Krakowie, maszynopis.
- Książek L., Bartnik W., Wyřebek M., 2008. Modelowanie numeryczne warunków przepływu wody w przepławce dla ryb. [W:] Ochrona ichtiofauny w rzekach z zabudową hydrotechniczną. Monografia. Red. M. Mokwa i W. Wiśniewolski. Dolnośląskie Wyd. Edukacyjne Wrocław, 156–164.
- Kubrak E., Kubrak J., 2010. Podstawy obliczeń z mechaniki płynów w inżynierii i ochronie środowiska. Wyd. SGGW Warszawa.
- Michalski A., 2004. Pomiary przepływu wody w kanałach otwartych. Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej Warszawa.
- Panfil M.S., Jacobson R.B., 1999. Hydraulic modeling of in-channel habitats in the Ozark Highlands of Missouri: Assessment of habitat sensitivity to environmental change. U.S. Geological Survey, Columbia Environmental Research Center, USA, cerc.usgs.gov/rss/rfmodel.
- Parasiewicz P., 2007. The MesoHABSIM model revisited. River Res. Appl. 23(8), 893–903,
- Pilch E., 2011. Analiza warunków hydraulicznych przepływu wody w przepławkach dla ryb na podstawie modelowania numerycznego. Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki UR w Krakowie, maszynopis.
- Wiśniewolski W., 2008. Migracje ryb – przyczyny, zagrożenia możliwości ochrony. [W:] Ochrona ichtiofauny w rzekach z zabudową hydrotechniczną. Monografia. Red. M. Mokwa i W. Wiśniewolski. Dolnośląskie Wyd. Edukacyjne Wrocław, 9–19.

PHYSICAL AND NUMERICAL MODELLING OF WATER FLOW IN FISHLADER CLOSE TO NATURE

Abstract. In the paper results of numerical modelling of water flow conditions in fishladers close to nature which are bypass channels designed as a natural stream and with habitat elements were presented. The simulations results were compared with laboratory measurements of vertical distributions of velocity at different habitats which occur in natural streams: from pool to fast run and riffle. There were measured three components of velocity v_x , v_y i v_z at characteristic points of longitudinal profile and cross-section: (1) at rapids, (2) inside and (3) outside turbulence zone for different bed configurations and size of bed material. The measured values were used to calculate velocity profiles, average velocities and characteristics of local flow conditions. This is an attempt to calculate a water flow parameters in nature base on laboratory measurements using similitude concept.

Key words: habitats for fish, three components of flow velocity, phenomena similitude

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 28.11.2011