

OBLICZENIA HYDRAULICZNE PRZEPLAWEK DLA RYB

Marian Mokwa

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Streszczenie. W celu umożliwienia rybom pokonywania skoncentrowanego spadku na rzekach, który powstał w wyniku sztucznego spiętrzenia wody przez przegrody, jazy, stopnie, progi i inne budowle, lub też spiętrzenia naturalnego tworzonego przez wodospady, buduje się urządzenia zwane przejściami dla ryb, powszechnie określane mianem przepławek (*Fischwege, échelles à poissons, fishways*). Przepławki dzieli się na techniczne, o charakterze naturalnym i specjalne. Projektowanie przepławek polega na przeprowadzeniu rozpoznania warunków hydraulicznych i hydrologicznych rzeki oraz założeń technicznych budowli piętrzącej. Należy zebrać informacje o składzie gatunkowym występujących w danym miejscu ryb oraz przewidywanej restytucji, szczególnie w odniesieniu do ryb wędrownych. Na podstawie tych materiałów opracowuje się koncepcję przepławki, mając na uwadze szereg uwarunkowań, które należy uwzględnić w procesie projektowania. Najważniejsze to odpowiednia wielkość przepławki i lokalizacja wlotów, odpowiedni przepływ i napełnienie oraz prędkości wody w urządzeniach. Zastosowanie procedury obliczeniowej zależy od rodzaju i kształtu przepławki oraz od warunków przepływu. Przy projektowaniu przepławek o charakterze technicznym (komorowe, szczelinowe, Denila) stosuje się zazwyczaj klasyczne wzory hydrauliczne na wypływ z otworu lub przelew. Przy projektowaniu przepławek o charakterze naturalnym procedury obliczeń hydraulicznych są bardziej skomplikowane. Na przykład przepławka w formie pochylnej kamiennej wymaga wyznaczenia współczynnika szorstkości, średnich oraz maksymalnych prędkości, a także maksymalnego przepływu przy danym napełnieniu. Jeżeli na to nałożymy rozkłady strug, prądy wabiące oraz ruch rumowiska, to do obliczeń trzeba wykorzystywać modele numeryczne. W artykule zaprezentowano procedury obliczeń hydraulicznych dla różnych typów przepławek.

Słowa kluczowe: przepławki dla ryb, obliczenia hydrauliczne

WSTĘP

Przejściami dla ryb (*Fischwege, échelles à poissons, fishways*) nazywa się urządzenia służące do pokonywania skoncentrowanego spadku na rzekach, powstałego w wyniku sztucznego spiętrzenia wody przez przegrody, jazy, stopnie, progi i inne budowle, lub też spiętrzenia naturalnego, które tworzą wodospady. Budowane od ponad 150 lat przejścia

Adres do korespondencji – Corresponding author: prof. dr hab. inż. Marian Mokwa, Instytut Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław, e-mail: marian.mokwa@up.wroc.pl.

dla ryb konstruowane były najczęściej w postaci komór rozdzielonych pionową ścianą z wycięciami lub szczelinami, przez które przepływała woda pod ciśnieniem. Taki system przejść dla ryb Matakiewicz (1920) nazwał przepławkami. Nazwa ta upowszechniła się i obecnie przejścia dla ryb, niezależnie od konstrukcji, są właśnie tak określane. Budowle tego typu, wykonywane zazwyczaj z betonu i nazywane przepławkami technicznymi, okazywały się często mało skuteczne i nie spełniały swego zadania. Wiele z nich zbudowano w czasach, kiedy znajomość funkcjonowania przepławk nie była wystarczająca, a także brakowało wiedzy o różnorodności zachowania się ryb. Jedną z form przepławk komorowych, która się obecnie stosuje, jest przepławka szczelinowa zaprojektowana w Stanach Zjednoczonych na początku lat 60. XX w. i budowana często w Europie. Charakteryzuje się zwartą konstrukcją, wymaganym małym przepływem wody, korzystnym rozkładem strug oraz prędkościami, które umożliwiają rybom wędrowanie bez dużego wysiłku w górę przepławki. Przykładem takiego przejścia dla ryb jest przepławka jednoszczelinowa przy zaporze zbiornika Kozielno (rys. 1). Ciekawą propozycją przepławk technicznych są tzw. przepławki meandrujące. Ich konstrukcja polega na kombinacji pionowo ustawionych części rur tak, aby zwiększyć drogę przepływu i wytworzyć korzystny dla ryb układ strug.

W ostatnich latach pojawiła się przepławka z zabudową szczotkową zaproponowana przez naukowców z Uniwersytetu w Kassel jako uzupełnienie stosowanych dotychczas przepławk komorowych. W tego typu urządzeniach, w przeciwieństwie do przepławk klasycznych, nie wykorzystuje się wbudowanych kamiennych lub betonowych przegród, lecz w pole prędkości wprowadzona zostaje elastycznie uginająca się szczecina (szczotki) jako tzw. element oporów kształtu, na których ulega redukcji prędkość przepływu.

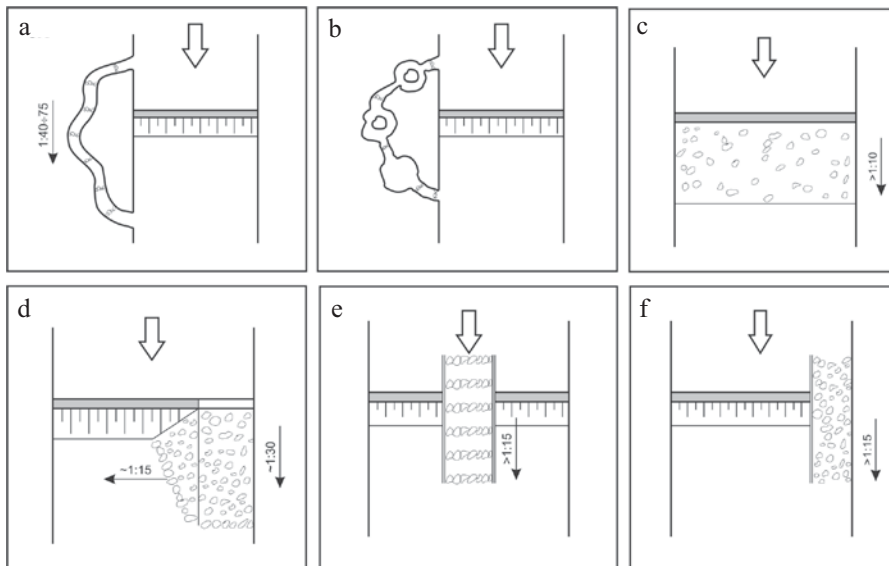


Rys. 1. Przepławka jednoszczelinowa na zaporze Kozielno
Fig. 1. One-slot fishway (Vertical-Slot) at Kozielno dam

Doświadczenia, które zdobyto w wyniku wieloletniej eksploatacji przepławek, oraz lepsze rozumienie ekologicznego znaczenia i funkcjonowania systemów rzecznych przyczyniły się do opracowania nowych rozwiązań polegających na stworzeniu rybnym warunków zbliżonych do tych, jakie napotykają w naturalnej rzece. Powstały więc konstrukcje o luźnej zabudowie z wykorzystaniem naturalnych materiałów, takich jak kamień, drewno czy rumowisko rzeczne. Konstrukcje zbliżone do naturalnych podzielić można na przepławki obejściowe, które dobudowuje się z boku do istniejącej budowli piętrzącej, oraz przepławki wkomponowane w budowlę piętrzącą.

Przepławki obejściowe (rys. 2a, 2b) konstruowane są na podobieństwo naturalnych koryt – składają się z odcinków o zróżnicowanej szorstkości (z progami kamiennymi, ostrogami) i nachyleniu dna od 1 : 100 do 1 : 20. Kanały obejściowe mogą być przedzielone akwenami i basenami spowalniającymi przepływ i stanowiącymi miejsca odpoczynku dla ryb. Pierwszą tego typu przepławkę w Polsce zaprojektowano w 1995 roku na ówczesnej Akademii Rolniczej we Wrocławiu i wybudowano rok później na rzece Skora przy jazie w Goliszowie.

Pochylnie, zwane też rampami, wbudowywane są zazwyczaj w dodatkowe wąskie światło jazu lub zajmują całą jego szerokość (rys. 2c, 2e, 2f). Ich nachylenie mieści się w przedziale od 1 : 10 do 1 : 13. Wykonane są zazwyczaj z kamieni i głazów ułożonych luźno lub umocnionych betonem. W zależności od konstrukcji dzieli się je na *rampy narzutowe* – wykonane z usypanych kamieni, *rampy sztorcowe* – złożone z wmurowanych na sztorc głazów, oraz *rampy ryglowe* – utworzone z progów stanowiących luźno ułożone obok siebie głazy. W jazach stałych, w przesłach płuczących wykonuje się rampy-bystrzoki o podwójnym nachyleniu (rys. 2d) (Bojarski i in. 2005)



Rys. 2. Schematyczne rozwiązania współcześnie projektowanych przepławek [Mokwa i Malczewska 2008]

Fig. 2. Schematic representation of present-day fishway designs [Mokwa and Malczewska 2008]

Na uwagę zasługują także inne rozwiązania wzorowane na naturalnych przejściach, a wykonywane w formie elementów sztucznych, z wykorzystaniem imitacji głazów i kamieni z tworzyw, konstrukcji siatkowo-kamiennych czy zabudowy torów kajakowych.

Osobną grupę stanowią tzw. przepławki specjalne, do których zalicza się śluzy i windy dla ryb.

MATERIAŁY I METODY

Podstawowe obliczenia hydrauliczne dla przepławek sprowadzają się na ogół do wyznaczenia średnich i maksymalnych prędkości oraz natężenia przepływu przy założonych głębokościach. Maksymalne prędkości w przepławce nie mogą przekraczać prędkości granicznych, które wynikają z cech motorycznych ryb. Możliwości pokonywania przez ryby prądu wody są silnie zróżnicowane i zależą od gatunku i rozmiarów. Siła P_x , jakiej potrzebuje ryba do przeciwstawienia się prądowi wody, można określić zgodnie z zależnością: $P_x = C_x \cdot S \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v^2$, gdzie: C_x – współczynnik oporu ciała ryby, S – powierzchnia przekroju poprzecznego ryby [m^2], v – prędkość wody [$m \cdot s^{-1}$], ρ – gęstość [$kg \cdot m^{-3}$].

Możliwości przeciwstawienia się prądowi wody przez poszczególne gatunki ryb stanowią podstawę wyznaczania maksymalnej prędkości wody w przepławce. W nowoczesnych konstrukcjach przepławek przyjęto następujące dopuszczalne prędkości przepływu wody dla poszczególnych gatunków ryb:

- ryby łososiowate – $2,0 m \cdot s^{-1}$,
- ryby karpowate – $1,5 m \cdot s^{-1}$,
- pozostałe gatunki – $1,0 m \cdot s^{-1}$.

W celu zachowania drożności biologicznej cieku przepływ przez przepławkę powinien być zapewniony przez cały rok. W okresach wędrówki ryb na tarło minimalne napełnienie wody w przepławce nie może być mniejsze od:

Tabela 1. Okresy tarła niektórych gatunków ryb na tle średniego niskiego przepływu SNQ
Table 1. Spawning periods for some fish species comparing to the mean low discharge SNQ

Gatunek Species	Miesiące – Months											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Szczupak Pike		■	■	■								
Płoc Roach			■	■	■							
Kleń Chub				■	■	■						
Kiełb Gudgeon				■	■	■	■					
SNQ 1961–1980	3,26	2,62	2,25	2,65	3,24	2,34	2,58	2,57	2,66	3,40	2,40	2,34

■ okres tarła – spawning period

- 1,3 m dla jesiotra,
- 0,75 m dla troci i łososia,
- 0,5 m dla pstrąga i pozostałych ryb.

Obliczone natężenie przepływu wody przez przepławkę musi być dobrze skorelowane z warunkami hydrologicznymi cieku, tak aby dno wylotu na stanowisku dolnym posadowione było min. 0,5–0,7 m poniżej zwierciadła wody przy przepływie wody średnie niskiej.

Obliczenia hydrauliczne przepławek technicznych

Obliczenia hydrauliczne przepławek technicznych przeprowadza się za pomocą równania Bernoulliego dla przekroju zwierciadła wody w komorze górnej przepławki i w przekroju otworu.

Przepławka komorowa. Obliczenia polegają na ustaleniu optymalnych wymiarów przepławki dla tych gatunków ryb, które będą się przez nią przemieszczały z dolnego na górne stanowisko. Dotyczy to w szczególności rozmiarów komór, od których zależy między innymi spadek Δh , oraz wymiarów otworów przelewowych, przystosowanych do danego gatunku ryb. Dla ustalonych parametrów technicznych przepławki wylicza się prędkość przepływu wody przez otwory oraz ich wydatek.

Wzór na prędkość wypływu v ustalonego przez mały otwór zatopiony ma postać (rys. 3):

$$v = (2g\Delta h)^{0,5} \quad (1)$$

gdzie:

Δh – różnica poziomów wody pomiędzy komorami [m],

g – przyspieszenie ziemskie [$m \cdot s^{-2}$].

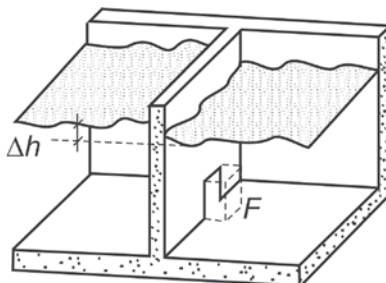
Po uwzględnieniu współczynnika wydatku przelewu μ , wydatek otworu Q wyniesie:

$$Q = \mu F (2g\Delta h)^{0,5} \quad (2)$$

gdzie:

μ – współczynnik wydatku przelewu,

F – powierzchnia otworu [m].



Rys. 3. Przepławka komorowa.

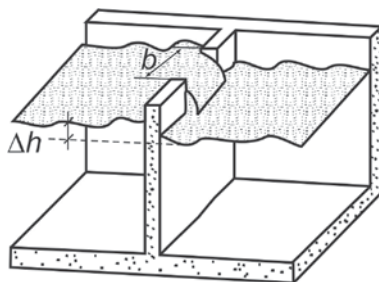
Fig. 3. Pool fishway

Równanie wydatku przelewu przybiera następującą formę (rys. 4):

$$Q = \mu b (2g)^{0.5} \Delta h^{3/2} \quad (3)$$

gdzie:

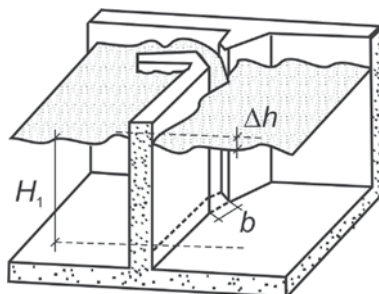
b – szerokość przelewu [m].



Rys. 4. Przeławka komorowa. Przepływ przez przelew

Fig. 4. Pool fishway. Overflow by spillway

Przeławka szczelinowa.



Rys. 5. Przeławka szczelinowa

Fig. 5. Vertical slot fishway

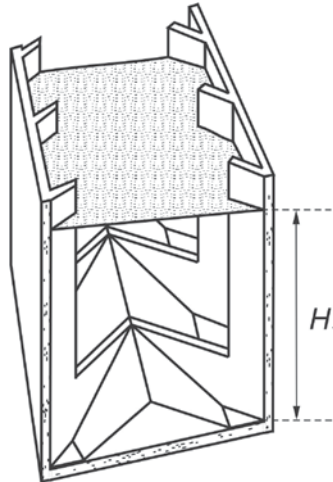
$$Q = \mu b H_1 (2g \Delta h)^{0.5} \quad (4)$$

gdzie:

H_1 – głębokość wody w komorze [m],

b – szerokość szczeliny [m].

Przepławka Denila.



Rys. 6. Przepławka Denila
Fig. 6. Denil fishway

$$Q = 1,5 \cdot b^{2,5} \sqrt{g \cdot \Delta h} \left(\frac{H_1}{b} \right)^{1,584} \quad (5)$$

gdzie:

- H_1 – głębokość wody powyżej przegrody [m],
- b – szerokość otworu w przegrodzie [m].

Obliczenia hydrauliczne przepławki naturalnej w postaci pochylni kamiennej. W przepławkach typu pochylnia przyjmuje się, że prędkość na wlocie z wody górnej winna wahać się od $0,9$ do $1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, a na wylocie do wody dolnej prędkości nie mogą być większe niż $1,8$ – $1,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (zależne od gatunku ryb). Duże prędkości wypływu wody z przepławki są niezbędne do wytworzenia na dolnym stanowisku budowli piętrzącej prądu wabiącego [Rembeza i Kałuża 2008]. Obliczenia średniej prędkości przepływu (v_{sr}) w przepławce dokonuje się na podstawie wzoru Darcy-Weisbacha:

$$v_{sr} = \frac{1}{\sqrt{\lambda_{ges}}} \sqrt{8gR_h I} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6)$$

gdzie:

- R_h – promień hydrauliczny [m],
- λ_{ges} – całkowity współczynnik oporów [-],
- I – spadek dna.

Całkowity współczynnik oporu (λ_{ges}) określa wzór:

$$\lambda_{ges} = \frac{\lambda_s + \lambda_o(1 - \varepsilon_o)}{(1 - \varepsilon_v)} \quad [-] \quad (7)$$

gdzie:

- ε_v – współczynnik zależny od objętości koryta pochylni i objętości wykorzystanych do budowy kamieni i głazów,
- ε_o – współczynnik zależny od powierzchni koryta oraz powierzchni kamieni i głazów użytych do budowy przeławki,
- λ_s – współczynnik oporu wynikający z obecności kamieni i głazów w korycie,
- λ_o – współczynnik oporu wynikający z szorstkości dna koryta.

Współczynnik oporu λ_o można wyznaczyć, korzystając ze zmodyfikowanego wzoru Colebrooka-White'a:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_o}} = -2 \log \frac{\frac{k_s}{R_h}}{14,84} \quad (8)$$

gdzie:

- k_s – zastępcza szorstkość narzutu kamiennego [m],
- R_h – promień hydrauliczny koryta [m].

Do wyznaczenia współczynnika oporu (λ_s) wynikającego z obecności kamieni i głazów w korycie przeławki służy zmodyfikowana formuła Lindnera:

$$\lambda_s = 4c_w \frac{\sum A_s}{A_{o,ges}} \quad (9)$$

gdzie:

- c_w – współczynnik oporów hydraulicznych kamieni i głazów, $\approx 1,5$,
- $\sum A_s$ – suma pól przekroju poprzecznego kamieni i głazów [m²],
- $A_{o,ges}$ – całkowita powierzchnia koryta pochylni [m²].

Wzór na prędkość maksymalną v_{max} w maksymalnie zabudowanym przekroju pochylni przyjmuje postać:

$$v_{max} = \frac{v_{sr}}{1 - \frac{\sum A_s}{A_{ges}}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (10)$$

gdzie:

- v_{sr} – średnia prędkość przepływu obliczona według wzoru (1) [m · s⁻¹],
- A_{ges} – pole przekroju poprzecznego koryta pochylni (bez uwzględnienia kamieni i głazów) [m²],
- $\sum A_s$ – suma pól przekroju poprzecznego kamieni i głazów w ekstremalnie zabudowanym przekroju pochylni [m²].

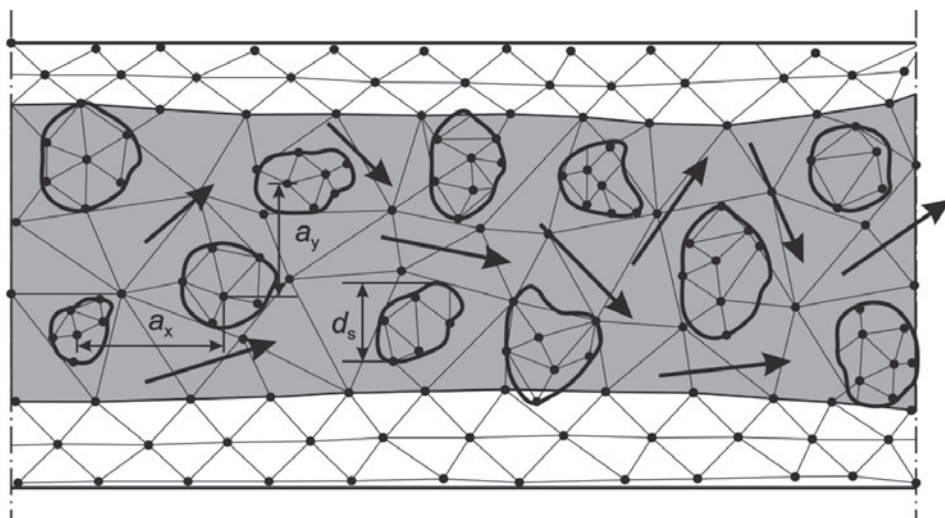
Modelowanie numeryczne przepławki z wykorzystaniem modeli dwuwymiarowych w planie. Istnieje cała grupa modeli dwuwymiarowych do obliczania przepływu wody w kanałach otwartych (np. Mike 11, CCHE2D, SMS). Większość z nich można po adaptacji wykorzystać do obliczeń hydraulicznych przepławek dla ryb.

Obliczenia warunków przepływu wody przez przepławkę można przeprowadzić z wykorzystaniem modelu CCHE2D opracowanego przez Center for Computational Hydroscience and Engineering w University of Mississippi (USA). Model został zastosowany z powodzeniem do obliczeń hydraulicznych przepławki ryglowej [Książek i in. 2008]. Umożliwia on wykonanie obliczeń w warunkach ustalonego lub nieustalonego przepływu wody w rzekach i korytach otwartych oraz ocenę transportu rumowiska wlezonego i unoszonego. Pozwala ponadto na określenie zmian konfiguracji dna będących wynikiem procesów morfologicznych. W modelach tego typu uśrednienia się wielkości hydrauliczne w pionie. Turbulentny współczynnik lepkości ν_t może być określony w równaniu zachowania pędu trzema metodami: z uśrednionej głębokości, z drogi mieszania lub z modelu $k-\epsilon$. Przy określaniu prędkości dynamicznej istnieją dwie procedury. Pierwsza sprowadza się do zastosowania uśrednionej głębokości na podstawie krzywej logarytmicznej; druga wykorzystuje współczynnik Manninga n . Wykorzystanie współczynnika n pozwala na łączne wzięcie pod uwagę w obliczeniach wpływu form dennych, roślinności, geometrii kanału oraz wielkości materiału dennego połączonych w jeden współczynnik. Istotne jest przy tym, by współczynnik Manninga n przy dokonywaniu obliczeń zmian konfiguracji dna uwzględniał nie tylko skład granulometryczny rumowiska, ale i jego zmianę w czasie. Poziom zwierciadła wody ustala się z równania ciągłości, które jest szeroko stosowane w modelach dwuwymiarowych. Do rozwiązywania równań różniczkowych (równanie zachowania energii, pędu, masy) używa się metody elementów skończonych.

W czasie symulacji model CCHE2D uwzględnia transport materiału dennego spowodowany ruchem spiralnym wody oraz zmianę warunków krytycznych początku ruchu, która wywołana jest zmianą nachylenia dna koryta. W modelu CCHE2D obliczenia transportu rumowiska oparte są na formule Van Rijna, w której naprężenia krytyczne wylicza się na podstawie wzoru Yalina. Obliczenia parametrów przepływu wykonywane są w węzłach siatki dyskretyzacyjnej, której wymiary powinny uwzględniać warunki przepływu.

Innym modelem, który można zastosować do obliczeń parametrów hydraulicznych przepławki, jest model SMS (Surface-Water Modeling System) Armii Stanów Zjednoczonych. Dwuwymiarowego modelowania hydrodynamicznego dokonuje się na podstawie siatki dyskretyzacyjnej utworzonej w module Mesh [Mokwa i Markowski 2004].

Moduł hydrodynamiczny modelu SMS (RMA 2) pozwala symulować obszary przepławki w trakcie analizy przejścia nieustalonego przepływu wody, posługując się własnością zalewania elementów utworzonej siatki dyskretyzacyjnej. Układ równań i rodzaj schematów numerycznych wykorzystany w programie SMS powoduje, że dla jego rozwiązania wymagane są warunki brzegowe w skrajnych przekrojach rozpatrywanej sieci.



Rys. 7. Siatka dyskretyzacyjna na modelu przepławki uformowanej z luźno ułożonych głazów
 Fig. 7. Digitising net for a fishway model built from loosely disposed boulders

Parametrami modelu są współczynniki szorstkości oraz współczynnik członu turbulencji wzdłużnej τ . Jako kryterium dokładności symulacji stosuje się zgodność pomierzonych i obliczonych stanów wody oraz prędkości przepływu w różnych punktach badanego obszaru. Numeryczna realizacja modelu opiera się na zasadzie, że struktura topograficzna sieci opisana jest za pomocą siatki składającej się z odcinków i węzłów, nałożonej na powierzchnię koryta przepławki i elementy kamienne. Procedura obliczeniowa modelu polega na linearyzacji odcinkowych równań różnicowych z zastosowaniem „podwójnego przeliczania” dla wszystkich odcinków sieci. W następnej kolejności następuje redukcja układu brzegowego do układu węzłowego, który jest rozwiązywany metodą Gaussa. W rezultacie uzyskuje się rozwiązanie „wnętrz” wszystkich odcinków i aktualizację parametrów geometrycznych. Model ma moduł rumowiskowy.

Obliczenia hydrauliczne przepławki z zabudową roślinną. W literaturze fachowej szczególnie miejsce zajmują procedury obliczeniowe oparte na eksperymentach Lindnera i Paschego [Tymiński i Kałuża 2008]. Procedura obliczeniowa oparta jest na fakcie, że siła oporów kształtu F_R dla opływanych cylindrów (łodyg, szczotek) przekłada się na naprężenia styczne na tzw. specyficznej powierzchni omywania (dla pojedynczej łodygi jest to iloczyn $a_x \cdot a_y$).

$$F_R = \frac{1}{2} A_R c_w \rho v^2 \quad (11)$$

w szczególnym przypadku:

$$a_x = a_y = \sqrt{\frac{A_v}{n}} \quad (12)$$

$$\lambda_R = \frac{4hd_p}{a_x a_y} c_{WR} \quad (13)$$

gdzie (11–13):

- A_R – pole przekroju poprzecznego pojedynczej rośliny [m²],
- A_v – pole powierzchni obszaru zajmowanego przez rośliny ($B \times L$) [m²],
- n – liczba łodyg (szczotek),
- d_p – średnica pojedynczej rośliny [m].

Jak wynika z analizy równań (11), (12) i (13), problem określania współczynników oporów λ_R sprowadza się do poprawnego wyznaczenia współczynnika oporów kształtu c_{WR} – pojedynczego elementu wśród grupy roślin i określeniu ich rozstawy: w kierunku przepływu a_x oraz prostopadłe do niego a_y . Lindner do obliczania współczynnika c_{WR} podaje zależność, którą do celów praktycznych wygodnie jest stosować w modyfikacji Rickerta:

$$c_{WR} = c_{W\infty} \left(1 + 1,9c_{W\infty} \frac{d_p}{a_y} \right) \left(\frac{v_i}{v_R} \right)^2 + 2 \left(\frac{1}{1 - \frac{d_p}{a_y}} - 1 \right) \quad (14)$$

gdzie:

- $c_{W\infty}$ – współczynnik oporu pojedynczego elementu roślinnego,
- $\left(\frac{v_i}{v_R} \right)$ – względna prędkość dopływu do elementu roślinnego, zależna głównie od długości (a_{NL}) i szerokości (a_{NB}) ścieżki wirowej Karmana za opływającą łodygą.

Przy opływie elementów roślinnych tworzą się tzw. bezwładnościowe fale stojące, które powodują dodatkowy wzrost oporów kształtu. Wpływ ten uwzględnia drugi człon równania (14). Charakterystykę oporów przepływu w przepławce z zabudową roślinną λ_R należy uzupełnić formułą uwzględniającą opory tarcia na dnie i skarpach koryta λ_D . Zadowalającą dla celów projektowych dokładność zapewnia modyfikacja równania Colebrooka-White'a podana przez Paschego:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_D}} = 2 \log \left(\frac{14,84R_{h,D}}{k_{s,D}} \right) \quad (15)$$

Do oszacowania zastępczej szorstkości piaskowej dla dna skarp koryta $k_{s,D}$ pomocne mogą być podręczniki inżynierskie. Można również wykorzystać znajomość współczynnika szorstkości n (tutaj n_D) we wzorze Manninga. Według Garbrechta pomocna jest następująca zależność:

$$k_{s,D} = \frac{1}{n_D} = \frac{26}{k_{s,D}^{1/6}} \quad (16)$$

z której po przekształceniu otrzymuje się:

$$k_{s,D} = (26n_D)^6 \quad (17)$$

Należy w tym miejscu wyróżnić inną formę wzoru (15) preferowaną przez Rickerta przy obliczaniu naturalnych koryt rzecznych o przekroju złożonym:

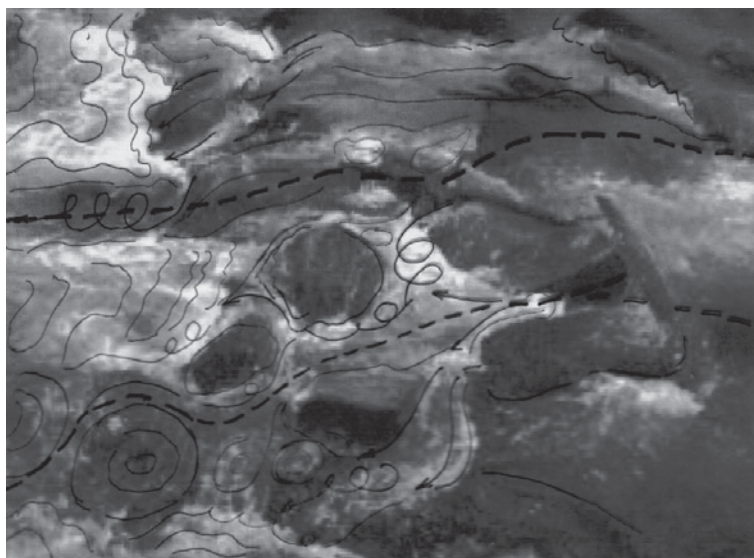
$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_D}} = 2 \log \left(\frac{12, 2R_{h,D}}{k_{s,D}} \right) \quad (18)$$

Odpowiedzi na pytanie, która formuła jest bardziej wskazana przy wymiarowaniu „obiektów sztucznych”, tj. budowanych przez człowieka przepławek, może dostarczyć weryfikacja wzorów, np. na drodze pomiarów laboratoryjnych. Sumaryczny współczynnik oporów dla roślin (szczotek) λ_R oraz dna i ścian koryta λ_D wynika z superpozycji Einsteina/Banksa:

$$\lambda = \lambda_D + \lambda_R \quad (19)$$

W celu obliczenia prędkości średniej, a w dalszej kolejności wydatku przepławki skorzystać można z klasycznego wzoru Darcy-Weisbacha:

$$v_{sr} = \frac{1}{\lambda} \sqrt{8gR_h I_E} \quad (20)$$



Rys. 8. Model rozkładu strug w przepławce uformowanej z luźno ułożonych głazów
Fig. 8. Model of stream distribution in a fishway built from loosely disposed boulders

Istotnym zagadnieniem hydrauliki przepławek jest określenie rozkładu linii strug oraz warunków przepływu turbulentnego. Dotyczy to zarówno przepławek o charakterze technicznym, jak i naturalnym. Warunek nieprzekraczania prędkości dopuszczalnych dla poszczególnych gatunków ryb w przepławce nie jest kryterium wystarczającym. Pokonując przepławkę, ryby często powinny mieć zapewnioną możliwość odpoczynku w strefach o zmniejszonej prędkości oraz wytyczoną drogę poruszania się. W strefach o dużej turbulencji tracą one orientację, w związku z czym trudno im znaleźć drogę do otworów przesmykowych i szczelin. Problem ten może być po części rozwiązany poprzez badania na modelach fizycznych lub na modelach matematycznych dwuwymiarowych w planie (rys. 8).

Przyjęcie właściwych parametrów technicznych oraz hydraulicznych przepławki można sprawdzić, posługując się wielkością wyrażającą jednostkową energię wody E ($W \cdot m^{-3}$) w komorze, określoną wzorem:

$$E = \frac{\rho g \Delta h Q}{At} \quad (21)$$

gdzie:

Δh – różnica poziomów wody między komorami [m],

Q – przepływ wody przez przepławkę [$m^3 \cdot s^{-1}$],

A – powierzchnia komory (basenu) [m],

t – napełnienie w komorze (basenie) [m].

Według badań niemieckich wielkość tego wskaźnika nie powinna przekraczać 150–200 $W \cdot m^{-3}$.

Warunki stabilności dna przepławki naturalnej i ruch rumowiska. W przepławkach o charakterze naturalnym, takich jak kanały obejściowe, których dno zbudowane jest z materiału podobnego do dna rzeki, ważne zagadnienie stanowi prognozowanie jego stabilności, szczególnie w warunkach przejścia fali wezbraniowej. Krüger (2008) podaje kilkanaście wzorów empirycznych różnych autorów na jednostkowy przepływ dla początku ruchu rumowiska. Jednym z nich jest wzór Whittakera i Jäggi z 1986 r.:

$$q_k = 0,257 \sqrt{g \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}} I^{-7/6} d_{65}^{3/2} \quad (22)$$

gdzie:

$$\rho_s = 2600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}.$$

Warunki hydrauliczne przepływu wody przez przepławkę muszą także uwzględniać ruch rumowiska, ze względu na możliwą akumulację lub erozję materiału dennego.

WYNIKI

W tabeli 2 poniżej zestawiono wyniki obliczeń średnich wielkości przepływu wody i dyssypacji objętościowej w komorze/basenie kilku typów przepławek dla największych anadromicznych ryb dwuśrodowiskowych (jesiotr).

Tabela 2. Przykładowe wyniki obliczeń parametrów różnych przepławek
 Table 2. Sample results of calculations of parameters for different fishways

Parametry Parameters	Jednostki Unities	Rodzaj przepławki Type of fish pass			
		Jedno- szczelinowa With one slot	Dwu- szczelinowa With two slots	Kaskadowa Cascade type	Bystrotok Channel with perturbation boulders
Długość wewnętrzna komory/basenu Internal length of chamber/of pool	m	6,5	4,5	6,0	Nie dotyczy Not applicable
Szerokość wewnętrzna Internal width of chamber	m	4,5	5,0	6,0–8,0	6,0–8,0
Szerokość szczeliny Slot width	m	0,75	0,6	0,8	0,75
Głębokość wody w komorze Water depth in chamber	m	1,8–1,4	1,8–1,4	1,6–1,2	1,6–1,2
Spad między komorami/basenami Water level differences between chambers/pools	m	0,15	0,15	0,15	Nie dotyczy Not applicable
Wielkość przepływu wody Water flow	$m^3 \cdot s^{-1}$	1,50	2,15	2,0	2,5
Dyssypacja objętościowa w komorach/basenach Volumetric dissipation in chambers/pools	$W \cdot m^{-3}$	50	100	120	Nie dotyczy Not applicable

WNIOSKI

Obliczenia hydrauliczne dla przepławek zależą od typu tych ostatnich. Projektując przepławki o charakterze technicznym, korzystamy zazwyczaj z podstawowych wzorów z hydrauliki opartych na równaniu Bernoulliego. Obliczenia hydrauliczne przepławek bliskich naturze przeprowadza się, wykorzystując równania oraz modele matematyczne opisujące ruch wody w korytach otwartych.

Przed przystąpieniem do przeprowadzenia obliczeń hydraulicznych należy zebrać informacje dotyczące:

- warunków hydrologicznych rzeki (przepływy),
- parametrów technicznych urządzeń piętrzących (jaz, elektrownia, urządzenia zrzutowe),
- składu ryb z uwzględnieniem gatunków chronionych, zagrożonych i cennych gospodarczo (dwuśrodowiskowych).

W następnej kolejności należy ustalić:

- typ przeprawki i jej lokalizację,
- warunki techniczne przeprawki (długość całej przeprawki i poszczególnych komór, jej szerokość, wielkość przesmyków),
- podstawowe warunki hydrauliczne (prędkości maksymalne i minimalne, napełnienie).

Wybór odpowiedniej procedury obliczeniowej warunków hydraulicznych zależy od typu przeprawki. Jeżeli istnieją po temu warunki, obliczenia hydrauliczne powinny zostać zweryfikowane na modelu fizycznym, zwłaszcza w zakresie rozkładu strug i prędkości. Zadawalające rezultaty obliczeń hydraulicznych zostały osiągnięte z zastosowaniem modeli matematycznych.

PIŚMIENNICTWO

- Bojarski A., Jeleński J., Jelonek M., Litewka T., Wyżga B., Zalewski J., 2005. Zasady dobrej praktyki w utrzymaniu rzek i potoków górskich. Ministerstwo Środowiska, Departament Zasobów Wodnych Warszawa.
- DVWK, 1996. Fischaufstiegsanlagen-Bemessung, Funktionskontrolle. DWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft 232/96
- Książek L., Bartnik W., Wyrębek M., 2008. Modelowanie numeryczne warunków przepływu wody w przeprawce dla ryb. [Rozdział w:] Ochrona ichtiofauny w rzekach z zabudową hydrotechniczną. Dolnośląskie Wyd. Edukacyjne Wrocław, 156–165.
- Krüger F., 2008. Anforderungen an Fischaufstiegsanlagen. Beispiele aus der Praxis. [Referat wygłoszony na konferencji „Wasser und Umwelt”]. Universität Hannover.
- Mokwa M., Markowski J., 2004. Wykorzystanie modelu hydrodynamicznego SMS do analizy zmian dna zbiornika Brzeg Dolny przy przepływach wezbraniowych. [Rozdział w:] Współczesne problemy inżynierii środowiska. II. Ochrona od powodzi. Wydawnictwo AR Wrocław, 59–69.
- Mokwa M., Malczewska B., 2008. Współczesne tendencje w budowie przejść dla ryb. [Rozdział w:] Ochrona ichtiofauny w rzekach z zabudową hydrotechniczną. Dolnośląskie Wydawnictwa Edukacyjne Wrocław, 82–90.
- Rembeza L., Kałuża T., 2008. Obliczenia hydrauliczne przeprawki dla ryb i przepustowości budowli stopnia wodnego na rzece San w Przemyślu. [Rozdział w:] Ochrona ichtiofauny w rzekach z zabudową hydrotechniczną. Dolnośląskie Wydawnictwa Edukacyjne Wrocław, 91–101.
- Tymiński T., Kałuża T., 2008. Hydrauliczne obliczenie przeprawek z zabudową roślinną. [Rozdział w:] Ochrona ichtiofauny w rzekach z zabudową hydrotechniczną. Dolnośląskie Wydawnictwa Edukacyjne Wrocław, 102–110.

HYDRAULIC CALCULATIONS FOR FISHWAYS

Abstract. Special structures called fishways or fishpasses serve a purpose of allowing fish to pass through the step slope of a river formed as a result of artificial river damming by way of dams, weirs, steps and other structures or natural damming caused by waterfalls. There are three types of fishways: technical, natural and special. Prior to creating a design for a fishway, it is necessary to understand the hydraulic and hydrological conditions of the river and the technical characteristics of the water structure as well as to gather data on the existing species of fish, especially migratory fish, and the expected restitution. On the basis of these data, the design concept is prepared taking into consideration a number of determinants

such as the size of the fishway, the location of the entrances and the water level, flow and velocity. The calculation procedure depends on the type and form of the fishway and the water flow conditions. For technical fishways (chamber, vertical slot and Denila types), classical hydraulic formulae of outflow or overflow are generally applied. For natural fishways, the calculation process is more complicated. For example, in designing a stone slipway-type fishway it is necessary to determine the roughness coefficient, the medium and maximum velocities, as well as the maximum flow at a given water level. Besides, stream distributions, attracting currents, and sediment movement should be considered, which necessitates using mathematical models. The paper presents the procedures of hydraulic calculations for various fishway constructions.

Key words: fishways, hydraulic calculations

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 21.05.2010